



**Universidad  
Europea**

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**HERRAMIENTA PARA EL  
PREDIMENSIONAMIENTO Y ESTUDIO  
DE OBRAS SUBTERRÁNEAS DE  
DESARROLLO LINEAL**

**Martín González Adán**

**DIRIGIDO POR:**

**Dr. D. Carlos Barba Ávila**

CURSO ACADÉMICO 2025-2026



## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido, de una u otra manera, a la realización del presente Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, deseo agradecer al director del TFM, el Doctor Don Carlos Barba Ávila, por su orientación, por la propuesta inicial del trabajo y por su constante disposición, así como por los valiosos consejos aportados a lo largo de todo el proceso.

Asimismo, quiero mostrar mi agradecimiento a todos los profesores del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Europea de Madrid, quienes durante estos dos cursos académicos han demostrado una gran dedicación, paciencia y disponibilidad, comprendiendo en todo momento el esfuerzo requerido para alcanzar este objetivo.

De igual modo, expreso mi más profundo agradecimiento a mi esposa, Irati, por su paciencia, apoyo incondicional y constante ánimo a lo largo de este camino.

Finalmente, deseo agradecer a mi familia y a mis amigos por su apoyo continuo y su confianza. Su respaldo ha sido fundamental para superar los desafíos afrontados durante estos dos años.



## DEDICATORIA

*Por quienes están,*

*y por quienes ya no están.*

*Siempre presentes.*

*Gracias*



## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster desarrolla una herramienta de apoyo para el predimensionamiento de obras subterráneas de desarrollo lineal en fases iniciales de proyecto, proporcionando una primera aproximación técnica que oriente la toma de decisiones a partir de la información disponible.

La herramienta integra diversas clasificaciones geomecánicas y de suelos, permitiendo una visión global del comportamiento del terreno. A partir de datos geológicos, geotécnicos y geométricos, se realiza una partición longitudinal en tramos homogéneos sobre los que, mediante reglas técnicas, se proponen soluciones constructivas preliminares, incluyendo métodos de excavación, sostenimientos y estimaciones económicas.

Como elemento diferencial, permite trabajar simultáneamente con varias clasificaciones, mostrando resultados de forma integrada y actualizable conforme se dispone de nueva información. De este modo, reduce la incertidumbre en fases iniciales y mejora la base para la toma de decisiones. Finalmente, se incluye un caso de estudio real que valida su aplicabilidad como herramienta de apoyo técnico.

**Palabras clave:** obra subterránea de desarrollo lineal, predimensionamiento, clasificaciones geomecánicas, proceso constructivo, apoyo a la toma de decisiones.

## ABSTRACT

This Master's Thesis presents a support tool for the preliminary design of linear underground works in early project stages, providing a technical basis to guide decision-making from limited initial information.

The tool integrates multiple geomechanical and soil classification systems, offering a comprehensive understanding of ground conditions. Based on geological, geotechnical, and geometrical data, the alignment is divided into homogeneous sections, where technical rules are applied to propose preliminary construction solutions, including excavation methods, support systems, and cost estimations.

A key feature is the simultaneous use of different classification systems, with integrated and updatable results as new information becomes available. This approach reduces uncertainty in early stages and improves decision-making. A real-case study is included to validate its practical applicability as a support tool.

**Keywords:** linear underground works, preliminary design, geomechanical classifications, construction process, decision support.

## CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contexto .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Problemática actual en la caracterización de obras subterráneas .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Objetivos del trabajo .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Metodología de trabajo .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Estructura del documento .....</b>	<b>6</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Evolución histórica de las obras subterráneas.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Comportamiento del terreno frente a excavaciones subterráneas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Parámetros geotécnicos y geomecánicos relevantes .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4. Principales sistemas de clasificación geomecánica en macizos rocosos .....</b>	<b>24</b>
2.4.1. RMR de Bieniawski 1989.....	28
2.4.2. Q-Barton 1974 .....	34
2.4.3. GSI Hoek y Marinos 1990 .....	40
2.4.4. Clasificación de Romana 2001 .....	43
<b>2.5. Principales sistemas de clasificación geomecánica en suelos .....</b>	<b>47</b>
<b>2.6. Comparativa y limitaciones de los sistemas de clasificación .....</b>	<b>51</b>
<b>2.7. Metodologías existentes para la caracterización de obras subterráneas .....</b>	<b>55</b>
<b>2.8. Métodos constructivos para obras subterráneas .....</b>	<b>57</b>
2.8.1. Métodos no mecanizados o semi-mecanizados.....	58
2.8.2. Métodos mecanizados .....	72
<b>2.9. Elementos para el sostenimiento en obras subterráneas .....</b>	<b>92</b>
2.9.1. Cerchas .....	93
2.9.2. Bulones.....	95
2.9.3. Hormigón proyectado.....	97
2.9.4. Paraguas de micropilotes .....	100
2.9.5. Jet Grouting .....	102
2.9.6. Inyecciones .....	104

2.9.7.	Galerías de drenaje/Drenes .....	107
2.9.8.	Dovelas .....	108
2.9.9.	Método Bernold .....	110
<b>2.10.</b>	<b>Relación entre tipología de túnel, método de excavación y partición de sección .....</b>	<b>112</b>
<b>2.11.</b>	<b>Innovación y tendencias en obras subterráneas .....</b>	<b>115</b>
<b>2.12.</b>	<b>Síntesis histórica y analítica de las obras subterráneas de desarrollo lineal... ..</b>	<b>117</b>
<b>3.</b>	<b><i>IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES</i> .....</b>	<b>120</b>
<b>3.1.</b>	<b>Justificación de la necesidad de la herramienta de decisión.....</b>	<b>120</b>
<b>3.2.</b>	<b>Limitaciones de los métodos actuales de caracterización y decisión .....</b>	<b>124</b>
<b>3.3.</b>	<b>Herramientas y modelos de apoyo a la decisión en ingeniería geotécnica y subterránea.....</b>	<b>130</b>
<b>3.4.</b>	<b>Identificación de carencias y oportunidades de mejora .....</b>	<b>132</b>
<b>3.5.</b>	<b>Brecha entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas .....</b>	<b>136</b>
<b>3.6.</b>	<b>Potencial de una herramienta sistemática de soluciones constructivas.....</b>	<b>139</b>
<b>3.7.</b>	<b>Aplicación de la herramienta en fases de proyecto y estudios de licitación ..</b>	<b>141</b>
<b>3.8.</b>	<b>Objetivos específicos derivados de la necesidad detectada.....</b>	<b>142</b>
<b>4.</b>	<b><i>METODOLOGÍA PROPUESTA</i> .....</b>	<b>144</b>
<b>4.1.</b>	<b>Planteamiento general de la herramienta.....</b>	<b>144</b>
<b>4.2.</b>	<b>Selección de parámetros de entrada .....</b>	<b>147</b>
4.2.1.	Parámetros geomecánicos del macizo rocoso .....	148
4.2.2.	Parámetros geomecánicos de los suelos.....	149
4.2.3.	Parámetros geométricos del proyecto .....	152
4.2.4.	Nivel de información disponible y grado de incertidumbre .....	152
<b>4.3.</b>	<b>Criterios de clasificación del terreno .....</b>	<b>153</b>
<b>4.4.</b>	<b>Correlación entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas .....</b>	<b>156</b>

4.4.1.	Principios generales de correlación y traducción técnica.....	158
4.4.2.	Estado intermedio de caracterización y coherencia del modelo .....	160
<b>4.5.</b>	<b>Definición de variables de salida de la herramienta: .....</b>	<b>161</b>
4.5.1.	Partición de la sección longitudinal .....	163
4.5.2.	Métodos constructivos sugerido .....	163
4.5.3.	Longitud de pase o avance recomendado.....	163
4.5.4.	Sistema de sostenimiento .....	163
4.5.5.	Indicadores técnicos y económicos preliminares.....	164
<b>4.6.</b>	<b>Estructura lógica de la herramienta .....</b>	<b>164</b>
4.6.1.	Lógica condicional y umbrales de decisión.....	165
4.6.2.	Integración entre criterios geomecánicos y constructivos.....	166
<b>4.7.</b>	<b>Validación teórica y ajuste de la metodología.....</b>	<b>168</b>
<b>5.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....</b>	<b>170</b>
<b>5.1.</b>	<b>Diseño estructural del algoritmo o matriz de decisión.....</b>	<b>170</b>
<b>5.2.</b>	<b>Desarrollo en entorno digital.....</b>	<b>173</b>
<b>5.3.</b>	<b>Formalización de reglas de decisión, criterios técnicos y control de incertidumbre.....</b>	<b>183</b>
<b>5.4.</b>	<b>Limitaciones y consideraciones prácticas.....</b>	<b>192</b>
<b>5.5.</b>	<b>Conclusiones de la metodología implantada para el desarrollo de la herramienta de predimensionamiento y estudio de obras de desarrollo lineal subterráneas .....</b>	<b>199</b>
<b>6.</b>	<b>APLICACIÓN PRÁCTICA.....</b>	<b>201</b>
<b>6.1.</b>	<b>Descripción de los casos de estudio .....</b>	<b>202</b>
<b>6.2.</b>	<b>Aplicación paso a paso de la herramienta .....</b>	<b>204</b>
6.2.1.	Datos de partida geológicos, geotécnicos y geométricos de la traza .....	204
6.2.2.	Particiones de sección obtenidas de la traza .....	208
6.2.3.	Clasificaciones geomecánicas de macizo rocoso y suelos .....	209
6.2.4.	Resumen y comparativa de las clasificaciones por tramo .....	213
6.2.5.	Reglas técnicas y solución constructiva .....	215
6.2.6.	Análisis económico de las partidas de obras subterráneas de desarrollo lineal.....	222
6.2.7.	Exposición de resultados.....	224

6.3.	Discusión de resultados .....	225
6.4.	Conclusiones del caso de estudio .....	228
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>231</b>
7.1.	Conclusiones generales .....	231
7.2.	Validación de los objetivos.....	233
7.3.	Limitaciones del estudio.....	233
7.4.	Posibles desarrollos y aplicaciones futuras .....	235
7.5.	Conclusiones generales del trabajo.....	237
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>239</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>256</b>
9.1.	PORTADA INSTITUCIONAL Y PORTADA DE CONTROL.....	257
9.2.	DATOS DEL TRAZADO INICIALES OBTENIDOS DEL PROYECTO.....	258
9.3.	DATOS OBTENIDOS DE LA HOJA DE PARTICIÓN DE SECCIÓN .....	260
9.4.	CÁLCULO DE CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS.....	262
9.4.1.	CÁLCULO DE CLASIFICACIÓN RMR .....	262
9.4.2.	CÁLCULO DE LA CLASIFICACIÓN Q-BARTON .....	269
9.4.3.	CÁLCULO DE CLASIFICACIÓN GSI HOEK Y MARINOS .....	273
9.4.4.	CÁLCULO DE LA CLASIFICACIÓN DE ROMANA.....	275
9.5.	RESUMEN DE CLASIFICACIONES, REGLAS TÉCNICAS, MATRIZ DE COMPATIBILIDAD Y SOLUCIONES OBTENIDAS.....	278
9.5.1.	RESUMEN DE LAS CLASIFICACIONES .....	278
9.5.2.	REGLAS TÉCNICAS .....	281
9.5.3.	MATRIZ DE COMPATIBILIDAD .....	285
9.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	290
9.7.	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.....	293

## FIGURAS

Figura 1. Qanat: esquema general de funcionamiento. Fuente: World History Encyclopedia (2022)	9
Figura 2. Escudo de Brunel para perforación en terrenos blandos. Fuente: Rosas, Juan José. GeoJuanjo. (s.f)	10
Figura 3. Grutas de Longmen. Fuente: The China Guide. (s.f)	10
Figura 4. Ciudad subterránea de Derinkuyu. Fuente: National Geographic Historia. (2024)	12
Figura 5. Túnel de San Gotardo. Fuente: National Geographic Historia. (2022)	13
Figura 6. Representación artística del Metro de Londres. Fuente: Gómez, Toni. Fuente: Xataka. (2024)	14
Figura 7. Tuneladora S-880. Fuente: Xataka. (2023)	15
Figura 8. Técnica de construcción y hundimiento del túnel. Fuente: Seequent. (2023)	16
Figura 9. Representación matricial del tensor de tensiones y su elipsoide asociado en un punto del macizo virgen. Fuente: Perucho (2009)	18
Figura 10. Esquema de distribución de tensiones y formación de planos principales entorno de una excavación circular. Fuente: Ortuño (2009)	19
Figura 11. Esquema de la redistribución de tensiones y formación de planos principales en el entorno de una excavación circular. Fuente: Simic (2009)	20
Figura 12. Línea característica del túnel e interacción del terreno-sostenimiento indicando el punto de equilibrio mecánico. Fuente: Simic (2009)	20
Figura 13. Límites granulométricos y campos de aplicación para escudos EPB. Fuente: Mendaña (2012)	23
Figura 14. Clasificación del macizo rocoso según Lauffer (1958). Fuente: González Díez y Martínez Cedrún (s.f)	27
Figura 15. Procedimiento de medida y cálculo de RQD. Fuente: Pérez Acebo et al. (2016)	28
Figura 16. Curva granulométrica de un suelo, representado en un papel <<log-normal>>. Fuente: Yepes (2016)	48
Figura 17. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: Modificado de Craig y Knappett (2012)	50
Figura 18. Procedimiento constructivo Nuevo Método Austriaco a sección completa. Fuente: Carlos Barba Ávila (2024)	60
Figura 19. Procedimiento constructivo del Nuevo Método Austriaco a media sección. Fuente: Carlos Barba Ávila (2024)	61
Figura 20. Fases del método Cut and Cover Arriba Bottom-Up, abajo Top-Down. Fuente: Works in Progress. (2024)	63

Figura 21. Proceso constructivo del método Cut and Cover. Fuente: Works in Progress (2024) .....	64
Figura 22. Proceso constructivo del Método Clásico Madrid o Método Belga. Fuente: Jordá Bordehore (2020). .....	66
Figura 23. Fases del proceso constructivo del método inglés. Fuente: Yepes (2016) .....	68
Figura 24. Fases del proceso constructivo del método alemán. Fuente: Melis Maynar (2000).....	70
Figura 25. Fases del ciclo de perforación y voladura. Fuente: Yepes (2023) .....	74
Figura 26. Costes según la longitud de túnel excavado. Fuente: Yepes (2023) .....	76
Figura 27. Funcionamiento de la rozadora. Fuente: Pérez Álvarez (s.f.).....	77
Figura 28. Proceso constructivo de un túnel mediante rozadora. Fuente: Elaboración propia. ....	78
Figura 29. Partes de una tuneladora (TBM Gripper). Fuente: Wang (2023) .....	81
Figura 30. Tuneladora de escudo simple. Fuente: ITA (s.f.) .....	82
Figura 31. Frente de ataque de una tuneladora de doble escudo. Fuente: Yepes (2015) .....	83
Figura 32. Partes de una EPB. Fuente: Fu et al. (2022) .....	85
Figura 33. Esquema de la Slurry Shield TBM y componentes de presión. Fuente: Zili LI, et al. (2015) .....	88
Figura 34. Campo de aplicación de los escudos. Fuente: Mendaña y Martínez (2011) .....	91
Figura 35. Proceso constructivo de las cerchas. Fuente: Elaboración propia .....	94
Figura 36. Proceso de bulonado de hastial y bóveda del túnel. Fuente: Elaboración propia. ....	96
Figura 37. Proceso constructivo del hormigón proyectado. Fuente: Elaboración propia. ....	99
Figura 38. Proceso constructivo del paraguas de micropilotes. Fuente: OSEBE S.A. (s.f.). ....	101
Figura 39. Procedimiento básico del jet-grouting. Fuente: Yepes (2019).....	103
Figura 40. Ejecución de una pantalla con la técnica de jet-grouting. Fuente: Yepes (2019) .....	103
Figura 41. Esquema básico de inyecciones en obras subterráneas de desarrollo lineal. Fuente: Keller (s.f.).....	106
Figura 42. Partes de un anillo de dovelas como sostenimiento de túneles. Fuente: Goeneweg (2007) .....	109
Figura 43. Sección constructiva del método Bernold. Fuente: Yepes (2016) .....	111
Figura 44. Factores de decisión para la selección del método constructivo. Fuente: Bahadur (2003) .....	113
Figura 45. Esquema general de desarrollo de un proyecto de obra subterránea de desarrollo lineal. Fuente: Elaboración propia .....	120
Figura 46. Nivel de información e impacto de las decisiones a lo largo del desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	120

Figura 47. Esquema general de desarrollo de oferta para la administración pública. Fuente: Elaboración propia .....	122
Figura 48. Comparativa entre situación actual y escenario apoyado por la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	124
Figura 49. Esquema conceptual comparativo de la situación actual y el enfoque integrado. Fuente: Elaboración propia .....	126
Figura 50. Esquema del proceso de toma de decisiones en fase de licitación. Fuente: Elaboración propia .....	134
Figura 51. Proceso actual de toma de decisiones y representación de la brecha existente. Fuente: Elaboración propia .....	137
Figura 52. Esquema conceptual del funcionamiento de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	145
Figura 53. Posicionamiento de la herramienta dentro del ciclo de vida del proyecto completo. Fuente: Elaboración propia .....	147
Figura 54. Esquema conceptual del terreno por tramos, soluciones constructivas, sostenimientos y trabajos auxiliares. Fuente: Elaboración propia .....	156
Figura 55. Esquema conceptual de la estrategia de decisión de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	165
Figura 56. Estructura lógica del funcionamiento de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	172
Figura 57. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque A. Fuente: Elaboración propia .....	175
Figura 58. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque B. Fuente: Elaboración propia .....	176
Figura 59. Representación de longitud de transición. Fuente: Elaboración propia .....	177
Figura 60. Representación de cambio de tipo de litología sin longitud de transición. Fuente: Elaboración propia .....	178
Figura 61. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque C. Fuente: Elaboración propia .....	179
Figura 62. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque D. Fuente: Elaboración propia .....	181
Figura 63. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque E. Fuente: Elaboración propia .....	182

Figura 61. Ejemplo de funcionamiento de la matriz de compatibilidad. Fuente: Elaboración propia  
..... 190

Figura 62. Ejemplo de reglas de descarte técnico aplicadas. Fuente: Elaboración propia..... 192

## TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la matriz rocosa según su resistencia a compresión simple. Fuente: Ferrer (2005) .....	22
Tabla 2. Valores para el coeficiente "f" de Protodyakonov. Fuente: Pérez Acebo et al. (2016) .....	25
Tabla 3. Clasificación de Terzaghi. Fuente: González Díez y Martínez Cedrún (s.f.) .....	26
Tabla 4. Rango de valores utilizados para la clasificación del RMR. Fuente: Elaboración propia. ...	30
Tabla 5. Criterios de valoración de la clasificación de Bieniawski. Fuente: Bieniawski (1989).....	31
Tabla 6. Recomendaciones de sostenimientos de Bienawski. Fuente: Romana (2005).....	33
Tabla 7. Valores de RQD para el cálculo de Q. Fuente: Yepes (s.f.).....	34
Tabla 8. Valores para el índice de diaclasado (Jn). (Yepes, s.f.) .....	35
Tabla 9. Valores para el índice de rugosidad (Jr). Fuente: Yepes (s.f.) .....	35
Tabla 10. Valores para el índice de alteración de las discontinuidades (Ja). Fuente: Yepes (s.f.).....	36
Tabla 11. Valores para el índice reductor por presencia de agua (Jw). Fuente: Yepes (s.f.).....	37
Tabla 12. Valores para el índice SRF. Fuente: Yepes (s.f.).....	38
Tabla 13. Clasificación de Q Barton. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 14. Recomendaciones de sostenimiento en base a la clasificación Q-Barton. Fuente: González de Vallejo et al. (2002).....	40
Tabla 15. Diagrama original de estimación del índice GSI en función de la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades. Fuente: Hoek & Marinos (2000).....	41
Tabla 16. Comparativa entre la clasificación RMR de Bieniawski y la clasificación de Romana. Fuente: Barba Ávila (2024). .....	44
Tabla 17. Recomendaciones de sostenimientos en base a la clasificación de Romana. Fuente: Romana (2000) .....	45
Tabla 18. Recomendaciones de métodos constructivos de la clasificación de Romana. Fuente: Romana (2001) .....	46
Tabla 19. Sistema unificado de Clasificación SUCS-ASTM D2487. Fuente: Elaboración propia .....	49
Tabla 20. Diferentes correlaciones entre la clasificación RMR de Bieniawski y la clasificación Q de Barton. Fuente: Fernández-Gutiérrez et al. (2017) .....	52
Tabla 21. Resumen de métodos constructivos tradicionales. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 22. Resumen de métodos constructivos mecanizados. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 23. Factores que influyen en la toma de decisiones en las distintas fases de proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	121

Tabla 24. Comparativa entre fase de proyecto y licitación en obras subterráneas. Fuente: Elaboración propia .....	123
Tabla 25. Comparativa entre herramientas actuales basadas en el diseño y las necesidades reales. Fuente: Elaboración propia .....	129
Tabla 26. Tipología de herramientas existentes y su grado de adecuación a las distintas fases de proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	131
Tabla 27. Relación entre carencias identificadas, consecuencias y oportunidades de mejora asociadas. Fuente: Elaboración propia.....	136
Tabla 28. Ejemplos conceptuales de diferencias entre clasificaciones y soluciones constructivas. Fuente: Elaboración propia .....	138
Tabla 29. Evolución del uso de la herramienta en las diferentes fases del proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	140
Tabla 30. Relación entre la fase de proyecto y el objetivo principal de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	143
Tabla 31. Relación entre nivel de información disponible, grado de incertidumbre y amplitud de respuestas. Fuente: Elaboración propia .....	146
Tabla 32. Síntesis de los parámetros de entrada y su influencia. Fuente: Elaboración propia .....	148
Tabla 33. Parámetros geotécnicos principales considerados. Fuente: Elaboración propia.....	151
Tabla 34. Enfoque de clasificación según el tipo de terreno: Roca, suelo, zonas de transición. Fuente: Elaboración propia .....	155
Tabla 35. Relación entre las variables de salida y su aplicación en fase de proyecto y licitación. Fuente: Elaboración propia .....	162
Tabla 36. Hojas e información del BLOQUE A. Fuente: Elaboración propia .....	175
Tabla 37. Hojas e información del BLOQUE B. Fuente: Elaboración propia .....	178
Tabla 38. Hojas e información del BLOQUE B. Fuente: Elaboración propia .....	180
Tabla 39. Hojas e información del BLOQUE D. Fuente: Elaboración propia .....	182
Tabla 40. Hojas e información del BLOQUE E. Fuente: Elaboración propia .....	182
Tabla 41. Hojas e información del BLOQUE F. Fuente: Elaboración propia .....	183
Tabla 42. Ejemplos de control de datos. Fuente: Elaboración propia .....	186
Tabla 43. Ejemplos de funcionamiento de criterios para la Q-Barton. Fuente: Elaboración propia .....	187
Tabla 44. Ejemplos de funcionamiento de criterios de rango para GSI. Fuente: Elaboración propia .....	187

Tabla 45. Valores de Índice de Trazabilidad. Fuente: Elaboración propia .....	188
Tabla 46. Comparativa entre material geológico de proyecto y utilizado la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	206
Tabla 47. Criterios de interpretación de los parámetros geomecánicos del proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	207
Tabla 48. Datos geométricos del trazado. Fuente: Elaboración propia .....	207
Tabla 49. Parámetros utilizados en la herramienta para la definición de los criterios de decisión. Fuente: Elaboración propia .....	208
Tabla 50. Datos de la partición de sección de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	209
Tabla 51. Comparativa de los resultados de las clasificaciones geomecánicas frente a la de proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	212
Tabla 52. Clases calculadas con la herramienta de predimensionamiento. Fuente: Elaboración propia .....	214
Tabla 53. Resultados obtenidos de la herramienta. Fuente: Elaboración propia .....	217
Tabla 54. Soluciones constructivas proyectadas. Fuente: Elaboración propia .....	218



## ECUACIONES

Ecuación 1. Estimación del RQD en caso de no existir sondeos. Fuente: Ramírez (2012) .....	22
Ecuación 2. Relación entre presión y deformación radial en el ensayo diatométrico. Fuente: Simic (2009). .....	23
Ecuación 3. Ecuación para la clasificación de Q-Barton. Fuente: Jiménez (2009).....	34
Ecuación 4. Ecuación para cálculo del coeficiente de uniformidad. Fuente: Charles Ruiz (2003) ...	47
Ecuación 5. Ecuación para el cálculo de coeficiente de curvatura. Fuente: Charles Ruiz (2003) .....	47
Ecuación 6. Cálculo del Índice de Plasticidad. Fuente: Charles Ruiz (2003).....	48
Ecuación 7. Ecuación de la pendiente de la "Línea A". Fuente: Craig y Knappett (2012) .....	50
Ecuación 8.Fórmula para el cálculo del Índice de Grupo (GI). Fuente: ASSHTO (2021) .....	50
Ecuación 9. Relación entre el índice RMR y el Q de Barton. Fuente: Fernández-Gutiérrez et al. (2017) .....	51
Ecuación 10. Relación entre RMR de Bieniawski y el GSI. Fuente: Hoek y Brown (1997).....	52
Ecuación 11. Relación entre solución constructiva y variables de decisión. Fuente: Elaboración propia .....	138
Ecuación 12. Ecuación para la longitud de tramo mixto entre suelo y roca. Fuente: Elaboración propia .....	184
Ecuación 13. Ecuación para el cálculo del Índice de Completitud. Fuente: Elaboración propia ....	188
Ecuación 14. Fórmula para el cálculo del Índice de Validez-Confianza. Fuente: Elaboración propia .....	188
Ecuación 15. Fórmula para el cálculo del $\Delta$ RMR. Fuente: Elaboración propia.....	188
Ecuación 16.Fórmulas para el cálculo del RMR mínimo y máximo. Fuente: Elaboración propia...	188



## ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado (ES)	Significado (EN)
CPT	Ensayo de penetración del cono	Cone Penetration Test
FE/FEM	Métodos de elementos finitos	Finite Element Method
FLAC	Software geotécnico	Fast Langrangian Analysis of Continua
GEO 5	Software geotécnico	Geological Software
GSI	Índice de resistencia geológica	
IoT		Internet of Things
ISO	Organización Internacional de Normalización	International Organization of Standardization
NATM	Nuevo Método Austriaco de Túneles	New Austrian Tunneling Method
Q	Sistema Q de Barton	Q-System
RME	Rock Mass Excavability	Rock Mass Excavability
RMR	Clasificación del macizo rocoso según Bieniawski	Rock Mass Rating
RQD	Índice de calidad de roca	Rock Quality Designation
SEM	Método Secuencial de Excavación	Sequential Excavation Method
s.f.	Sin fecha (Referencias)	No date
SMR	Slope Mass Rating	Slope Mass Rating
TBM	Tuneladora	Tunnel Boring Machine
UCS	Resistencia a compresión uniaxial	Uniaxial Compressive Strength
UNE	Norma Española	Spanish Standard
VOD	Ventilación a demanda	Ventilation on Demand



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Contexto

En una sociedad que avanza hacia la peatonalización y la revegetación de las grandes urbes, se está llevando a cabo un crecimiento de las obras subterráneas que buscan hacer desaparecer los ruidos ocultándolos bajo tierra. Además del avance de las nuevas tecnologías, que dan lugar a grandes infraestructuras subterráneas cada vez de mayor envergadura, las ciudades tratan de soterrar las calzadas existentes junto a la ampliación de redes ferroviarias, para mejorar las condiciones del entorno urbano en beneficio de los ciudadanos.

En la ciudad de Madrid se están desarrollando actualmente actuaciones de gran relevancia en materia de infraestructuras subterráneas vinculadas a la movilidad urbana. Entre ellas destaca el soterramiento de la A-5, cuyas obras se iniciaron en octubre de 2024, así como el proyecto asociado al nuevo Parque Castellana, que incluye el soterramiento del Paseo de la Castellana entre las calles Sinesio Delgado y el Nudo Norte de la M-30, iniciado en julio de 2025.

Ambas intervenciones constituyen ejemplos significativos de una tendencia creciente hacia la reorganización del tráfico urbano, trasladando parte de la circulación de vehículos privados al subsuelo y liberando espacio en superficie para usos urbanos y ambientales.

El incremento demográfico y las necesidades de suelo urbanizable para otro tipo de usos obliga a la utilización del subsuelo para moverse. Básicamente se trata de la ejecución de obras de una longitud muy superior a su diámetro que permiten conectar dos puntos de una manera lo más directa posible, con una entrada y salida principal, junto a varios puntos intermedios para comunicar con vías importantes o zonas de la ciudad que pueden verse beneficiadas de esta conexión.

Pese al auge que presentan en la actualidad las obras subterráneas, su ejecución no constituye un fenómeno reciente, sino que acompaña al ser humano desde sus orígenes. Ya las primeras comunidades humanas aprovecharon las cuevas naturales como refugio frente a las inclemencias meteorológicas y como espacios de protección.

Posteriormente, a lo largo de la historia, el uso del subsuelo se fue sofisticando mediante la construcción de pasadizos y galerías que conectaban distintos puntos de fortificaciones y castillos medievales, con fines defensivos y estratégicos, así como mediante el desarrollo de explotaciones mineras, destinadas a la obtención de recursos naturales.

Estos ejemplos ponen de manifiesto que la utilización del subsuelo ha sido una constante histórica, evolucionando progresivamente desde soluciones rudimentarias hasta las complejas infraestructuras subterráneas actuales.

Las primeras manifestaciones vinculadas a la excavación de túneles se remontan a las antiguas civilizaciones egipcia y romana, que emplearon galerías subterráneas para satisfacer necesidades de abastecimiento de agua, drenaje y defensa. Estas obras consistían, por lo general, en pasadizos estrechos y de dimensiones reducidas, ejecutados con medios manuales y adaptados a las limitaciones técnicas de la época.

El verdadero auge de las obras de desarrollo lineal subterráneas se produjo, no obstante, a partir del siglo XIX, coincidiendo con el desarrollo del ferrocarril y el impulso de la minería, en el contexto de la Revolución Industrial. Este periodo marcó un punto de inflexión en la construcción de túneles, al aumentar de forma significativa sus dimensiones, longitud y complejidad, y al consolidarse como infraestructuras clave para el transporte de mercancías y personas, sentando las bases de la ingeniería subterránea moderna.

### ***1.2. Problemática actual en la caracterización de obras subterráneas***

La caracterización del terreno en obras subterráneas constituye una de las fases más críticas y, al mismo tiempo, una de las más complejas dentro del proceso de diseño y planificación de túneles u otras obras de carácter subterráneo. Aunque la ingeniería y la geotecnia han experimentado grandes avances en los últimos años, la práctica profesional sigue enfrentándose a fases donde la experiencia del equipo y la falta de datos fiables, principalmente en fases iniciales, suelen afectar de manera directa a la toma de decisiones.

Una de las primeras dificultades viene de la limitada disponibilidad de información geotécnica en las etapas iniciales de los proyectos. En los estudios preliminares de los proyectos, en España, los datos suelen venir de campañas de sondeos realizadas con anterioridad para otros proyectos, datos geotécnicos de las páginas webs de las provincias o comunidades autónomas correspondientes, que no siempre son representativos del terreno real, requiriendo verificaciones posteriores. Esto obliga a trabajar con parámetros inciertos, que pueden condicionar de forma significativa las primeras decisiones.

La existencia de diferentes métodos de clasificación geomecánica, como el RMR, Q-System, ICE u otros que puedan ser de utilidad, ofrecen referencias de gran importancia y son la base sobre la que se sustentan estos proyectos, pero emplean parámetros distintos, enfoques variados que pueden

dar recomendaciones dispares. Aunque muchos de ellos parten de un mismo método o tienen relación directa, no existen mecanismos que permitan integrar o cruzar estas clasificaciones, lo que complica la obtención de una visión conjunta del comportamiento del terreno en base a las clasificaciones geomecánicas, añadiendo un grado de subjetividad al análisis, lo que lleva a la siguiente problemática, el criterio del ingeniero.

Estas obras requieren de una elevada experiencia y dependen del criterio del experto. Aunque la experiencia profesional es fundamental en cualquier ámbito, la falta de herramientas que apoyen la decisión preliminar hace que dos técnicos puedan llegar a planteamientos muy diferentes a partir del mismo conjunto de datos. Esta variabilidad, unida a la presión por reducir plazos de entrega y mejorar la calidad técnica de proyectos y estudios, evidencia una necesidad de procedimientos sistematizados que apoyen en estas fases iniciales de proyecto y fases de estudio.

### **1.3. Objetivos del trabajo**

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta que permita un dimensionamiento inicial de obras subterráneas de carácter lineal, tomando como base para los resultados las clasificaciones geomecánicas existentes. Su propósito es asistir en el predimensionamiento y estudio preliminar de este tipo de infraestructuras, integrando la información geotécnica disponible en cada fase de proyecto, con criterios constructivos contrastados y metodologías consolidadas a lo largo de los años en la ingeniería.

La herramienta está concebida para ofrecer, a partir de los parámetros característicos del terreno y los datos básicos del proyecto, una orientación preliminar que permita el apoyo a la hora de determinar el método constructivo, sistemas de sostenimiento, longitudes de avance y secciones tipo más apropiados para cada partición de sección. Estas propuestas se fundamentarán siempre en las clasificaciones geomecánicas seleccionadas, proporcionando un abanico de soluciones compatibles con las diferentes hipótesis contempladas.

La herramienta tiene dos usos fundamentales. En primer lugar, se plantea como un apoyo técnico para el predimensionamiento en fases iniciales del proyecto, facilitando la labor de los ingenieros y profesionales que deben tomar las primeras decisiones con un nivel de información limitada (sondeos existentes, mapas geotécnicos públicos, etc.). La herramienta permitirá concentrar y estructurar los datos disponibles, planteando una serie de alternativas viables y descartando aquellas que, conforme a los datos existentes, no resulten adecuadas.

El carácter dinámico de la herramienta permitirá que, a medida que disponga de mayor información – procedente de sondeos, ensayos o información del modelo geológico – las propuestas se adapten y ajusten, apoyando a los técnicos a identificar las opciones que podían no haber considerado inicialmente.

En segundo lugar, la herramienta ofrece un valor añadido para los departamentos de estudios de las empresas constructoras en las licitaciones públicas, donde los proyectos, anexos y pliegos suelen incluir información geotécnica parcial o incompleta. Introduciendo los datos conocidos del proyecto, la herramienta puede generar una serie de propuestas preliminares coherentes y justificadas, que pueden coincidir con la solución proyectada por la Administración, facilitando así la redacción de memorias técnicas, al permitir la elaboración de propuestas alternativas en fase de estudio de la obra en cuestión. Esta capacidad contribuye a la reducción de plazos de análisis, mejorar la consistencia técnica de las soluciones planteadas y optimizar las propuestas planteadas.

De forma complementaria, permitirá una valoración económica aproximada de las distintas soluciones planteadas para los precios de mercado del momento. A partir de parámetros conocidos del proyecto como la longitud del túnel, velocidades de avance, particiones de sección, tipos de sostenimiento o rendimientos asociados a las diferentes maquinarias a emplear en cada proceso constructivo, podrá estimarse de manera preliminar la magnitud de recursos necesarios – m<sup>3</sup> de excavación, días de operación de maquinaria, kilos de acero, m<sup>3</sup> de hormigón, número de bombas, número de camiones por ciclo, etc. -. Utilizando los costes de referencia disponibles por la empresa o suministrados por empresas subcontratistas y proveedores habituales, estas estimaciones pueden convertirse en comparativos económicos preliminares que resulten útiles para la presentación de ofertas técnico-económicas.

Conviene destacar que esta herramienta no pretende ser una solución ni verdad absoluta sobre la que basar el estudio de las obras subterráneas de desarrollo lineal. Los resultados obtenidos siempre deben interpretarse como una orientación inicial, basada en datos conocidos, siendo imprescindible aplicar el criterio técnico y la experiencia del responsable del proyecto para seleccionar la alternativa óptima.

Factores como la maquinaria disponible, los recursos técnicos y económicos, plazos contractuales, accesibilidad al frente, entorno urbano, servicios enterrados y restricciones medioambientales condicionan de forma determinante la elección final del método constructivo. Así, no tendría sentido plantear el empleo de una tuneladora para un túnel de corta longitud, del mismo modo que no sería viable recurrir a métodos manuales para túneles de gran desarrollo en roca.

En este sentido, la herramienta se desarrolla como soporte a la decisión técnica, permitiendo a los técnicos disponer de una base objetiva, ordenada y sistematizada desde la que fundamentar sus planteamientos iniciales, contribuyendo a mejorar la rapidez y coherencia en el proceso de diseño, dado que permite visualizar de manera inmediata las alternativas disponibles, facilitando la toma de decisiones.

#### ***1.4. Metodología de trabajo***

La metodología adoptada para el desarrollo del presente estudio se estructura en varias fases consecutivas y complementarias que garantizan un análisis del comportamiento del terreno, estudian los sistemas de clasificación geomecánica y de los parámetros constructivos implicados en la ejecución de las obras subterráneas de desarrollo lineal en mina.

La primera fase se trata de una revisión del estado del arte relativo al comportamiento de los diferentes terrenos frente a las obras subterráneas, recopilando información procedente de manuales técnicos, normas internacionales y diferentes publicaciones, además de experiencias documentadas en obras reales. De esta forma se permitirá identificar cuáles son los parámetros que tienen una mayor importancia en la estabilidad de los túneles, tales como la resistencia del macizo rocoso, presencia de discontinuidades, permeabilidad, presencia de agua subterránea, o la montera.

La segunda fase de la metodología se centrará en el análisis de los principales sistemas de clasificación geomecánica existentes. Se estudiarán en detalle los sistemas más utilizados y ampliamente aceptados por la comunidad científica internacional, así como aquellos sistemas que pueden ser complementarios o especializados y que aporten una información adicional al estudio, que permitan disponer de una caracterización más precisa del terreno.

Para cada una de estas clasificaciones se identificarán las variables de entrada requeridas y las correlaciones que cada sistema establece entre sus condiciones geomecánicas y las recomendaciones de cada método constructivo en cuanto a los sostenimientos, secciones tipo y longitudes de avance previstas.

Además de las clasificaciones necesarias para la caracterización del terreno, se introducirán los métodos constructivos que se utilizan en este tipo de obras, ya sean mecanizados y semi-mecanizados, los empleados en terrenos blandos o roca y los sostenimientos que estos procesos necesitan para el avance lineal de la obra.

Todo este segundo apartado será la base documental sobre la que se basará el correcto funcionamiento de la herramienta que se va a llevar a cabo.

La tercera fase se dedicará a la definición precisa de los datos de entrada que deberán ser introducidos por el usuario para poder generar los resultados. En esta fase se deben incluir datos clave de la obra, entre la que se encuentran la longitud total del trazado, el tipo de obras de desarrollo lineal, la geometría prevista, estratificación del terreno, la posición y característica de los sondeos disponibles, estratos que cruzará el túnel, la presencia de fallas, nivel freático y cualquier otra afección geotécnica o hidrogeológica que pueda condicionar de forma significativa el avance de la obra.

Dado que se trata de una herramienta de uso en fases preliminares del proyecto, es previsible que algunos de los parámetros anteriormente mencionados no estén disponibles en los primeros momentos de análisis. En estos casos, la herramienta deberá permitir trabajar con la información existente, y, a medida que se obtengan nuevos datos o se afinen los valores estimados, estos pueden incorporarse de manera progresiva. De esta manera, la precisión de los resultados aumentará conforme avance la campaña de reconocimientos o se disponga de información más detallada.

La cuarta fase estará orientada al diseño del proceso lógico de análisis de la herramienta, es decir, la estructura interna que permitirá transformar los datos introducidos en propuestas constructivas razonadas. En esta etapa se establecerán los algoritmos o reglas lógicas que, para cada sistema de clasificación, permitan obtener la zonificación del trazado —la partición en tramos homogéneos desde un punto de vista geotécnico— y asignar para cada uno de ellos el método constructivo más adecuado, la sección tipo, la longitud de avance y el sostenimiento recomendado.

La quinta fase se centrará en la generación estructurada de resultados. La herramienta deberá presentar, de manera ordenada y comparativa, los tramos identificados, los métodos constructivos propuestos para cada clasificación, las secciones tipo asociadas, las longitudes de avance compatibles y los sostenimientos recomendados. Esto permitirá al usuario comprender cómo los parámetros del terreno influyen en las soluciones propuestas y comparar las diferencias entre clasificaciones geomecánicas.

### ***1.5. Estructura del documento***

El presente documento se ha estructurado en siete apartados, de forma que se permite desarrollar de manera progresiva y coherente los contenidos para darle continuidad al trabajo y permitir la comprensión de esta herramienta que se plantea.

Comienza con una introducción general en la que se presenta el contexto del estudio, los objetivos y la metodología propuesta para llevar a cabo el trabajo. El segundo apartado constituye el marco teórico del trabajo, que recoge el estado del arte de las obras de desarrollo lineal subterráneas. En este se estudia la información más relevante que puede utilizarse para la ejecución de un proyecto de estas características, parámetros más importantes, clasificaciones más extendidas y metodologías existentes para la caracterización del terreno.

Continúa el proyecto con la identificación de la necesidad y la oportunidad de desarrollar la herramienta. En este apartado se analizan las carencias actuales en fases preliminares de diseño y toma de decisiones, la dispersión metodológica existente y la conveniencia de disponer de un recurso sistematizado, que permita estructurar el proceso inicial.

Se llega a la mitad del documento con la descripción de la metodología propuesta para el funcionamiento de la herramienta. Aquí se detallan los parámetros de entrada necesarios, la información mínima requerida y el esquema de toma de decisiones basado en las clasificaciones escogidas. Asimismo, se explican las variables de salida que la herramienta debe generar y la lógica interna que permite pasar de los datos del terreno a las recomendaciones preliminares de método constructivo, secciones tipo, sostenimientos y longitudes de avance.

El quinto apartado se dedica al desarrollo digital de la herramienta. En él se describe el entorno de programación utilizado, la estructura lógica implementada, las reglas de decisión, la jerarquización de los criterios técnicos y la forma en que el sistema procesa la información. Asimismo, se pone de manifiesto que tanto el tiempo de introducción de datos como el tiempo de cálculo son reducidos, lo que permite su utilización ágil en fases preliminares de proyecto y en estudios técnicos para licitación. Este capítulo incluye ejemplos elaborados tanto con datos reales como con datos simulados que permiten comprobar el funcionamiento práctico de la herramienta. También se analizan la consistencia interna del modelo, su robustez frente a variaciones en los parámetros de entrada y las principales limitaciones detectadas durante su implementación.

El sexto apartado presenta un caso de estudio diseñado para ilustrar la aplicación real de la herramienta. A partir de una obra subterránea representativa, se muestra el proceso completo de introducción de datos, análisis y obtención de resultados. Posteriormente, se comparan estas propuestas preliminares con experiencias reales de obras ejecutadas en entornos similares, lo que permite evaluar la validez, coherencia y aplicabilidad de la herramienta desarrollada.

Finalmente, el séptimo apartado recoge las conclusiones finales del trabajo, las limitaciones identificadas a lo largo del proceso y las posibles líneas de mejora y desarrollo futuro. En este capítulo se reflexiona sobre la utilidad de la herramienta, su alcance y su potencial evolución como recurso de apoyo para ingenieros y proyectistas en el ámbito de la ingeniería subterránea.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Evolución histórica de las obras subterráneas

Según el diccionario de la lengua española (RAE,2024) se define túnel como vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas o vehículos o instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos y sirve para diferentes fines.

Etimológicamente, hacia el siglo XII, la denotación de tona se había extendido en francés antiguo a los toneles de vino, adoptando primero la forma tonel y, más tarde, la moderna *tonneau*. Hacia el siglo XV, tonel cruzó el canal de la Mancha y desembarcó en Inglaterra, donde adoptó la forma tunnel, pero con un significado algo diferente: se llamó así a una red tubular utilizada para cazar pájaros. El moderno sentido de ‘pasaje subterráneo’ sólo lo adquirió en el siglo XVIII, cuando también se creó en inglés el verbo to tunnel ‘construir un túnel o escapar por un túnel’.

La palabra túnel ingresa en la lengua española con su significado actual en la primera mitad del siglo XIX, aunque no se registra en el Diccionario académico hasta la edición de 1884 (Elcastellano.org, s.f.).

En la actualidad nos encontramos que “los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o metros, para uso peatonal” (Juncà Ubierna, 2011), pero “los primeros túneles u obras subterráneas vienen de “los “qanats”, persas y asirios, para transportar agua a través de zonas de elevada evaporación, mediante un sistema de pozos y galerías cortas de unos 40-50 metros de longitud” (Oteo Mazo, 2017). Estos “qanats” se trataban de túneles que comunicaban con manantiales para dotar de agua a las ciudades que se encontraban por debajo del nivel. De esta forma, “conducían el agua a la ciudadela de forma oculta para evitar que el enemigo la envenene o desvíe” (Juncà Ubierna, 2011)

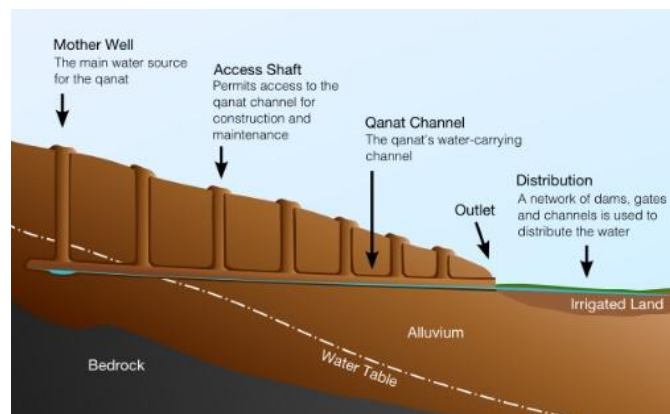


Figura 1. Qanat: esquema general de funcionamiento. Fuente: World History Encyclopedia (2022)

El primer túnel para el tránsito peatonal fue el que “mandara construir Semiramis bajo el Éufrates para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2.200 a.C” (Juncà Ubierna, 2011), aunque no se puede considerar del todo como túnel, dado que se realizó a cielo abierto, desviando el río Éufrates.

Tuvieron que transcurrir “cuatro mil años después de aquel de Babilonia, obra de los Brunel padre e hijo quienes tras veinte años de lucha denodada y arrojó lograron dominar las furiosas aguas del Támesis” (Juncà Ubierna, 2011), siendo este el primer túnel que se realizó en suelos blandos, utilizándose por primera vez un escudo para su excavación.

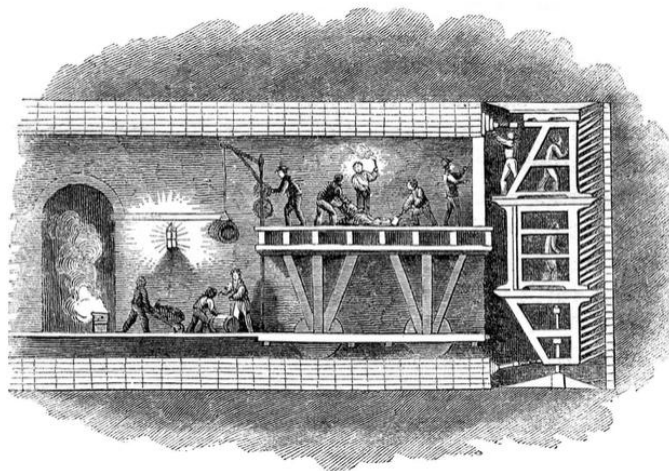


Figura 2. Escudo de Brunel para perforación en terrenos blandos. Fuente: Rosas, Juan José. GeoJuanjo. (s.f)

Entre estos dos túneles, un sinfín de civilizaciones han utilizado las construcciones subterráneas por diferentes motivos. De sobra conocidas son las galerías que los egipcios realizaban en las pirámides para enterrar a sus faraones, al igual que en la India y China, estas primeras obras subterráneas en las laderas de las montañas se trataban de templos budistas e hinduistas, representando en las paredes escenas de las vidas de los dioses y sus discípulos.



Figura 3. Grutas de Longmen. Fuente: The China Guide. (s.f)

Ya en la antigua Grecia, “uno de los principales hitos de la historia de los túneles merece especial referencia al de Samos, de un kilómetro de longitud y el primero del que se tiene noticia del ingeniero que los construyó, Eupalinos de Megara” (Juncà Ubierna, 2011)

Se llevó a cabo bajo el mandato de Polícrates, entorno al S.V a.C. “sirviendo de apoyo para la construcción del acueducto de la ciudad, como vía de escape en caso de asedio y para el suministro de agua fresca” (Historia Civil, 2014)

Se trata del primer túnel que utilizó tecnología de orientación, permitiendo realizar la excavación desde los dos frentes, encontrándose en el centro de este. De 1040 metros de longitud y sección cuadrada de 1,75 metros de lado, “Eupalino supo corregir las desviaciones del trazado logrando el encuentro en el punto medio con una desviación lateral de 6m y vertical de 60 centímetros” (Historia Civil, 2014) algo que demuestra la gran precisión con la que se realizó para la época.

Otra de las grandes civilizaciones de la historia, el Imperio Romano, amplió los usos que tenían las obras subterráneas. Además de los ya mencionados para el abastecimiento, éstos comenzaron a utilizar galerías subterráneas para el drenaje de las ciudades, propósitos militares y catacumbas que excavaron los cristianos.

Como gran obra se encuentra el emisario del Fucino, “que pese a ser considerado por Plinio el trabajo de las obras públicas más importante de todos los tiempos, constituyó un brillante fracaso de la ingeniería romana, estableciendo a la vez el punto máximo y los límites del arte de los túneles en época del Imperio” (Juncà Ubierna, 2011)

En la Edad Media, las obras subterráneas pasaron a ser prácticamente inexistentes, quedando reducidas a meros pasadizos y galerías en los castillos y fortalezas, sin embargo, “surge al filo del Renacimiento la obra maestra de la minería de Georgius Agricola, publicada en el siglo XVI” (Juncà Ubierna, 2011).

En este libro, además de las experiencias y conocimientos de los maestros constructores de la época en el ámbito de la minería, se incluyen conocimientos sobre los “qanats” mencionados con anterioridad.

Mientras eso ocurría en Europa, en la actual Turquía se asistía a guerras religiosas que dieron lugar a ciudades subterráneas como Derinkuyu, en el siglo IV a.C., “en cuyos ocho pisos bajo tierra se estima que pudieron vivir de forma autónoma unos diez mil habitantes” (Juncà Ubierna, 2011)



*Figura 4. Ciudad subterránea de Derinkuyu. Fuente: National Geographic Historia. (2024)*

A medida que avanzan las civilizaciones y la tecnología, las obras subterráneas ganan presencia, también en la mente de los grandes pensadores, como Leonardo da Vinci, que “piensa en la posibilidad de perforar túneles allá donde los canales se encuentran con la barrera montañosa” (Juncà Ubierna, 2011). Dado que estas siempre han sido una barrera difícil de superar, dejando los habitantes de ambos lados de los valles incomunicados durante largos periodos de tiempo, incluso manteniendo costumbres e idiomas totalmente diferentes.

Mientras que en el S.XVIII se emplea la pólvora por primera vez para realizar una excavación, no es hasta el S.XIX, con el auge de los ferrocarriles, la aparición de las primeras locomotoras de vapor y la revolución industrial, “se agolpan grandes hazañas en una denodada lucha del hombre por dominar el arte de perforar la tierra” (Juncà Ubierna, 2011) que comienza a utilizar la tecnología existente frente a la fuerza bruta.

En este momento de la historia se construyen:

- Túnel de Terre-Noir, con 1.476 metros de longitud. (Francia, 1827)
- Ferrocarril de Liverpool a Manchester, con dos túneles de 4,8 kilómetros y 1,6 kilómetros respectivamente. (Londres, 1832)
- Construcción de los grandes túneles alpinos; Mont Cenís entre 1857 y 1871 (12,6 kilómetros), San Gotardo entre 1871 y 1880 (15,8 kilómetros) y Simplón entre 1898 y 1906 (19,7 kilómetros)

Estos últimos son la triada que trató de cruzar los Alpes, y que en ninguno de los tres casos vieron sus obras finalizadas. Cabe destacar a Louis Favre, que su obra – San Gotardo – le costó la ruina, debido a las altas penalizaciones en las que incurrió, y posteriormente la vida y la de muchos de sus

trabajadores por las condiciones laborales y sanitarias en las que incurrieron para poder llevar a cabo el túnel.

Este se inauguró el 1 de junio de 1882, una década después de su inicio y con un retraso de dos años, y tres años después del fallecimiento de su creador, tras un infarto en una de las inspecciones del túnel en 1879.



*Figura 5. Túnel de San Gotardo. Fuente: National Geographic Historia. (2022)*

Al otro lado del Atlántico, en Estados Unidos también había comenzado la fiebre de los túneles, con la inauguración en 1869 y 1871 de dos túneles bajo el Río Chicago, que fueron los primeros en transportar vehículos traccionados por cable. También en Norteamérica se marcó un hito a nivel de avance tecnológico de la época, siendo el túnel de Hoosac el primero en el que se utilizó nitroglicerina para llevar a cabo la voladura de la roca.

El crecimiento de las ciudades hace que las obras subterráneas entren en una nueva dimensión, con el nacimiento del ferrocarril Metropolitano de Londres en 1863. A partir de ahí” el metro pasa a ser el transporte público urbano más rápido, seguro y eficaz, generando el urbanismo subterráneo en muchas ciudades” (Juncà Ubierna, 2011).



Figura 6. Representación artística del Metro de Londres. Fuente: Gómez, Toni. Fuente: Xataka. (2024)

A partir de ese momento, las grandes urbes mundiales comenzaron a diseñar sus líneas de metro o ferrocarriles urbanos. Entre los más representativos nos encontramos con el Metro de Nueva York, Moscú, Estocolmo, Madrid, etc. Siendo espacios que comunican los puntos más importantes de las ciudades, dotando a este medio de transporte de una cualidad muy importante en la actualidad: la puntualidad.

Si las locomotoras y el auge de los ferrocarriles fueron importantes para las obras subterráneas de desarrollo lineal, la democratización de los automóviles impulsó los túneles carreteros. A medida que se iban utilizando una mayor cantidad de coches, los túneles para este vehículo crecieron, tanto los que se ejecutaban en las ciudades, como, sobre todo, los interurbanos.

“Tras la Segunda Guerra Mundial, de nuevo los Alpes se ven perforados por largos túneles por los que circulan con intensidad turismo y camiones” (Juncà Ubierna, 2011)

Pero las obras subterráneas no sólo han sido necesarias para la movilidad de los ciudadanos, existen galerías de servicios como el abastecimiento y saneamiento que, sin tener el *glamour* de los anteriores, son igual de importantes para el desarrollo de las ciudades. A lo largo de la historia se ha observado que “la falta de estas infraestructuras esenciales fueron causantes en la Edad Media de pestes y epidemias que diezmaron los burgos y poblaciones” (Juncà Ubierna, 2011)

Tras realizar un breve repaso a la historia de las obras subterráneas, cabe destacar que el aumento progresivo de este tipo de obras viene dado principalmente por la mejora de las herramientas tecnológicas que han permitido sustituir el uso de la fuerza bruta del ser humano por las herramientas mecánicas, además de los avances tecnológicos y la especialización de empresas en este tipo de obras.

Un ejemplo representativo de este avance es la conexión Tuen Mun–Chek Lap Kok, en Hong Kong, inaugurada en 2020. Con más de 4,2 kilómetros de longitud, una profundidad cercana a los 60 metros bajo el mar y tres carriles por sentido en su entrada norte. Este túnel exigió un diámetro de excavación de 17,6 metros, un récord mundial en excavación mediante tuneladora. Tal y como recoge Prego (2023), “el túnel acoge tres carriles de tráfico en la entrada norte, lo que requiere un diámetro externo de 17,6 metros, un récord para una tuneladora”. Para hacer posible esta infraestructura se diseñó una máquina específica acorde a su magnitud: la Mixshield S-880, conocida como “*Qin Liangyu*”, con un diámetro de 17,63 metros, una longitud de 120 metros y un peso aproximado de 4.850 toneladas. Según Herrenknecht AG (2021), se trata de “una tuneladora Mixshield con un diámetro de escudo de 17,63 metros, diseñada específicamente para condiciones mixtas de excavación”.



*Figura 7. Tuneladora S-880. Fuente: Xataka. (2023)*

Este tipo de proyectos ilustra el notable desarrollo de la ingeniería, donde la excavación mecanizada de grandes diámetros, la automatización de procesos y el control del frente de excavación mediante sistemas avanzados permite superar cada vez retos geotécnicos de gran complejidad. La tendencia internacional apunta hacia obras cada vez más extensas, profundas y exigentes, como demuestra el túnel de base del Brennero entre Italia y Austria, que con una longitud total prevista de 64 kilómetros se convertirá en uno de los túneles ferroviarios más largos del mundo. En su documentación oficial, (BBTSE, 2022) destaca que se trata de “uno de los proyectos de infraestructura subterránea más ambiciosos de Europa, combinando excavación mecanizada y métodos convencionales en un entorno alpino de alta complejidad”.

Igualmente, destacable es el proyecto Fehmarnbelt, entre Dinamarca y Alemania, que se convertirá en el túnel sumergido más largo del mundo construido mediante elementos prefabricados. Según FEHMARN A/S (2022), “el enlace fijo del Fehmarnbelt contará con 18 kilómetros de túneles prefabricados sumergidos, constituyendo la estructura de este tipo más larga jamás construida”. Esto refleja el creciente interés por soluciones industrializadas y diseños mixtos en entornos marinos complejos.



Figura 8. Técnica de construcción y hundimiento del túnel. Fuente: Seequent. (2023)

En el ámbito urbano, proyectos como el Grand Paris Express, con más de 200 kilómetros de túneles excavados mediante numerosas tuneladoras operando simultáneamente, evidencian el papel estratégico del subsuelo para afrontar los retos de movilidad y sostenibilidad de las grandes metrópolis. Asimismo, túneles como el Gotthard en Suiza, inaugurado en 2016, continúan siendo un referente internacional. El informe técnico de EPFL (2018) señala que “el Gotthard Base Tunnel, con 57 kilómetros de longitud y más de 2.300 metros de cobertura, representa el túnel ferroviario más largo y profundo del mundo”.

El futuro de las obras subterráneas se perfila ligado a diversas líneas de innovación tecnológica. Entre ellas destacan el desarrollo de tuneladoras híbridas capaces de adaptarse a variaciones geológicas sin interrupciones prolongadas, la integración de sistemas de control digital avanzado y gemelos digitales (*digital twins*), la explotación sistemática de sensores distribuidos y técnicas de predicción de comportamiento, así como la automatización progresiva del proceso de excavación. En esta línea, *The Boring Company* (2021) indica que su concepto TBM 2.0 aspira a “eliminar los ciclos de parada entre fases de avance y revestimiento, logrando tuneladoras de funcionamiento casi continuo”.

Por otro lado, las crecientes demandas asociadas a la transición energética y la digitalización están impulsando nuevas tipologías de túneles para el transporte de cables de energía, hidrógeno, redes de telecomunicaciones o infraestructuras logísticas subterráneas. El subsuelo se consolida, así como un recurso estratégico para liberar superficie urbana, mejorar la resiliencia climática y optimizar los corredores multimodales de transporte.

En conjunto, la evolución reciente y las perspectivas de futuro de la ingeniería subterránea demuestran cómo la combinación de tecnología avanzada, maquinaria especializada y digitalización del proceso constructivo ha permitido afrontar proyectos de una escala sin precedentes. Este progreso exige, de manera paralela, herramientas de análisis y predimensionamiento —como la desarrollada en este Trabajo Fin de Máster— capaces de integrar criterios geotécnicos y constructivos en fases tempranas de diseño.

## ***2.2. Comportamiento del terreno frente a excavaciones subterráneas***

Hasta el momento se ha tratado de la evolución histórica de las obras subterráneas de desarrollo lineal y la tipología de estas. Ahora se conocerá cómo se comporta el terreno frente a la ejecución de estas, entendiendo que este comportamiento constituye uno de los pilares fundamentales a la hora del diseño, planificación y ejecución de las obras subterráneas de desarrollo lineal.

La respuesta del terreno ante una modificación del estado tensional existente puede variar significativamente en función de si nos encontramos en suelos o macizos rocosos, debido a sus estructuras internas, resistencias y sensibilidad a los cambios tensionales. Es imperativo comprender que “toda la historia geológica influye en el túnel” (Jiménez, 2009), ya que la génesis de la roca, los procesos tectónicos y la evolución geomorfológica definen la calidad de la matriz y la red de discontinuidades que gobernarán su respuesta mecánica.

Antes de la excavación, el terreno – sea roca o suelo – se encuentra en equilibrio bajo un estado tensional natural, o inicial previo al comienzo de la excavación, que se ha generado a lo largo de los años por el peso de los estratos superiores y esfuerzos tectónicos. Este estado se define matemáticamente mediante un “tensor de tensiones que representa las fuerzas en las tres direcciones del espacio, el cual puede visualizarse como un elipsoide de tensiones cuyas componentes principales son  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ” (Perucho, 2009).

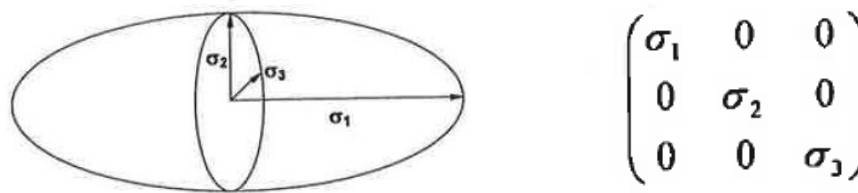


Figura 9. Representación matricial del tensor de tensiones y su elipsoide asociado en un punto del macizo virgen. Fuente: Perucho (2009)

En este equilibrio original, el parámetro más crítico es el coeficiente de empuje en reposo ( $K_0$ ), que define la relación entre la tensión horizontal y la vertical. “Mientras que en suelos la tensión vertical depende mayoritariamente del peso de las tierras ( $\sigma_v = \gamma \cdot z$ ), en macizos rocosos las tensiones horizontales pueden ser excepcionalmente altas debido a la memoria tectónica del material” (Ortuño, 2009). Es fundamental destacar que “en cualquier punto del terreno existe un determinado estado tensional inicial, producto de su historia geológica” y que este constituye el punto de partida para cualquier análisis de estabilidad” (Ortuño, 2009).

El inicio de la excavación altera el estado tensional existente, generando una redistribución de esfuerzos alrededor de la cavidad que provoca deformaciones progresivas en el entorno próximo. Al retirar el soporte natural que ofrecía el terreno extraído, la superficie de la excavación se transforma, pues “la superficie del túnel se convierte en un plano principal de tensiones donde la tensión normal es nula” (Ortuño, 2009). Este fenómeno de redistribución tensional depende fundamentalmente del tipo de terreno que encontramos. En rocas, la distribución suele estar más localizada, con formación de arcos de descarga y tensiones elevadas en la bóveda que el macizo, si es competente, puede llegar a autoportar. En macizos fracturados, este cambio puede favorecer la “caída o deslizamiento gravitacional de bloques o cuñas formadas por planos de diaclasas” (Simic, 2009).

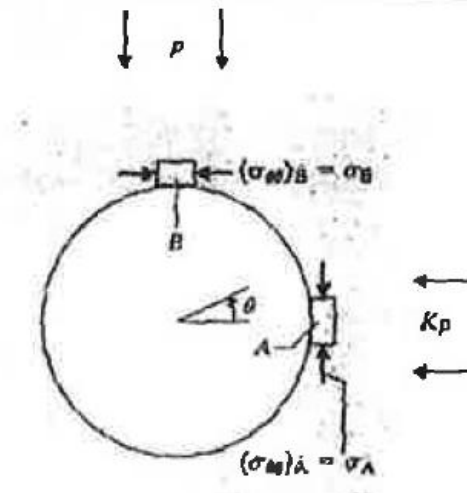


Figura 10. Esquema de distribución de tensiones y formación de planos principales entorno de una excavación circular.  
Fuente: Ortuño (2009)

Por el contrario, en suelos, la alteración de las tensiones suele generar un impacto mayor, pudiendo afectar a grandes volúmenes de terreno, incluso a estructuras que se encuentran en la superficie. “La descompresión tensional en suelos rígidos o rocas blandas puede provocar una pérdida de cohesión y un aumento de la deformabilidad, lo que a menudo invalida supuestos como los del Nuevo Método Austriaco (NATM), ya que la relajación excesiva degrada la capacidad portante del material” (Oteo, 2006). En estos entornos, el movimiento físico del terreno hacia el hueco, denominado convergencia, es más acusado. Técnicamente, la convergencia se define como el “movimiento de cierre de la cavidad del túnel debida a la relajación de tensiones” (Simic, 2009). “Este proceso comienza de forma radial antes de que el frente alcance la sección de medida y continúa evolucionando en el tiempo” (Oteo, s.f.).

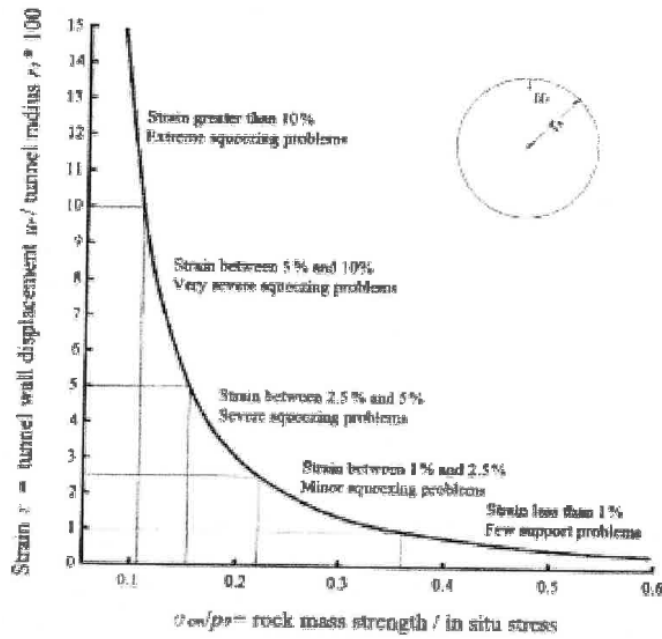


Figura 11. Esquema de la redistribución de tensiones y formación de planos principales en el entorno de una excavación circular. Fuente: Simic (2009)

Cuando el estado tensional redistribuido supera la resistencia del macizo, se inicia un proceso de plastificación. En rocas bajo grandes profundidades o muy débiles, esto deriva en la fluencia o *squeezing*, comportamiento definido como “inestable caracterizado por deformaciones crecientes en el tiempo” (Simic, 2009). Para predimensionar la estabilidad y el sostenimiento en esta fase, se recurre a las clasificaciones geomecánicas como el RMR de Bieniawski, que permite estimar el “tiempo de mantenimiento estable y la longitud libre para túneles” (Romana, 2005), o el sistema Q de Barton, “que evalúa el estado tensional mediante el factor SRF” (Romana, 2005). El objetivo final del diseño “es alcanzar un equilibrio entre la curva de presión del terreno y la reacción del sostenimiento, concepto recogido en las curvas características de la cavidad” (Simic, 2009).

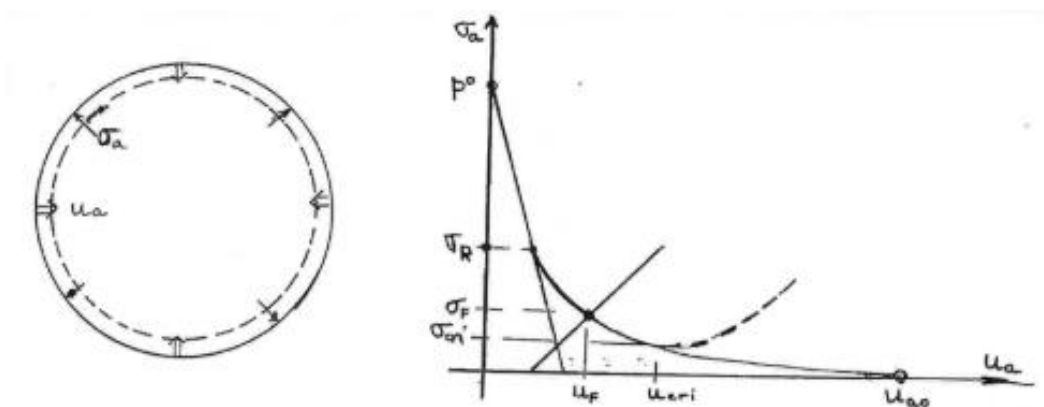


Figura 12. Línea característica del túnel e interacción del terreno-sostenimiento indicando el punto de equilibrio mecánico. Fuente: Simic (2009)

En excavaciones urbanas, el estado final del terreno se manifiesta en superficie a través de la cubeta de subsidencia. La experiencia en terrenos como los de Madrid indica que “el volumen de asientos ( $V_s$ ) suele oscilar entre el 0,70 y 0,75 de la reducción de sección de la cavidad” (Oteo, s.f.). El proceso concluye con la consolidación del sistema terreno-estructura, la cual debe ser “validada mediante una auscultación geotécnica sistemática que incluya extensómetros, células de presión y pernos de convergencia para asegurar que los movimientos se estabilizan y que las tensiones finales son admisibles” (Oteo, s.f.; Reig, 2009). Como reflexión final, se debe tener presente que “el diseño de un túnel supone, inevitablemente, asumir incertidumbres, y esa asunción no debe olvidarse nunca” (Serrano, 2009).

### **2.3. Parámetros geotécnicos y geomecánicos relevantes**

La caracterización técnica del terreno supone el pilar fundamental para el diseño y la ejecución de cualquier obra subterránea. Esta necesidad nace una realidad empírica de la ingeniería civil, “la geología más que ningún otro factor determina el grafo de dificultad y el coste de una excavación subterránea” (Jiménez, 2009). Por lo tanto, el objetivo prioritario del equipo redactor del proyecto debe ser la elaboración de un modelo geomecánico del terreno donde se llevará a cabo la obra que reduzca la incertidumbre existente a la mínima expresión, cuantificando las propiedades del medio.

Este proceso analítico varía significativamente dependiendo del terreno donde se encuentre la excavación, sea un suelo o un macizo rocoso, requiriendo en el primer caso de estudio el análisis de la granulometría, cohesión y estado de consolidación, y el segundo, un enfoque centrado en la matriz y las discontinuidades.

En el ámbito de los macizos rocosos, el primer parámetro de estudio debe ser la matriz rocosa, entendida como “*material rocoso exento de discontinuidades, los bloques de roca que quedan entre ellas*” (Ferrer, 2005). Su propiedad más representativa es la Resistencia a la Compresión Simple (RCS), la cual permite una clasificación cualitativa del material – desde roca muy blanda a extremadamente dura – que es vital para estimar la excavabilidad.

<b>Resistencia a compresión simple (MPa)</b>	<b>Descripción</b>
< 1	
1 – 5	Muy blanda
5 – 25	Blanda
25 - 50	Moderadamente dura
50 - 100	Dura

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
100 – 250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

Tabla 1. Clasificación de la matriz rocosa según su resistencia a compresión simple. Fuente: Ferrer (2005)

Dado que la resistencia del macizo se ve reducida por la presencia de juntas, se recurre a parámetros globales, como el RD (Rock Quality Designation), el cual “representa el grado de fracturación del macizo, y se calcula como el porcentaje de fragmentos de testigo superiores a 10 cm recuperados en un sondeo” (Jiménez, 2009). Cuando no se dispone de sondeos, el RQD puede estimarse mediante la relación volumétrica de juntas ( $J_v$ ), a través de la ecuación:

$$RQD \approx 115 - 3,3 \times J_v$$

Ecuación 1. Estimación del RQD en caso de no existir sondeos. Fuente: Ramírez (2012)

Donde:

- $J_v$  es el número de juntas por  $m^3$ .

Más allá de la fracturación general, el comportamiento mecánico del macizo está gobernado por las propiedades de sus discontinuidades. Parámetros como el espaciado, la persistencia y la orientación son críticos, especialmente esta última, ya que “en los túneles, las discontinuidades con dirección paralela a su eje y con buzamientos elevados son las más desfavorables” (Ferrer, 2005). Asimismo, la resistencia al corte de estas juntas depende de la rugosidad (índice JRC) y de la resistencia de sus paredes (índice JCS). La presencia de rellenos, especialmente arcillosos, es un factor de riesgo mayor, dado que el agua puede reblandecerlos, reduciendo la fricción y provocando inestabilidades imprevistas.

Cuando el proyecto se desarrolla en suelos o terrenos degradados, el enfoque de los parámetros cambia. En estos materiales, la granulometría es el factor que dicta la selección de la maquinaria de excavación. “El análisis de los husos granulométricos es esencial para determinar si un terreno es apto para ser excavado mediante escudos de presión de tierras (EPB), donde se requiere un contenido mínimo de finos para formar un tapón plástico en el tornillo de extracción” (Mendaña, 2012).

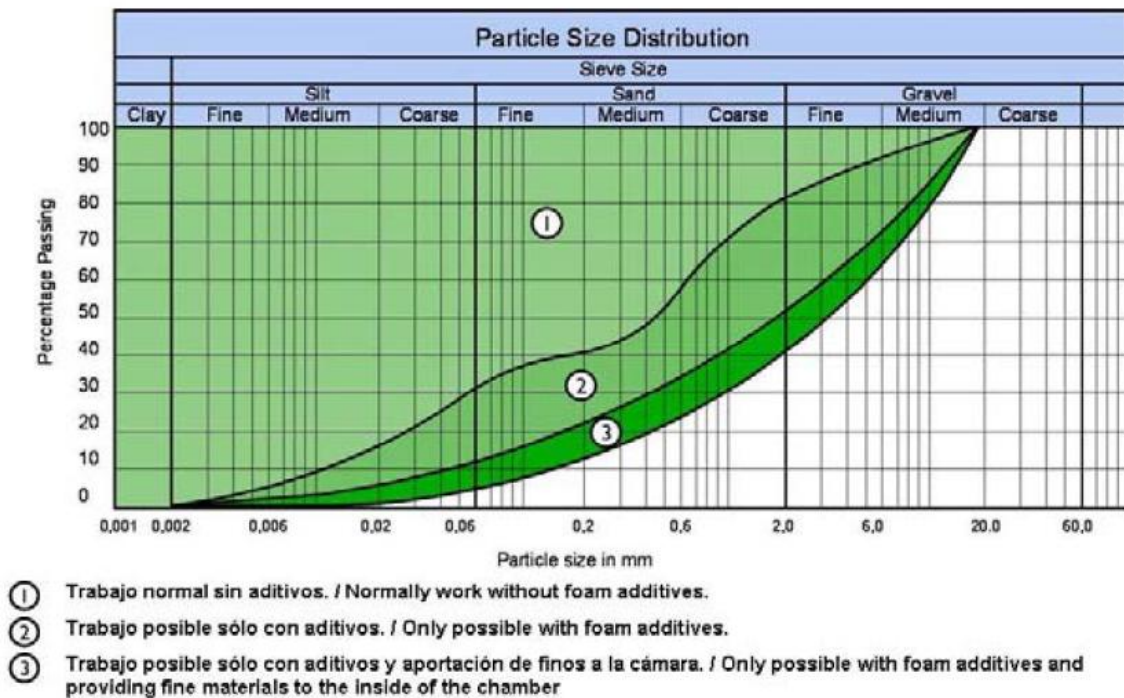


Figura 13. Límites granulométricos y campos de aplicación para escudos EPB. Fuente: Mendaña (2012)

En cuanto a las propiedades resistentes de los suelos, los parámetros fundamentales son la cohesión ( $\zeta$ ) y el ángulo de rozamiento interno ( $\Phi$ ). “En suelos urbanos sobreconsolidados, como los de la cuenca de Madrid, se ha observado que la variación de estos parámetros tiene una influencia decisiva en la estabilidad del frente y en los asentamientos en superficie” (Oteo, 1999). Es importante notar que el suelo “es más rígido (menos deformable) cuanto mayor es su nivel de tensiones” (Ortuño, 2009), lo que obliga a considerar la profundidad y el estado tensional inicial para definir el módulo de deformación ( $E$ ).

La deformabilidad, tanto en suelos como en macizos rocosos, es quizás el parámetro más difícil de determinar con precisión. Aunque se puede obtener en laboratorio, el “efecto escala” hace que estos valores suelen ser demasiado optimistas. Por ello, se prefiere el uso de ensayos *in situ* como el dilatómetro o el presiómetro, que permiten medir la respuesta real del terreno ante un incremento de presión. En un ensayo dilatométrico, la deformación radial ( $\rho_r$ ) se relaciona con el módulo del terreno mediante la siguiente expresión:

$$\rho_r = (1 + \nu) \times \frac{\rho}{E} \times \alpha$$

Ecuación 2. Relación entre presión y deformación radial en el ensayo dilatométrico. Fuente: Simic (2009).

Siendo:

- $\alpha$ : Radio de la cavidad.
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson.

Finalmente, todos estos parámetros se integran en las clasificaciones geomecánicas como el RMR de Bieniawski o el sistema Q de Barton para el predimensionamiento del sostenimiento. *“Mientras que el RMR se centra en la descripción geométrica y resistente del macizo, el sistema Q introduce factores ambientales y tensionales mediante el SRF (Stress Reduction Factor), que evalúa desde la presencia de zonas de falla hasta riesgos de fluencia o estallido de roca bajo altas presiones”* (ROMANA, 2005). La presencia de agua también actúa como un parámetro penalizador, ya que su presión reduce la resistencia efectiva del terreno. En conclusión, la integración coherente de estos parámetros permite al ingeniero definir un diseño que sea *“razonable desde el punto de vista económico y suficientemente seguro”* (RAMÍREZ, 2012), minimizando el impacto de las incertidumbres geológicas.

#### **2.4. Principales sistemas de clasificación geomecánica en macizos rocosos**

A lo largo de la historia de la ingeniería de túneles y excavaciones subterráneas se han desarrollado numerosos sistemas de clasificación geomecánica, con el objetivo de describir de forma simplificada el comportamiento de los macizos rocosos y facilitar la toma de decisiones en condiciones de información. Estos parten y utilizan en muchas ocasiones los parámetros mencionados anteriormente.

Estas clasificaciones surgen como respuesta a la complejidad inherente de los macizos rocosos, cuya respuesta mecánica depende no solo de la resistencia de la roca intacta, sino también de su estructura, grado de fracturación y condiciones hidrogeológicas.

Las primeras aproximaciones a la clasificación aparecen asociadas a la observación empírica del comportamiento de las excavaciones. Entre ellas destaca la clasificación de Protodyakonov, cuya *“clasificación fue usada en los países del Este de Europa, a principios del siglo XX. Se basa en clasificar los terrenos asignándoles un parámetro “f” llamado coeficiente de resistencia, a partir del cual se definen las cargas que actúan sobre el revestimiento y la anchura del túnel (B)”*. (Pérez Acebo et al., 2016)

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>	<b><i>f</i></b>
Excepcional	Cuarcita, basaltos y rocas de resistencia excepcional	20
Alta resistencia	Granito, areniscas silíceas y calizas muy competentes	15-10
Resistencia media	Caliza, granito algo alterado y areniscas	8-6
	Areniscas medias y pizarras	5
	Lutitas, areniscas flojas y conglomerados fiables	4
	Lutitas y esquistos, margas compactas	3
Resistencia baja	Calizas y lutitas blandas, margas, areniscas fiables, gravas y bolos cementados, morrenas	2
	Terrazas, lutitas fresadas y rotas, gravas compactas y arcillas preconsolidadas	15
Resistencia muy baja	Arcillas y gravas arcillosas	1
	Suelos vegetales y arenas húmedas	0,6
	Arenas y gravas finas, derrubios	0,5
	Limos, fangos, etc.	0,3

Tabla 2. Valores para el coeficiente "*f*" de Protodyakonov. Fuente: Pérez Acebo et al. (2016)

De forma similar, en 1946 Terzaghi propuso una clasificación con su propio nombre. “Este sistema constituye la base para el desarrollo de los tres esquemas de clasificación de masas rocosas más comunes, Q, RMR y GSI. El sistema clasifica el terreno en nueve categorías y proporciona la “*carga de roca*” o tensión vertical que soportarían las cerchas de sostenimiento por procedimientos tradicionales” (Pérez Acebo et al., 2016)

Rock Class	Definition	Rock Load Factor $H_p$ (in feet, B and $H_t$ in feet)	Remark
I. Hard and intact	Hard and intact rock contains no joints and fractures. After excavation, the rock may have popping and spalling at excavated face.	0	Light lining required only if spalling or popping occurs.
II. Hard stratified and schistose	Hard rock consists of thick strata and layers. The interface between strata is cemented. Popping and spalling at the excavated face is common.	0 to 0.5 B	Light support for protection against spalling. Load may change between layers.
III. Massive, moderately jointed	Massive rock contains widely spaced joints and fractures. Block size is large. Joints are interlocked. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0 to 0.25 B	Light support for protection against spalling.
IV. Moderately blocky and seamy	Rock contains moderately spaced joints. Rock is not chemically weathered and altered. Joints are not well interlocked and have small apertures. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0.25 B to 0.35 (B + $H_t$ )	No side pressure.
V. Very blocky and seamy	Rock is not chemically weathered and contains closely spaced joints. Joints have large apertures and appear separated. Vertical walls need support.	(0.35 to 1.1) (B + $H_t$ )	Little or no side pressure.
VI. Completely crushed but chemically intact	Rock is not chemically weathered and highly fractured with small fragments. The fragments are loose and not interlocked. Excavation face in this material needs considerable support.	1.1 (B + $H_t$ )	Considerable side pressure. Softening effects by water at tunnel base. Use circular ribs or support rib lower end.
VII. Squeezing rock at moderate depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Moderate depth is considered as 150 ~ 1000 m.	(1.1 to 2.1) (B + $H_t$ )	Heavy side pressure. Invert struts required. Circular ribs recommended.
VIII. Squeezing rock at great depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Great depth is considered as more than 1000 m.	(2.1 to 4.5) (B + $H_t$ )	
IX. Swelling rock	Rock volume expands (and advances into the tunnel) due to swelling of clay minerals in the rock at the presence of moisture.	up to 250 feet, irrespective of B and $H_t$	Circular ribs required. In extreme cases use yielding support.

Notes: The tunnel is assumed to be below the ground water table. For tunnel above water tunnel,  $H_p$  for Classes IV to VI reduces 50 %.

The tunnel is assumed excavated by blasting. For tunnel boring machine and road header excavated tunnel,  $H_p$  for Classes II to VI reduces 20 - 25 %.

Tabla 3. Clasificación de Terzaghi. Fuente: González Díez y Martínez Cedrún (s.f).

Unos años después apareció la clasificación de Lauffer (1958), que “basó su clasificación en los trabajos de la «Escuela Austriaca» que condujeron a la introducción del NATM. Introdujo el concepto de tiempo de estabilidad de la excavación para una luz o dimensión libre sin sostener” (Pérez Acebo et al., 2016). En este caso el sistema no basa su clasificación en datos geológicos y geotécnicos, sino en la respuesta del terreno. Por lo tanto, se necesita experiencia previa, “siendo

la clase A la que representa una roca muy buena y la clase G significa muy pobre” (González Díez y Martínez Cedrún (s.f)).

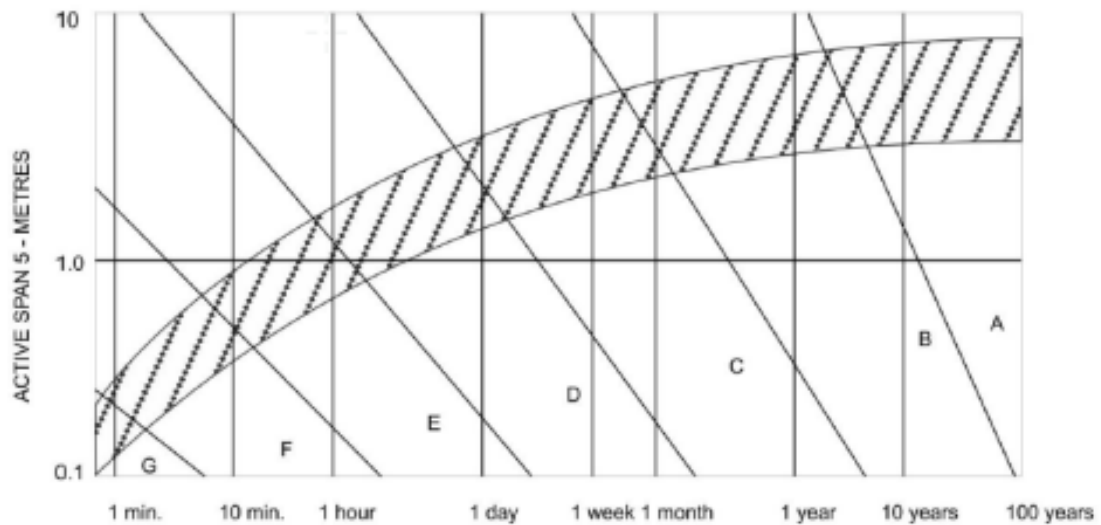


Figura 14. Clasificación del macizo rocoso según Lauffer (1958). Fuente: González Díez y Martínez Cedrún (s.f).

La siguiente clasificación que nos encontramos fue propuesta por Deere, conocida como la clasificación de Deere o más comúnmente R.Q.D. (*Rock Quality Designation*). “Esta se basa en la recuperación de un testigo y depende indirectamente del número de fracturas y del grado de alteración del macizo rocoso. Se cuentan solamente fragmentos iguales o superiores a 100 mm de longitud. El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 57,4 mm “(Pérez Acebo et al., 2016).

Hoy en día el índice RQD forma parte de otros sistemas de clasificación, dado que es insuficiente por sí mismo para describir el macizo rocoso, al no tener en cuenta otra serie de parámetros como la presencia de agua, presión, etc.

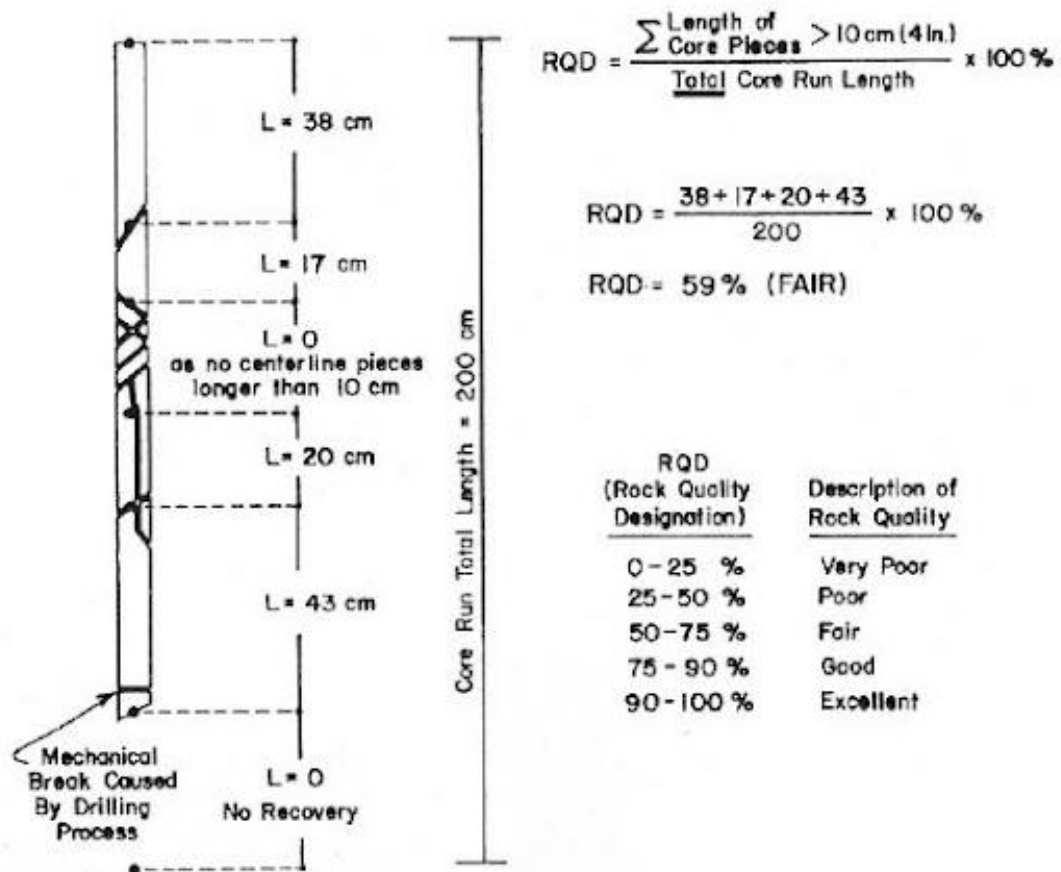


Figura 15. Procedimiento de medida y cálculo de RQD. Fuente: Pérez Acebo et al. (2016)

En las décadas siguientes surgieron sistemas más completos y sistemáticos, como la clasificación propuesta por Wickham et al. en 1972, que sentó las bases de los sistemas modernos al integrar los parámetros relacionados con la calidad del macizo, las discontinuidades y el entorno de excavación.

Los sistemas de clasificación que registrarán la herramienta y son los más utilizados en la actualidad son los que se explicarán a continuación:

1. RMR de Bieniawski
2. Clasificación de Barton (Q)
3. Clasificación de Hoek (GSI)
4. Romana

**2.4.1. RMR de Bieniawski 1989**

En el año 1973, Z.T. Bieniawski desarrolló el sistema de clasificación RMR (*Rock Mass Rating*), siendo este uno de los métodos de clasificación más difundidos y utilizados en ingeniería de túneles y

excavaciones. “Este ha sido modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles cavernas, taludes y cimentaciones” (Pérez Acebo et al., 2016).

El objetivo fundamental del sistema RMR es proporcionar una valoración global de la calidad del macizo rocoso, a partir de la combinación de parámetros geotécnicos fácilmente identificables en campo y laboratorio.

La clasificación RMR se basa en la premisa de que el comportamiento del macizo rocoso puede representarse de forma razonable mediante la evaluación conjunta de una serie de parámetros que reflejan su estructura, resistencia y condiciones ambientales. A diferencia de otros enfoques puramente analíticos, el RMR adopta una base empírica, apoyada en la experiencia acumulada en numerosas obras subterráneas y excavaciones en roca.

El sistema asigna a cada parámetro una puntuación parcial, de modo que la suma de todas ellas da lugar a un índice global denominado RMR, cuyo valor oscila entre 0 y 100.

“De este valor hay que restar un factor de ajuste, que es en función de la orientación de las discontinuidades, definido cualitativamente y que tiene valores distintos según se aplique a túneles, cimentaciones o taludes” (Romana Ruiz, 2005).

Este índice permite clasificar el macizo en diferentes categorías de calidad, asociadas a comportamientos esperables del terreno y a recomendaciones generales de sostenimiento.

De esta clasificación, se pueden obtener 3 datos:

- “El tiempo de estabilidad y la longitud libre para túneles (definidos según los conceptos del Nuevo Método Austriaco)” (Romana Ruiz, 2005)
- “Un intervalo de valores de la cohesión de la masa rocosa” (Romana Ruiz, 2005)
- “Un intervalo de valores del ángulo de rozamiento de la matriz rocosa” (Romana Ruiz, 2005)

“Se añadieron también a la clasificación recomendaciones para el sostenimiento de túneles según las cinco clases” (Romana Ruiz, 2005)

La clasificación RMR evalúa el macizo rocoso a partir de seis parámetros fundamentales, que se valoran de la siguiente manera:

Parámetro	Rango de valores (%)
Resistencia del macizo rocoso	0 – 15 %
RQD	3 – 20 %
Espaciado de las juntas	5 – 20 %
Estado de las juntas	0 – 30 %
Presencia de agua	0 – 15 %
RANGO DE RMR	8 – 100 %

Tabla 4. Rango de valores utilizados para la clasificación del RMR. Fuente: Elaboración propia.

- Resistencia a compresión simple del material: “Tiene una valoración máxima de 15 puntos, y puede utilizarse como criterio el resultado del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple o bien el Ensayo de Carga Puntual” (Pérez Acebo et al., 2016).

“En la práctica no se suelen encontrar rocas con resistencia a compresión simple superior a 100 MPa con lo que el valor real máximo es de 10” (Romana Ruiz, 2005)

- RQD: Se trata de un ensayo que se realiza en la actualidad y que mantiene el sistema de ejecución idéntico a la clasificación de Deere.
- Espaciamiento de las discontinuidades: “El parámetro considerado es la separación en metros entre juntas de la familia principal de diaclasas de la roca” (Pérez Acebo et al., 2016).
- Condición de las juntas: “Es el parámetro más importante, y el más valorado puesto que puede llegar a 30. Tiene en cuenta varios factores como la continuidad, rugosidad y grado de meteorización, apertura y existencia de rellenos. Puede estimarse de forma global o dividiéndolo en varios subparámetros con valoración parcial que se suma entre sí” (Romana Ruiz, 2005)
- Presencia de agua: Puede estimarse de tres formas distintas.
  - “A partir del flujo en las juntas! (Romana Ruiz, 2005)
  - “A partir de la filtración en 10 m de túnel” (Romana Ruiz, 2005)
  - “A partir de la relación de presiones intersticiales” (Romana Ruiz, 2005)

En la tabla que se muestra a continuación nos encontramos con los valores establecidos para cada uno de los parámetros:

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN									
1	Resistencia de la Matriz Rocosa	Ensayo de Carga Puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión Simple (MPa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
		Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100-90%	90-75%	75-50%	50-25%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2m	2-0.6m.	0.6-0.2m.	0.2-0.06m.	< 0.06m.		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Cerrada	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno suave <5mm	Relleno suave >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
	Puntuación	6	5	3	1	0			
5	Agua Freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min		
		Relación Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		
ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EN EL TÚNEL									
Dirección Perpendicular al eje del túnel				Dirección Paralela al eje del túnel			Cualquier Dirección Buzamiento 0°- 20°		
Excavación a favor del Buzamiento		Excavación en contra del buzamiento							
Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°				
Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable			
CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES									
Dirección y Buzamiento		Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable			
Puntuación	Túnel	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN EL RMR									
RMR	100-81		80-61	60-41	40-21	<20			
Clase	I		II	III	IV	V			
Calidad	Muy Buena		Buena	Media	Mala	Muy Mala			
Cohesión	> 4 Kp/cm <sup>2</sup>		3 - 4 Kp/cm <sup>2</sup>	2 - 3 Kp/cm <sup>2</sup>	1 - 2 Kp/cm <sup>2</sup>	< 1 Kp/cm <sup>2</sup>			
Ángulo de rozamiento	> 45°		35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°			
Tiempo de Autosoporte y longitud sin sostener	10 años		6 meses	1 semana	10 horas	30 minutos			
	15m.		8m.	5m.	2.5m.	1m.			

Tabla 5. Criterios de valoración de la clasificación de Bieniawski. Fuente: Bieniawski (1989)

Esta clasificación se ve corregida a partir de la orientación de las discontinuidades respecto al eje del túnel, que nos encontramos en la tabla superior. “Bieniawski ha definido este factor de ajuste a

partir de los trabajos de Wickham et al (1972) para establecer la clasificación geomecánica RSR, que fue la primera publicada después de la de Terzaghi (1946), pero que no ha alcanzado una aceptación generalizada y actualmente está en desuso”.

Estas clasificaciones recogen también una serie de recomendaciones para los sostenimientos. “Estas recomendaciones de sostenimiento son antiguas y es necesario matizarlas para tener en cuenta tanto el desarrollo de las técnicas de construcción como lo que podríamos llamar la “cultura” del mercado español de la construcción en este momento” (Romana Ruiz, 2005).

Según el propio autor, el propósito del sistema es proporcionar “una base cuantitativa para la selección de medidas de sostenimiento en excavaciones subterráneas” (Bieniawski, 1989). A partir de la puntuación RMR, el macizo se clasifica en cinco categorías (I a V), desde roca muy buena hasta roca muy mala, asociando a cada clase recomendaciones típicas para túneles de sección convencional (aproximadamente 10 m de luz).

Para macizos clasificados como Clase I (RMR 81–100), correspondientes a roca muy buena, Bieniawski indica que “generalmente no es necesario sostenimiento sistemático, pudiendo requerirse únicamente pernos ocasionales en bloques sueltos” (Bieniawski, 1989). En la Clase II (RMR 61–80), roca buena, “se recomiendan pernos sistemáticos de longitud moderada ( $\approx 3$  m) espaciados del orden de 2,5 m, junto con una capa ligera de hormigón proyectado en zonas puntuales” (Bieniawski, 1989).

En la Clase III (RMR 41–60), roca de calidad media, el sostenimiento se intensifica mediante “bulonado sistemático más denso ( $\approx 4$  m de longitud, espaciado 1,5–2 m) y hormigón proyectado de espesor intermedio en bóveda y hastiales. Bieniawski señala que en estas condiciones el sostenimiento debe instalarse tan pronto como sea posible tras la excavación” (Bieniawski, 1989), reduciendo el tiempo de exposición del macizo.

Para la Clase IV (RMR 21–40), roca mala, el autor propone “sostenimiento pesado, con bulones más largos y próximos entre sí, hormigón proyectado de mayor espesor (100–150 mm o superior) y, en muchos casos, la incorporación de cerchas metálicas” (Bieniawski, 1989). Finalmente, en la Clase V (RMR < 20), roca muy mala, “se recomienda sostenimiento muy pesado y cierre rápido del anillo resistente, pudiendo requerirse marcos de acero cerrados, espesores significativos de hormigón proyectado e incluso avances por fases o secciones parciales” (Bieniawski, 1989).

Es importante subrayar que Bieniawski advierte que estas recomendaciones deben interpretarse como “guías preliminares” y no como soluciones definitivas (Bieniawski, 1989). El propio autor

enfatisa que “el diseño final debe ajustarse a las condiciones específicas del proyecto, considerando factores como la orientación de las discontinuidades, la profundidad de la excavación y el método constructivo” (Bieniawski, 1989).

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

Tabla 6. Recomendaciones de sostenimientos de Bienawski. Fuente: Romana (2005)

### 2.4.2. Q-Barton 1974

“El sistema Q o clasificación de Barton (1974) fue desarrollado en Noruega por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego. Se basó su desarrollo en el análisis de cientos de túneles construidos principalmente en Escandinavia.” (Pérez Acebo et al., 2016)

Al contrario que el RMR, no se trata de un sistema lineal, sino exponencial que va desde un valor inferior de Q=0,001 hasta un valor Q=1000 para terrenos de gran calidad, que viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 3. Ecuación para la clasificación de Q-Barton. Fuente: Jiménez (2009)

Donde:

- RQD: Al igual que para el RMR, se trata de un valor experimental del terreno.

Calidad del macizo rocoso	R.Q.D. %	Observaciones
Muy mala	0 – 25	Para R.Q.D < 10 se puede tomar R.Q.D. =10 en la ecuación de Q
Mala	25 – 50	
Mediana	50 – 75	
Buena	75 – 90	
Excelente	90 - 100	

Tabla 7. Valores de RQD para el cálculo de Q. Fuente: Yepes (s.f.)

- Jn: “Índice de diaclasado” (Jiménez, 2009)

Descripción	Jn
Roca masiva	0,5 – 1
Una familia de diaclasas	8
Una familia de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	3
Dos familias de diaclasas	4
Dos familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	6
Tres familias de diaclasas	9
Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	12
Cuatro o más familias de diaclasas, roca muy fracturada	15
Roca triturada terrosa	20

Descripción	Jn
En boquillas, se utiliza 2 x Jn, y en túneles, 3 x Jn	

Tabla 8. Valores para el índice de diaclasado (Jn). (Yepes, s.f.)

- Jr: “Índice de rugosidad. No es como el JRC, que solo depende de la forma de la grieta, ya que también tiene en cuenta si la discontinuidad está rellena o limpia, o si se trata de un espejo de falla” (Jiménez, 2009)

Contacto entre las dos caras de las diaclasas		Jr
Desplazamiento lateral de menos de 10 cm	Juntas discontinuas	4
	Juntas rugosas o irregular ondulada	3
	Suave ondulada	2
	Espejo de falla, ondulada	1,5
	Rugosa o irregular, plana	1,5
	Suave plana	1
	Espejo de falla, plano	0,5
No existe contacto entre las dos caras de las diaclasas suficientemente gruesas para impedir el contacto entre las caras de las diaclasas		1
Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de las diaclasas		1

Tabla 9. Valores para el índice de rugosidad (Jr). Fuente: Yepes (s.f.)

- Ja: “Índice de alteración: La alteración es bastante peligrosa y por ello está muy penalizada. Común en zonas de falla, las cuales pueden llegar a tener grandes dimensiones” (Jiménez, 2009)

Descripción	Ja	Φº
<b>Contacto entre las dos caras de las diaclasas</b>		
Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como, por ejemplo, cuarzo en paredes sanas	0,75	25 – 30
Caras de la junta únicamente manchadas	1	25 – 30
Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	2	25 – 30
Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no	3	20 – 25

Descripción	$J_a$	$\Phi^\circ$
reblandecible		
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción como caolinita, clorita, talco, yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 o 2 mm	4	8 – 16
<b>Contacto entre las dos caras de la diaclasa &lt; 10 cm desplazamiento lateral</b>		
Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	4	25 – 30
Fuertemente consolidados rellenos de minerales arcillosos no blandos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	6	16 – 24
Sobreconsolidación media a baja, blandos, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de < 5 mm de espesor	8	12 – 16
Rellenos de arcilla expansiva, de espesor continuo de 5 mm. El valor $J_a$ dependerá del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva	8 – 12	6 – 12
<b>No existe contacto entre las dos caras de la diaclasa cuando esta cizallada</b>		
Zonas o bandas de roca desintegrada o manchada y arcilla	6 – 8 – 12	6 – 24
Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fricción de arcilla no blanda	5	6 – 24
Granos arcillosos gruesos	13 – 20	6 – 24

Tabla 10. Valores para el índice de alteración de las discontinuidades ( $J_a$ ). Fuente: Yepes (s.f.)

- $J_w$ : "Índice reductor por presencia de agua: Tiene gran importancia en el comportamiento. No se indica a qué están referidos los caudales mencionados, si bien puede pensarse que son para el frente de túnel" (Jiménez, 2009)

Descripción	$J_w$	Presión del agua kg/cm <sup>2</sup>
Excavaciones secas o de influencia poco importante	1	< 1
Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las diaclasas	0,66	1 – 2,5
Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las diaclasas	0,33*	2,5 – 10

Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo	0,1 – 0,2*	> 10
Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	0,05 – 0,01*	> 10
Los valores presentados con el signo * son solo valores estimados. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar $J_w$		

Tabla 11. Valores para el índice reductor por presencia de agua ( $J_w$ ). Fuente: Yepes (s.f.)

- SRF: “Stress reduction factor: Tiene en cuenta el estado tensional. Se introdujo como factor de ajuste de los resultados de la clasificación” (Jiménez, 2009).

Descripción				SRF
Excavación atravesada por zonas blandas de rocas que pueden ocasionar descompresión o desprendimiento de rocas al excavar el túnel	Muchas zonas débiles con arcilla o roca desintegrada, roca muy descomprimida			10
	Zonas individuales débiles, con arcilla o roca triturada, profundidad de la excavación < 50 m			5
	Ídem profundidad > 50 m			2,5
	Muchas zonas de cizallamiento en roca competente sin arcilla, roca descomprimida			7,5
	Zonas individuales de cizallamiento en roca competente sin arcilla, profundidad < 50 m			5
	Ídem profundidad > 50 m			2,5
	Juntas abiertas, muy diaclasado			5
		$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_c/\sigma_3$	SRF
Roca competente, problemas de tensión en la roca	Baja tensión, cerca de la superficie	> 200	> 13	2,5
	Tensión media	10 – 200	0,66 – 13	1
	Alta tensión, roca resistente	10 – 5	0,33 – 0,66	0,5 – 2
	Explosiones en roca masiva de rocas pequeñas	5 – 2,5	0,16 – 0,33	5 – 10
	Explosiones grandes de roca masiva	< 2,5	< 0,16	10 – 20

Descripción		SRF
		SRF
Roca fluyente o plástica	Poca presión de fluencia	5 – 10
	Presión grande de fluencia	10 – 20
Roca expansiva	Poca presión de hinchamiento	5 – 10
	Presión grande de hinchamiento	10 – 15

Tabla 12. Valores para el índice SRF. Fuente: Yepes (s.f.)

En base a los parámetros mencionados anteriormente y la expresión, estos son los rangos de valores existentes para el índice Q.

Clasificación	Rango de valores
Roca excepcionalmente mala	0,001 – 0,01
Roca extremadamente mala	0,01 – 0,1
Roca muy mala	0,1 – 1
Roca mala	1 – 4
Roca media	4 – 10
Roca buena	10 – 40
Roca muy buena	40 – 100
Roca extremadamente buena	100 – 400
Roca excepcionalmente buena	400 - 1000

Tabla 13. Clasificación de Q Barton. Fuente: Elaboración propia.

En base a los valores de la tabla anterior, Barton incorporó una relación directa entre la calidad del macizo rocoso y las recomendaciones de sostenimiento para túneles. A diferencia de otros sistemas puramente clasificatorios, el índice Q fue concebido explícitamente como una herramienta de diseño, estableciendo un vínculo cuantitativo entre el valor del índice y la categoría de soporte requerida (Barton, Lien y Lunde, 1974).

Según los autores, el propósito fundamental del sistema es proporcionar “una base empírica para la selección de sostenimiento en túneles en roca” (Barton, Lien y Lunde, 1974). Para ello, introducen el concepto de *Equivalent Dimension* (De), que relaciona el tamaño de la excavación con el uso previsto, permitiendo adaptar las recomendaciones de sostenimiento no solo a la calidad del macizo, sino también a la geometría y función del túnel.

Las recomendaciones de soporte se presentan en un diagrama Q–De, donde el eje horizontal corresponde al índice Q y el vertical al valor De. En este gráfico se delimitan zonas que indican distintos tipos de sostenimiento, desde ausencia de soporte hasta sostenimiento muy pesado. En macizos de calidad muy buena (valores elevados de Q), los autores señalan que puede “no ser necesario sostenimiento sistemático, más allá de pernos ocasionales para bloques inestables” (Barton, Lien y Lunde, 1974). A medida que el valor de Q disminuye, el diagrama prescribe combinaciones progresivamente más robustas de bulonado sistemático y hormigón proyectado.

Para valores intermedios de Q, “el sistema recomienda bulones de roca con determinadas longitudes y espaciamentos, complementados con capas de hormigón proyectado de espesor creciente” (Barton, Lien y Lunde, 1974). En condiciones de baja calidad (valores reducidos de Q), el sostenimiento incluye “hormigón proyectado reforzado, bulonado denso e incluso cerchas metálicas”. En los casos más desfavorables, correspondientes a valores muy bajos del índice, se contemplan soluciones de soporte pesado, incluyendo marcos cerrados, espesores significativos de hormigón proyectado y reducción del avance por fase” (Barton, Lien y Lunde, 1974).

Barton y sus colaboradores destacan que el sistema Q se basa en una amplia base de datos de casos reales, afirmando que el método fue desarrollado a partir del análisis de “más de 200 casos de túneles” (Barton, Lien y Lunde, 1974), lo que otorga al diagrama de soporte un fuerte componente empírico. Sin embargo, también subrayan que el diseño debe adaptarse a las condiciones específicas del proyecto y que el diagrama constituye una guía preliminar más que una prescripción rígida.

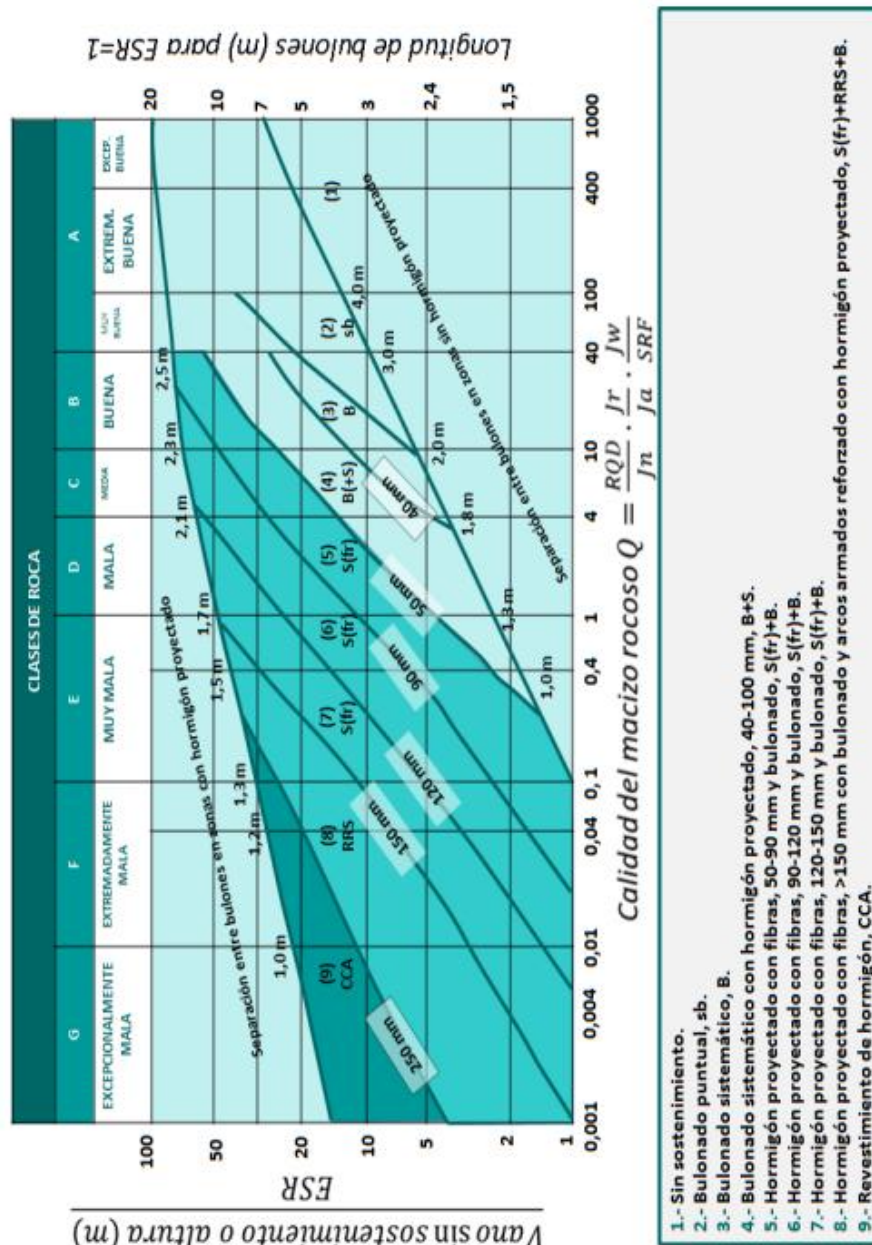


Tabla 14. Recomendaciones de sostenimiento en base a la clasificación Q-Barton. Fuente: González de Vallejo et al. (2002)

### 2.4.3. GSI Hoek y Marinos 1990

El Geological Strength Index (GSI) es un sistema de clasificación geomecánica desarrollado por Hoek, Kaiser y Bawden a partir de la década de 1990, cuyo propósito es caracterizar el comportamiento global del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas directas. Tal y como indican sus autores, “the Geological Strength Index (GSI) was introduced to provide a system for estimating rock mass properties from geological observations” (Hoek et al., 1995).

A diferencia de otros sistemas de clasificación geomecánica, el GSI no se apoya en la suma ponderada de parámetros cuantitativos obtenidos mediante ensayos, sino en la descripción cualitativa del macizo rocoso. En este sentido, Hoek y Brown señalan que *“the GSI system is based on the description of the rock mass in terms of its structure and the condition of the discontinuity surfaces”* (Hoek y Brown, 1997). Esta filosofía permite aplicar el índice incluso en fases tempranas del proyecto, cuando la información disponible es escasa y el reconocimiento geológico constituye la principal fuente de datos.

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓</p>	<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A
	<p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70			
	<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60	50		
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			40	30	
	<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20	
	<p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings

Tabla 15. Diagrama original de estimación del índice GSI en función de la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades. Fuente: Hoek & Marinos (2000).

El valor del GSI se obtiene a partir de la evaluación conjunta de dos aspectos fundamentales: la estructura del macizo, entendida como el grado de fracturación y el tamaño de los bloques, y la condición de las discontinuidades, considerando su rugosidad, alteración y presencia de rellenos. Según Marinós y Hoek, *“the GSI system combines the blockiness of the rock mass with the surface condition of discontinuities in order to provide a realistic description of rock mass quality”* (Marinos y Hoek, 2000). El índice resultante se expresa mediante un valor comprendido entre 0 y 100, asociado a distintos rangos de comportamiento del macizo rocoso.

Uno de los aspectos más relevantes del GSI es su integración con el criterio de rotura Hoek–Brown generalizado, lo que permite traducir la caracterización geológica en parámetros mecánicos equivalentes del macizo. En este sentido, Hoek et al. indican que *“the GSI provides a link between geological observations and the estimation of rock mass strength parameters used in the Hoek–Brown failure criterion”* (Hoek et al., 2002). Esta relación ha convertido al GSI en una herramienta ampliamente utilizada en el análisis del comportamiento del terreno en excavaciones subterráneas y en el diseño geotécnico avanzado.

Desde el punto de vista del comportamiento frente a excavaciones subterráneas, el valor del GSI permite establecer relaciones cualitativas con la estabilidad del frente, la magnitud de las deformaciones y la necesidad de sostenimiento. Marinós y Hoek destacan que *“low GSI values are associated with heavily fractured or disturbed rock masses in which large deformations and squeezing behaviour are expected”* (Marinos y Hoek, 2001). Por el contrario, valores elevados de GSI se asocian a macizos competentes, con mayor capacidad autoportante y menores convergencias.

Entre las principales ventajas del sistema GSI se encuentra su rapidez de aplicación y su capacidad para trabajar con información geológica directa. Hoek et al. señalan que *“the GSI system is particularly useful in cases where detailed quantitative data are not available”* (Hoek et al., 1995). Esta característica lo hace especialmente adecuado para fases de anteproyecto y estudios preliminares.

No obstante, el propio carácter cualitativo del GSI introduce una componente subjetiva en su aplicación. Marinós y Hoek advierten que *“the determination of GSI relies heavily on engineering judgement and experience”* (Marinos y Hoek, 2001). Además, el índice no incorpora de forma explícita la influencia del estado tensional ni la presencia de agua, aspectos que deben ser evaluados mediante otros enfoques complementarios.

#### 2.4.4. Clasificación de Romana 2001

La clasificación geomecánica expuesta por el Dr. Manuel Romana Ruiz se desarrolla como una extensión y reinterpretación del sistema RMR de Bieniawski, con el objetivo de adaptarlo de forma más precisa a la realidad constructiva de los túneles excavados en roca. Esta propuesta surge a partir de la experiencia acumulada en obras subterráneas y de la observación de los intervalos del RMR que resultan, en muchos casos, demasiado amplios para separar procesos constructivos, principalmente en los rangos centrales, donde se encuentra el macizo rocoso de la gran parte de las obras.

Tal y como indica su autor, “la clasificación RMR, aun siendo una herramienta de gran utilidad, presenta intervalos excesivamente amplios que no siempre permiten una diferenciación adecuada del comportamiento del macizo rocoso en excavaciones subterráneas” (Romana Ruiz, 2001). A partir de esa premisa, Romana propone una subdivisión de las clases del RMR, orientada a una definición más específica de los métodos constructivos, sostenimientos y secuencias de avance.

La clasificación de Romana no introduce nuevos parámetros geomecánicos, sino que reorganiza y refina los rangos del RMR, estableciendo subgrupos de calidad del macizo que permiten una interpretación más detallada del comportamiento del terreno. Según Romana, “el objetivo de esta subdivisión es facilitar la toma de decisiones constructivas, especialmente en excavaciones en mina, donde pequeñas variaciones en la calidad del macizo pueden tener consecuencias relevantes” (Romana, 2001).

Desde el punto de vista conceptual, la propuesta de Romana reconoce que dos macizos con valores de RMR similares pueden presentar comportamientos constructivos distintos, y que, por tanto, resulta necesario introducir un mayor grado de detalle en la clasificación. Esta aproximación resulta especialmente útil en túneles de longitud significativa, donde el trazado atraviesa macizos con características variables y donde la partición longitudinal del túnel es un elemento clave del diseño.

Clases originales RMR de Bieniawski			Modificación en subclases de Romana	
I	MUY BUENA	100 - 90	EXCELENTE	I A
		90 - 80	MUY BUENA	I B
II	BUENA	80 - 70	BUENA A MUY BUENA	II A
		70 - 60	BUENA A MEDIA	II B
III	MEDIA	60 - 50	MEDIA A BUENA	III A

Clases originales RMR de Bieniawski			Modificación en subclases de Romana	
		50 - 40	MEDIA A MALA	III B
IV	MALA	40 - 30	MALA A MEDIA	IV A
		30 - 20	MALA A MUY MALA	IV B
V	MUY MALA	20 - 10	MUY MALA	V A
		10 - 0	PÉSIMA	V B

Tabla 16. Comparativa entre la clasificación RMR de Bieniawski y la clasificación de Romana. Fuente: Barba Ávila (2024).

La clasificación de Romana establece una correspondencia directa entre estos subgrupos del RMR y criterios constructivos generales, tales como el tipo de excavación (manual, mecanizada, excavación secuencial), la longitud de avance recomendable y el nivel de sostenimiento inicial. En palabras del autor, “la finalidad última de la clasificación es servir de puente entre la caracterización geomecánica del macizo y la definición de soluciones constructivas coherentes” (Romana, 2001).

Una de las principales aportaciones de esta clasificación es su enfoque claramente constructivo, alejándose de una interpretación puramente descriptiva del macizo. A diferencia del RMR clásico, que ofrece recomendaciones generales, la propuesta de Romana se apoya en la experiencia práctica para orientar decisiones de obra, lo que explica su utilización en el ámbito de la ingeniería subterránea en España, especialmente en túneles excavados en mina.

No obstante, el propio autor advierte que esta clasificación no debe utilizarse de forma aislada. Tal y como señala Romana, “las clasificaciones geomecánicas no sustituyen al análisis geotécnico ni al criterio del proyectista, sino que deben entenderse como herramientas de apoyo” (Romana, 2001). En este sentido, la clasificación de Romana resulta especialmente adecuada cuando se emplea de forma conjunta con otros sistemas, como el RMR original, el sistema Q de Barton o el índice GSI de Hoek, permitiendo contrastar resultados y reducir la dependencia de un único criterio.

En base a esta clasificación, Manuel Romana desarrollo una serie de recomendaciones de sostenimientos y métodos constructivos en base a los valores obtenidos del estudio del macizo rocoso. En macizos de buena calidad (RMR alto), las recomendaciones de sostenimiento coinciden con las directrices clásicas, “bulonado ocasional y hormigón proyectado ligero en zonas puntuales, permitiendo incluso excavación a sección completa con avances relativamente amplios” (Romana, 2001).

En rangos intermedios (RMR medio), donde el comportamiento del macizo es más incierto, Romana recomienda un enfoque progresivo en el sostenimiento, “combinando bulonado sistemático, hormigón proyectado de espesor creciente y, cuando sea necesario, cerchas ligeras” (Romana, 2001). En estos casos, su planteamiento está estrechamente vinculado al método constructivo: la excavación puede realizarse a sección completa si la estabilidad lo permite, pero se aconseja evaluar particiones de sección (avance y destroza) cuando el tiempo de autoestabilidad sea reducido. En este sentido, el autor subraya que “la clasificación debe servir como herramienta para decidir no solo el sostenimiento, sino también la estrategia de excavación” (Romana, 2001).

En macizos de baja calidad (RMR bajo), Romana coincide en la necesidad de sostenimientos pesados, incluyendo bulonado denso, hormigón proyectado reforzado y marcos metálicos. Sin embargo, introduce la recomendación explícita de adaptar el método de excavación a la capacidad de autoaporte, proponiendo avances cortos, excavación por fases y cierre rápido del anillo resistente. La excavación a sección completa deja de ser aconsejable y se priorizan métodos secuenciales que permitan controlar deformaciones y redistribución de tensiones.

RMR	CLASE	BULONADO			HORMIGÓN PROYECTADO			ARMADURA		CERCHAS		MÉTODOS ESPECIALES	
		L(m)	b/m2	S'(m)	e (cm)	CAPAS	SELLADO	MALLAZO	FIBRAS	TIPO	S'(m)		
100	la	-	-	-	-	-	-						
90	lb	2/3	0.10	Ocasional	2	Ocasional	No	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS		No		
80	IIa	3	0.10/0.25	Ocasional	5	1	Ocasional					No	
70	IIb	3	0,25/0.44	2x2/1.5x1.5	6-10	½	Sí			No			
60	IIa	¾	0.44/0.66	1.5x1.5/1x1.5	8-15	2/3	Sí	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS		Ocasional		
50	IIIb	4	0.66/1	1x1.5/1x1	12-20	2/3	Sí				TH-21	1.5	
40	IVa	4/4.5	0.80/1	1x1.25/1x1	16-24	3	Sí	DOBLE	FIBRAS	TH-29	1		
30	IVb	4.5/5	1	1x1	20-30	3	Sí				HER	0.75/1	
20	Va	-	-	-	30-40	3/4	Sí				0.5/0.75	BERNOLD PARAGUAS	
10	Vb	<b>SISTEMAS ESPECIALES</b>											

Tabla 17. Recomendaciones de sostenimientos en base a la clasificación de Romana. Fuente: Romana (2000)

RMR	CLASE	LONGITUD DE PASE (m)		PARTICIÓN DE LA SECCIÓN	MÉTODO DE EXCAVACIÓN		
		MÁXIMA	RECOMENDADA				
100	I a		≥ 5	SECCIÓN COMPLETA CALOTA Y DESTROZA	TBM ABIERTO VOLADURAS ROZADORA		
90	I b		≥ 5				
80	II a	16.0	≥ 5				
70	II b	9.5	4/6				
60	III a	6.0	3/4				
50	III b	4.0	2/3				
40	IV a	2.5	1/2			GALERÍA DE AVANCE GALERÍAS MÚLTIPLES CONTRABO VEDA	ESCUDO FRESADO ESCARIFICACIÓN/PALA
30	IV b	1.75	1				
20	V a	1.0	0,5/0,75				
10	V b		0,5				
0							

Notas

- 1 La unidad para el pase es el metro (m)
- 2 El pase máximo es el límite teórico según BIENIAWSKI
- 3 El pase recomendado se refiere a la excavación en calota/avance y en caso de que exista galería de avance a la excavación de ensanche (y no a la propia galería)
- 4 Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- 5 Las líneas de trazas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces

Tabla 18. Recomendaciones de métodos constructivos de la clasificación de Romana. Fuente: Romana (2001)

En el contexto del presente trabajo, la clasificación de Romana se incorpora como un sistema complementario, cuyo valor añadido reside en su capacidad para refinar la interpretación del RMR y mejorar la definición de tramos homogéneos desde el punto de vista constructivo. Su integración dentro de la herramienta propuesta contribuye a una caracterización más detallada del macizo rocoso y a una mejor correlación entre los datos geomecánicos y las decisiones constructivas en fases preliminares de proyecto y estudios de licitación.

### 2.5. Principales sistemas de clasificación geomecánica en suelos

Tras el análisis de los macizos rocosos mediante sistemas como el RMR de Bieniawski, el GSI o el índice Q de Barton, que evalúan principalmente la calidad de la roca a través de sus discontinuidades y la resistencia de los bloques, es imperativo abordar la clasificación geomecánica de los suelos cuando el terreno presenta un comportamiento de medio continuo o se encuentra intensamente alterado y fracturado.

En la transición de la mecánica de rocas a la de suelos, la atención se desplazó a la estructura del macizo hacia las propiedades físicas intrínsecas del material, fundamentando en que “el muestreo y la clasificación de los suelos son dos requisitos previos indispensables para la aplicación de la mecánica de suelos a los problemas de diseño” (Casagrande, 1948). Esta sistematización nació ante la creciente complejidad de los problemas prácticos, reconociéndose que “la mecánica de suelos se originó hacia varias décadas bajo el efecto de la presión ejercida por la necesidad” (Terzaghi y Peck, 1948).

Los sistemas de clasificación modernos se basan en ensayos de laboratorio que determinan la granulometría y la plasticidad del suelo. “El análisis granulométrico define la distribución de partículas, identificando la frontera crítica en el tamiz N°200 (0,0075mm), que separa los suelos de grano grueso de los de grado fino” (Charles Cruz, 2003). Para caracterizar la graduación de los elementos granulares, se emplean los coeficientes de uniformidad ( $C_u$ ) y curvatura ( $C_c$ ), calculados mediante las siguientes expresiones:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

*Ecuación 4. Ecuación para cálculo del coeficiente de uniformidad. Fuente: Charles Ruiz (2003)*

$$C_C = \frac{(D_{60})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

*Ecuación 5. Ecuación para el cálculo de coeficiente de curvatura. Fuente: Charles Ruiz (2003)*

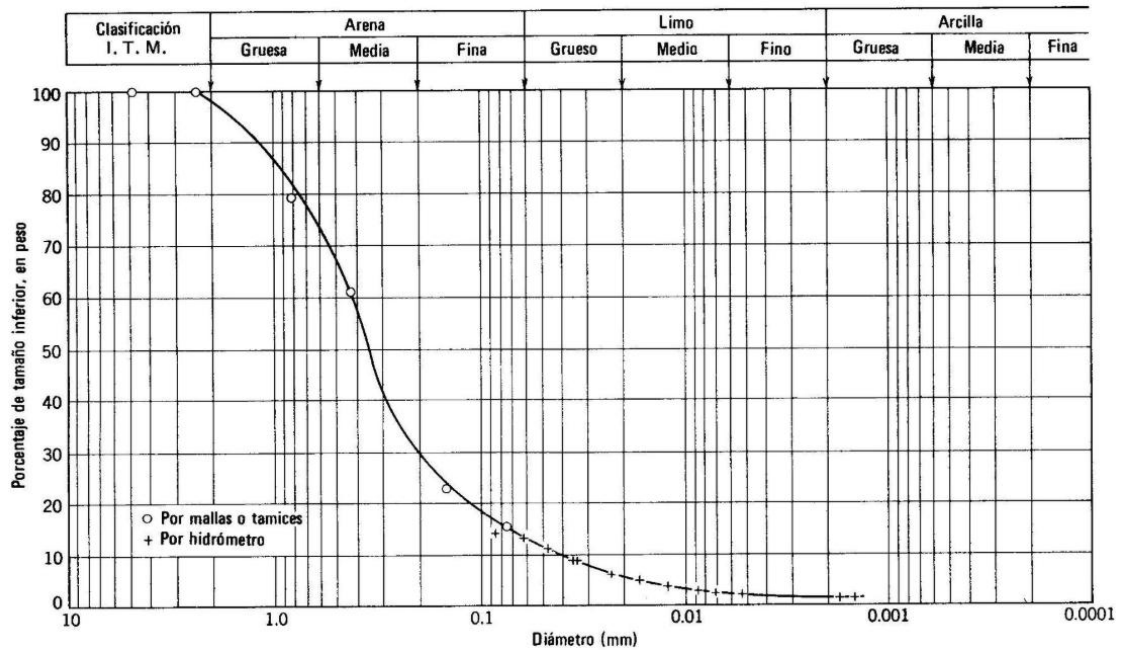


Figura 16. Curva granulométrica de un suelo, representado en un papel <<log-normal>>. Fuente: Yepes (2016)

“Complementariamente, la plasticidad se evalúa mediante los límites de Atterberg, siendo el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP) los parámetros que definen el Índice de Plasticidad (IP), el cual representa el rango de humedad en el que el suelo mantiene un comportamiento plástico” (Charles Ruiz, 2003)

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 6. Cálculo del Índice de Plasticidad. Fuente: Charles Ruiz (2003)

Sobre estos fundamentos se erige el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS/SUCS), estandarizado por la norma ASTM D2487, el cual es referencia global para la geotécnica general. Sue metodología se sintetiza en que “este sistema de clasificación está basado en el reconocimiento del tipo y predominancia de los constituyentes considerando el tamaño de grano, graduación el índice de plasticidad y el límite líquido” (Terzaghi y Peck, 1973). “El sistema asigna un símbolo de dos letras, la primera identifica el tipo de suelo (G para gravas, S para arenas, M para limos y C para arcillas, y la segunda describe sus propiedades de graduación y plasticidad” (Charles Ruiz, 2003).

DIVISIONES MAYORES			SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRE DEL GRUPO
Suelos granulares gruesos el 50% o más se retuvo en el tamiz nº200 (0.075 mm)	Grava < 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4 (4.75 mm)	Grava limpia menos del 5% pasa el tamiz Nº200	GW	Grava bien graduada, grava fina a gruesa
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz Nº200	GP	Grava pobremente graduada
			GM	Grava limosa
			GC	Grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4 (4.75 mm)	Arena limpia menos del 5% pasa el tamiz Nº200	SW	Arena fina a gruesa
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz Nº200	SP	Arena pobremente graduada
			SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino más del 50% de la muestra pasa el tamiz No.200 (0.075 mm)	Limos y arcillas límite líquido <50	Inorgánico	ML	Limo
			CL	Arcilla
	Limos y arcillas límite líquido ≥ 50	Orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
		Inorgánico	MH	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	OH	Arcilla orgánica
Suelos altamente orgánicos			PT	Turba

Tabla 19. Sistema unificado de Clasificación SUCS-ASTM D2487. Fuente: Elaboración propia

“La distinción entre arcillas y limos en el USCS se realiza mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande, donde la “Línea A” actúa como frontera matemática para diferenciar la naturaleza de la fracción fina” (Andrés G., 2025).

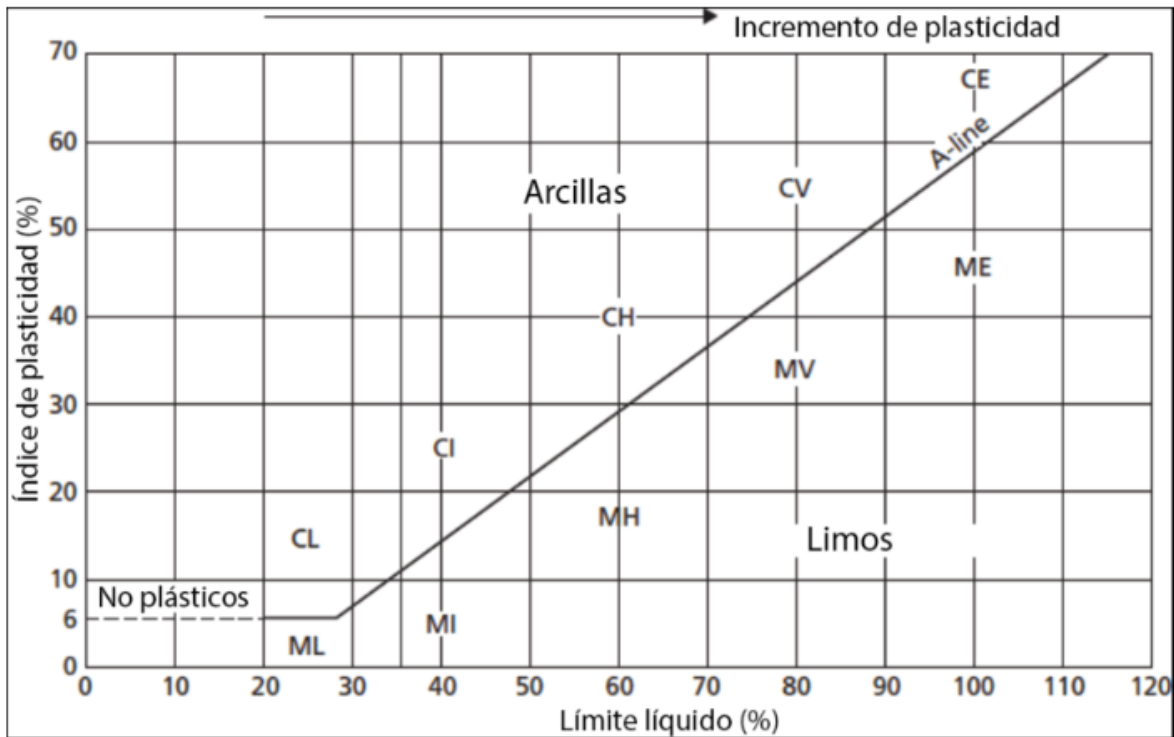


Figura 17. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: Modificado de Craig y Knappett (2012)

$$IP = 0.73 \times (LL - 20)$$

Ecuación 7. Ecuación de la pendiente de la "Línea A". Fuente: Craig y Knappett (2012)

Por otro lado, el sistema AASHTO (M145) se especializa en obras de infraestructura del transporte y firmes. “A diferencia del USCS, que requiere un 50% de finos para clasificar a un suelo como tal, el sistema AASHTO establece el umbral en un 35% pasante por el tamiz N° 200, categorizando los materiales en siete grupos (del A-1 al A-7)” (AASHTO, 2021). Una herramienta fundamental en este sistema es el Índice de Grupo (GI), un valor empírico que permite evaluar la calidad relativa del suelo como subrasante:

$$GI = (F - 35) \times [0,2 + 0,005 \times (LL - 40)] + 0,01(F - 15) \times (IP - 10)$$

Ecuación 8. Fórmula para el cálculo del Índice de Grupo (GI). Fuente: ASSHTO (2021)

En esta ecuación, representa el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200. En términos prácticos, se asume que "Un índice de grupo igual a cero indica que es material 'bueno' para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material 'muy malo'" (AASHTO, 1991). La correspondencia entre ambos sistemas, analizada exhaustivamente por Liu (1967), “permite integrar el diseño estructural vial con el análisis geotécnico profundo, garantizando la coherencia técnica del proyecto”.

En el ámbito de los túneles y obras subterráneas, la clasificación geomecánica no es solo una etiqueta, sino un indicador de la respuesta de deformación esperada. Mientras que en macizos rocosos se vigila la estabilidad de los bloques, en los suelos el enfoque se centra en controlar la extrusión del frente y la convergencia de la cavidad.

Finalmente, para el ingeniero geotécnico, el sistema USCS es el preferido para el modelado constitutivo del suelo, mientras que las indicaciones de la guía AASHTO están más enfocadas en la selección de materiales para los rellenos estructurales y capas bases de los firmes.

### **2.6. Comparativa y limitaciones de los sistemas de clasificación**

La integración de los diversos sistemas de clasificación geomecánica en un modelo de diseño constituye uno de los mayores desafíos técnicos en el ámbito de las obras subterráneas. No basta con conocer el funcionamiento individual de cada sistema, sino que es imprescindible conocer sus interrelaciones, hipótesis implícitas y las limitaciones que estas tienen. Como señala Bieniawski, *“the classification is not an end in itself, but a tool for engineering design”*, lo que implica que la clasificación debe entenderse como un medio para interpretar el comportamiento del terreno, no como una respuesta definitiva de este.

En la práctica, la coexistencia de múltiples sistemas —RMR (Bieniawski), Q (Barton et al.), GSI (Hoek), USCS o AASHTO en suelos— obliga al ingeniero a establecer correspondencias y traducciones entre índices que, aunque persiguen objetivos similares, se fundamentan en enfoques conceptuales distintos. En este contexto, se han desarrollado diversas correlaciones empíricas que permiten relacionar la calidad del macizo rocoso expresada mediante un sistema con su equivalente aproximado en otro.

Una de las correlaciones más difundidas para vincular el Rock Mass Rating (RMR) con el índice Q de Barton parte de la expresión propuesta por Bieniawski (1989):

$$RMR = 9 \times \ln(Q) + 44$$

*Ecuación 9. Relación entre el índice RMR y el Q de Barton. Fuente: Fernández-Gutiérrez et al. (2017)*

Aunque la anteriormente mencionada se trate de la más conocida, a partir de esta se han ido sucediendo diferentes correlaciones entre las clasificaciones, indicadas en la siguiente tabla:

Autor, año	Proveniencia de los datos	Correlación	R/R <sup>2</sup>
Rutledge and Preston, 1978 (51)	9 túneles en Nueva Zelanda	$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$	$R = 0,81$ $R^2 = 0,66$
Cameron-Clarke and Budavari, 1981 (52)*	Túneles en Sudáfrica	$RMR = 5 \cdot \ln Q + 60,8$	Mucha dispersión
Moreno Tallón, 1982 (53)	4 túneles en España	$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$	$R = 0,55$ $R^2 = 0,30$
Celada Tamames, 1983 (54)	España	$RMR = 43,89 - 9,19 \cdot \ln Q$	
Abad <i>et al.</i> , 1983 (55)	Minas de carbón	$RMR = 10,5 \cdot \ln Q + 41,8$	$R = 0,66$ $R^2 = 0,44$
Kaiser <i>et al.</i> , 1986 (25)	Túnel de Wolverine West	$RMR = 6,3 \cdot \ln Q + 41,6$	
Sunwo and Hwang, 2001 (56)	Distintas litologías en Corea del Sur	$RMR = 5,97 \cdot \ln Q + 49,5$	$R = 0,89$ $R^2 = 0,79$
Castro-Fresno <i>et al.</i> , 2010 (38)	Túneles en suelos de baja calidad	$RMR = 6,63 \cdot \ln Q + 35,53$	$R = 0,70$ $R^2 = 0,49$
Alkorta-Lertxundi and Bernardo-Sanchez, 2010 (57)	Túneles de la VSM (Vizcaya, España)	$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$	$R = 0,89$ $R^2 = 0,79$
Alkorta-Lertxundi <i>et al.</i> , 2014 (58)	Proyecto de túnel en Vizcaya, España	$RMR = 6,7 \cdot \ln Q + 45,4$	$R = 0,94$ $R^2 = 0,884$
Sayeed and Khanna, 2015 (59)	India	$RMR = 4,52 \cdot \ln Q + 43,6$	$R = 0,86$ $R^2 = 0,736$

Tabla 20. Diferentes correlaciones entre la clasificación RMR de Bieniawski y la clasificación Q de Barton. Fuente: Fernández-Gutiérrez *et al.* (2017)

Estas correlaciones, aunque útiles para facilitar la comunicación entre proyectos que emplean distintos índices, deben interpretarse con cautela, ya que están basadas en regresiones empíricas y pueden variar significativamente según el contexto geológico.

Del mismo modo, el Geological Strength Index (GSI) puede estimarse a partir del RMR en determinadas condiciones. Hoek y Brown (1997) proponen que, “para macizos de calidad media a buena y bajo condiciones hidrológicas favorables, puede utilizarse la aproximación”:

$$GSI = RMR - 5$$

Ecuación 10. Relación entre RMR de Bieniawski y el GSI. Fuente: Hoek y Brown (1997)

siempre que se considere el valor de RMR básico sin penalizaciones por orientación de discontinuidades.

Estas relaciones permiten obtener estimaciones preliminares del comportamiento deformacional del macizo, si bien su uso indiscriminado puede inducir a errores significativos.

Una de las limitaciones más relevantes de los sistemas clásicos radica en la imposibilidad de conocer exhaustivamente la variabilidad espacial del terreno. Como advierten González Díez y Martínez Cedrún (2024), la información obtenida en sondeos puntuales “no siempre es representativa del comportamiento global del macizo, lo que puede conducir a sobreestimaciones de estabilidad en presencia de heterogeneidades no detectadas”.

Asimismo, los sistemas aditivos como el RMR presentan una limitación estructural inherente: un parámetro extremadamente desfavorable puede quedar compensado por otros favorables, generando una valoración final optimista. Pérez et al. (2018) subrayan que “las clasificaciones tienden a suavizar la influencia de condiciones locales críticas cuando se expresan mediante índices globales”.

Por otro lado, la transición desde la caracterización de macizos rocosos hacia la de los suelos implica un cambio conceptual profundo. Mientras que en roca el análisis se centra en la geometría y estado de las discontinuidades estructurales, en suelos la clasificación se fundamenta principalmente en las propiedades intrínsecas de la matriz: granulometría, plasticidad, contenido de finos y comportamiento frente al agua. Este cambio de enfoque no elimina, sin embargo, las incertidumbres inherentes al proceso de clasificación.

Al igual que ocurre con sistemas como el RMR o el Q en macizos rocosos, las clasificaciones de suelos presentan limitaciones cuando se enfrentan a materiales limítrofes. Warren et al. (2016) señalan que *“weak rocks represent a boundary condition between traditional rock mass and soil classification systems”*, destacando que la frontera entre roca muy débil y suelo cementado constituye una zona de transición compleja. En este dominio intermedio, la elección del sistema de clasificación puede condicionar significativamente la interpretación del comportamiento mecánico.

Una de las principales limitaciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) radica en su naturaleza esencialmente descriptiva. A diferencia de los sistemas de clasificación de macizos rocosos, que generan un índice numérico continuo susceptible de ser incorporado en modelos cuantitativos, el USCS se expresa mediante combinaciones de letras (GW, CL, SM, etc.). Como advierten Warren et al. (2016), *“the USCS is descriptive and uses letter groups to classify materials; therefore, numerical spreadsheet calculations and statistical analyses are difficult to perform on materials classified solely by USCS”*. Esta característica dificulta la integración directa de la información del suelo en herramientas de análisis que sí aceptan valores numéricos de calidad de roca.

A esta limitación se suma la coexistencia de distintos sistemas de clasificación de suelos con criterios no plenamente coincidentes. El USCS y el sistema AASHTO, por ejemplo, difieren en los umbrales granulométricos utilizados para definir un suelo como fino, lo que puede generar interpretaciones divergentes para un mismo material. Casagrande (1948), en el desarrollo del sistema unificado, estableció “una base orientada a la ingeniería civil general, mientras que el sistema AASHTO se diseñó específicamente para evaluar el comportamiento como material de subrasante”. Esta

diferencia de objetivos explica que un mismo suelo pueda recibir valoraciones distintas en función del sistema empleado.

La problemática se intensifica en la denominada zona “*Hard Soils and Soft Rocks*” (HSSR), que engloba materiales como lutitas meteorizadas, saprolitos, margas o arcillas sobreconsolidadas. En estos casos, el comportamiento puede estar controlado simultáneamente por la matriz del material y por discontinuidades heredadas de la roca madre. González Díez y Martínez Cedrún (2024) advierten que en este tipo de materiales el sistema USCS “ignora la estructura de juntas que puede gobernar la rotura en fases iniciales de excavación”. Esta omisión resulta particularmente relevante en obras subterráneas, donde la estabilidad inicial del frente puede depender de planos de debilidad estructurales no capturados por ensayos granulométricos o límites de Atterberg.

Más allá de la clasificación estática, otra limitación significativa es la incapacidad de estos sistemas para representar comportamientos dependientes del tiempo o del estado tensional. Los sistemas de clasificación de suelos no contemplan explícitamente fenómenos como la fluencia plástica (*squeezing*) en túneles profundos, la degradación progresiva en presencia de agua o la evolución estructural inducida por ciclos de carga y descarga. Como ocurre con las clasificaciones de roca, se trata de herramientas simplificadas que describen el material en un estado inicial, pero no necesariamente su respuesta evolutiva.

El comportamiento del agua constituye un factor adicional de incertidumbre. Aunque el USCS incorpora la plasticidad como indicador indirecto del comportamiento frente a la humedad, no permite predecir de forma explícita fenómenos que pueden afectar a la excavación. Esta simplificación puede resultar insuficiente en contextos donde la interacción suelo-agua desempeña un papel determinante en la estabilidad de la excavación.

En este sentido, diversos autores han planteado la necesidad de establecer correlaciones entre sistemas de clasificación de roca y de suelo en materiales de transición. Warren et al. (2016) introducen el concepto de “*Weak Rock Mass Rating (W-RMR)*” como intento de integrar parámetros de ambos dominios en materiales de baja resistencia, reconociendo la dificultad de aplicar rígidamente un único sistema”. Esta tendencia evidencia que las clasificaciones tradicionales, tanto de roca como de suelo, pueden resultar insuficientes cuando se aplican fuera de su ámbito original de desarrollo.

En definitiva, tal como señala el Centro Geotécnico Internacional (2025), “las clasificaciones simplifican la complejidad del terreno”, lo que obliga al ingeniero a utilizarlas como herramientas

de apoyo y no como sustituto del análisis geotécnico integral. La interpretación de los resultados debe complementarse siempre con observación directa in situ, ensayos mecánicos específicos y seguimiento geotécnico durante la excavación.

### **2.7. Metodologías existentes para la caracterización de obras subterráneas**

La caracterización de los materiales en el ámbito de las obras subterráneas constituye un reto único para la ingeniería, dado que “en las obras subterráneas el terreno actúa como carga y como principal elemento portante” (Uniovi, 2007). Por ello, se han desarrollado metodologías específicas para evaluar los macizos rocosos y los suelos, con el fin de “vincular la experiencia de casos reales con el diseño de nuevas estructuras” (ITA-AITES, 2020).

La metodología para el estudio de rocas exige diferenciar entre la matriz y el macizo. Se define como macizo rocoso el “conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo” (Uniovi, 2007). La caracterización sistemática se divide en la descripción de la matriz rocosa, realizando un análisis que identifica los “minerales esenciales, tipo de textura y la porosidad” (Uniovi, 2007). Además, se realiza una cuantificación de la alteración del material, “que va desde el Grado I – Fresca, sin signos visibles de meteorización – hasta Grado VI – Suelo residual: Suelo sin estructura original de la roca-” (Uniovi, 2007).

Los sistemas de clasificación geomecánica son el pilar del diseño empírico, siendo los descritos anteriormente – RMR, Índice Q de Barton y GSI – los más extendidos en el ámbito de la ingeniería civil:

- RMR (Rock Mass Rating): Destaca por su “simplicidad y facilidad de aplicación” (Rodríguez, 2025). Evalúa seis parámetros, incluyendo la resistencia de la roca, el RQD, el espaciamiento y la condición de discontinuidades, la presencia de agua y la orientación de las juntas.
- Índice Q de Barton: Es considerado “el pilar de la clasificación y caracterización de macizos rocosos” (Barton et al., 1974). Su fórmula evalúa el tamaño de los bloques, la resistencia de corte entre estos y el estado tensional mediante el factor SRF.
- GSI (*Geological Strength Index*): Es un sistema “más fácil y simple que el RMR” (Hoek, 1994). Se basa en la evaluación visual de la estructura del macizo y de la condición de la superficie de las discontinuidades.

En el caso de los suelos, la metodología de caracterización se fundamenta en la edafología y en el análisis detallado de la morfología del perfil. La identificación y descripción de los horizontes

constituyen el punto de partida del reconocimiento geotécnico superficial, ya que, como señala la Vargas Rojas (2009), “la designación de horizontes constituye uno de los pasos fundamentales en la definición de los suelos”. La organización vertical del terreno permite comprender su evolución genética y anticipar posibles variaciones de comportamiento mecánico o hidráulico a lo largo del perfil.

Dentro de esta descripción, resulta especialmente relevante la identificación de horizontes como el Horizonte C, definido como “Material original. Sin desarrollo de estructura edáfica. Blando, suelto, se puede cavar con una azada” (Vargas Rojas, 2009). Este horizonte suele representar el material parental poco alterado y, desde el punto de vista geotécnico, puede constituir la transición hacia materiales de mayor competencia o, por el contrario, hacia formaciones de comportamiento más rocoso.

El análisis de las propiedades físicas del suelo desempeña un papel esencial en la evaluación preliminar de su comportamiento. La textura, entendida como la proporción relativa de tamaños de partícula, es descrita por la Vargas Rojas (2009) como un parámetro que “se refiere a la proporción relativa de las clases de tamaño de partícula”. En trabajos de campo, su determinación puede apoyarse en métodos táctiles que permiten distinguir la presencia de arcilla, limo y arena, proporcionando una primera aproximación al comportamiento plástico y drenante del material. La densidad aparente constituye igualmente un parámetro crítico, ya que “refleja la porosidad total del suelo” (Vargas Rojas, 2009), influyendo directamente en la compresibilidad y en la capacidad portante. Por su parte, la consistencia evalúa la “cohesión o adhesión de la masa del suelo, permitiendo caracterizar la friabilidad, plasticidad y adhesividad en diferentes estados de humedad” (Vargas Rojas, 2009), aspectos especialmente relevantes en excavaciones superficiales o en condiciones de saturación variable.

Desde el punto de vista químico y estructural, el estudio del pH, la salinidad y la organización interna del material complementan la caracterización. Vargas Rojas (2009) define la estructura del suelo como la “organización natural de las partículas del suelo en unidades de suelo discretas agregados o “peds”, lo cual influye en la permeabilidad, resistencia y comportamiento frente a la excavación”.

No obstante, la caracterización directa mediante reconocimiento visual y ensayos de laboratorio debe complementarse con técnicas de investigación in situ y métodos geofísicos que permitan reducir la incertidumbre espacial. La sísmica de refracción, por ejemplo, se basa en el principio de que las “ondas sísmicas tienen diferentes velocidades para distintos tipos de suelos y rocas” (ITA-AITES, 2020), permitiendo inferir cambios litológicos y variaciones de rigidez en profundidad. La

tomografía de resistividad eléctrica (ERT) resulta particularmente útil en la identificación de heterogeneidades hidrogeológicas, siendo considerada “fundamental para la detección de agua subterránea y zonas de falla” (ITA-AITES, 2020).

En túneles profundos, la medición del estado tensional adquiere una importancia determinante, ya que es necesario “establecer un modelo para el estrés in situ mediante técnicas como la sobreperforación (*overcoring*)” (ISRM, 2014). La determinación adecuada del campo de tensiones permite anticipar fenómenos como convergencias excesivas o fallas inducidas por redistribución de esfuerzos.

Por último, en el ámbito de la excavación subterránea moderna, se han desarrollado sistemas de detección anticipada que permiten identificar anomalías geológicas antes de alcanzar el frente de avance. Tecnologías como el *Tunnel Seismic Prediction* (TSP) posibilitan detectar peligros geológicos hasta “100-150 metros por delante del frente de excavación” (ISRM, 2014), reduciendo significativamente el riesgo asociado a cambios bruscos de litología, presencia de fallas o zonas saturadas.

En conjunto, la caracterización de suelos y materiales de transición requiere una aproximación integrada que combine descripción morfológica, ensayos físicos y químicos, técnicas geofísicas y monitoreo continuo, reconociendo que ningún método individual es suficiente para capturar la complejidad del comportamiento geotécnico en obras subterráneas.

### **2.8. Métodos constructivos para obras subterráneas**

La selección del método constructivo constituye una de las decisiones más estratégicas dentro del diseño y ejecución de obras subterráneas de desarrollo lineal. Dicha elección no responde exclusivamente a criterios tecnológicos, sino que debe integrarse dentro de un marco geotécnicos, geométrico, económico y logístico, que permita garantizar la estabilidad del terreno, el control de las deformaciones y la viabilidad del proyecto.

Desde un punto de vista conceptual, los métodos constructivos se pueden agrupar en dos grandes categorías:

- Métodos no mecanizados o semi-mecanizados
- Métodos mecanizados

**2.8.1. Métodos no mecanizados o semi-mecanizados**

Los métodos no mecanizados se caracterizan por una excavación por fases, generalmente mediante medios convencionales, donde el sostenimiento se instala progresivamente y se adapta a la respuesta del terreno. La excavación no se realiza a sección completa en un único ciclo, sino que se divide en etapas (avance, destroza, contrabóveda o galerías auxiliares), permitiendo una gran flexibilidad geométrica y una respuesta dinámica ante cambios geológicos.

El principal representante de este grupo es el Nuevo Método Austriaco (NATM) o Método de Excavación Secuencial (SEM). Su fundamento radica en el método observacional: la deformación controlada del terreno se monitoriza mediante instrumentación, ajustando el sostenimiento primario (hormigón proyectado, bulones, cerchas) según la evolución real del macizo. Este enfoque convierte al terreno en parte activa del sistema resistente.

También se incluye en esta categoría el método “Cut & Cover”, aplicado en túneles superficiales mediante excavación desde la superficie, ejecución estructural y posterior restitución del terreno. Aunque el procedimiento difiere conceptualmente del NATM, comparte el carácter no industrializado y su fuerte dependencia de la secuencia constructiva.

Dentro de los métodos tradicionales de excavación secuencial se encuentran el método Belga o de Madrid y el método Alemán de tres galerías, ambos basados en la partición de la sección y en la ejecución progresiva de bóveda, hastiales y núcleo central. Estos procedimientos siguen empleándose en determinadas condiciones urbanas o en grandes secciones donde se prioriza la estabilidad progresiva.

MÉTODO	TERRENO HABITUAL	SECUENCIA CONSTRUCTIVA	VENTAJAS	LIMITACIONES
NATM/SEM	Rocas fracturadas, suelos competentes	Método observacional	Alta adaptabilidad	Avance moderado
Cut & Cover	Suelos superficiales	Excavación desde superficie	Económico baja profundidad	Alta afección superficial
Método Belga	Suelos cohesivos urbanos	Excavación por fases pequeñas	Seguridad elevada	Bajo rendimiento
Método Alemán	Grandes secciones	Núcleo central conservado	Control estructural	Complejidad operativa

Tabla 21. Resumen de métodos constructivos tradicionales. Fuente: Elaboración propia

### 2.8.1.1. *Nuevo Método Austriaco (NATM)*

El Nuevo Método Austriaco (NATM), denominado en numerosos contextos técnicos como Método de Excavación Secuencial (SEM), se entiende hoy más como una filosofía de diseño–construcción que como una receta constructiva cerrada. Su esencia es movilizar la capacidad resistente del terreno de forma controlada mediante una excavación por fases (cuando procede), un sostenimiento primario temprano y flexible, y un programa sistemático de instrumentación que permite ajustar el soporte según el comportamiento real del macizo. En esta lógica, la interpretación de convergencias, asentos y deformaciones del contorno se convierte en el mecanismo principal de gestión del riesgo y de la incertidumbre geológica.

El contexto histórico del método se vincula a la escuela austríaca de tunelación, y a la formalización progresiva de una filosofía que prioriza la interacción terreno–soporte frente a soluciones excesivamente “estructuralistas”. Este planteamiento se relaciona de manera natural con el marco de convergencia–confinamiento, utilizado para entender el equilibrio entre la deformación del contorno excavado y el grado de confinamiento que aporta el sostenimiento.

En el enfoque clásico, el “terreno tiende a converger hacia el hueco tras la excavación, mientras que el sostenimiento introduce confinamiento progresivo; su intersección conceptual explica el estado de equilibrio y el papel del tiempo/distancia de instalación del soporte en la magnitud final de convergencia” (Oteo, 1998)

Desde el punto de vista operativo, NATM/SEM se materializa como “un ciclo repetitivo de excavación, sostenimiento y control, cuya secuencia exacta depende del terreno, de la sección, del método de excavación (voladura o excavación mecánica) y de los requisitos de deformación admisible” (Oteo,1998). En túneles ejecutados con perforación y voladura bajo un enfoque NATM, se documenta un ciclo de producción que integra excavación, estabilización inmediata y clasificación del frente; “en un caso real en España se describe un proceso que incluye operaciones de excavación, ventilación, retirada de escombros, saneo y colocación del sostenimiento primario, junto con actividades de replanteo y evaluación geomecánica del frente” (Escobal et al., 2021).

En cuanto al sostenimiento primario, las fuentes técnicas coinciden en que su “composición típica combina hormigón proyectado, bulonado (anclajes o pernos), elementos de confinamiento superficial (malla), y en determinados casos cerchas o marcos metálicos, ajustándose en intensidad y rigidez según la respuesta del terreno” (Oteo, 1998; Gall y Munfah, s.f.). “La función del hormigón proyectado es aportar un confinamiento temprano y continuo al contorno, limitar la degradación

del frente y del contorno excavado, y proporcionar una superficie resistente para anclajes y cerchas cuando corresponda” (Oteo, 1998). “El bulonado contribuye a coser discontinuidades, mejorar la interacción bloque–matriz en roca fracturada, y formar una zona reforzada alrededor del hueco. Las cerchas o marcos se emplean cuando se requiere mayor rigidez inicial o cuando la geometría y la calidad del terreno hacen aconsejable un soporte más estructurado” (Oteo, 1998).

El NATM se distingue, no obstante, por su capacidad de incorporar “presostenimientos” en condiciones desfavorables. En la práctica SEM se emplean medidas como paraguas de tubos/micropilotes, bulones de frente y técnicas de preinyección, “cuyo objetivo es estabilizar el frente y el terreno previo a la excavación del pase, reduciendo pérdidas de confinamiento, deformaciones y riesgo de colapso local” (Oteo, 1998).

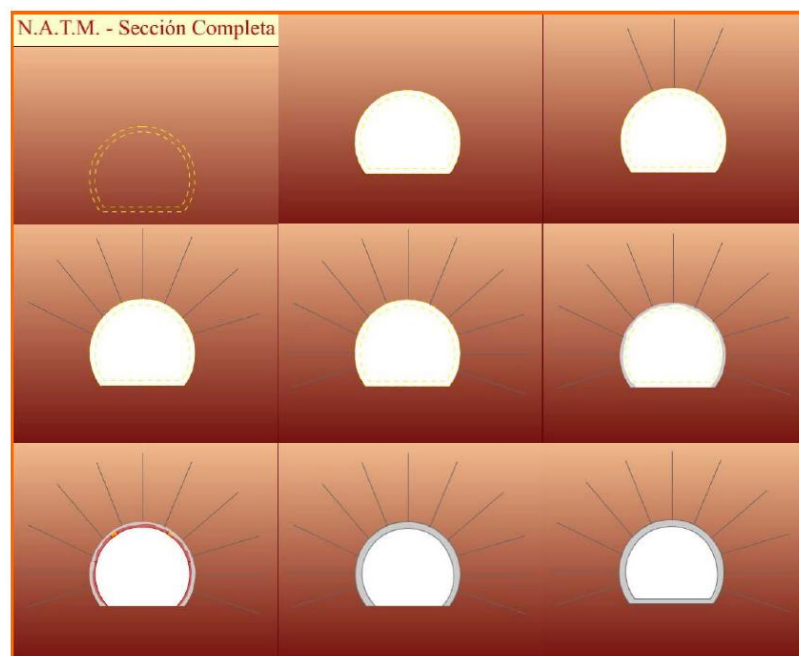


Figura 18. Procedimiento constructivo Nuevo Método Austriaco a sección completa. Fuente: Carlos Barba Ávila (2024)

El NATM/SEM exige una partición longitudinal y una partición de sección coherentes con la variabilidad geológica y con la respuesta del terreno. La partición longitudinal se define, en última instancia, como la segmentación del túnel en tramos donde las condiciones geotécnicas, hidrogeológicas y geométricas pueden considerarse suficientemente homogéneas para utilizar una misma “clase” de excavación y sostenimiento, o bien un mismo conjunto de medidas base con ajustes menores.

La partición de sección se selecciona para controlar el tamaño del frente abierto y asegurar el cierre del anillo. Conceptualmente, la “decisión de excavar a plena sección o por fases (calota, banco,

contrabóveda) depende de la estabilidad del frente y del contorno, de la necesidad de limitar asientos en superficie y de la capacidad de instalar sostenimiento primario sin retrasos” (Oteo, 1998). Un criterio defendible —y coherente con el enfoque convergencia–confinamiento— es que la longitud de pase y el grado de partición deben ser tales que el sostenimiento se instale en el “momento” necesario para limitar la convergencia a valores aceptables (Oteo, 1998).

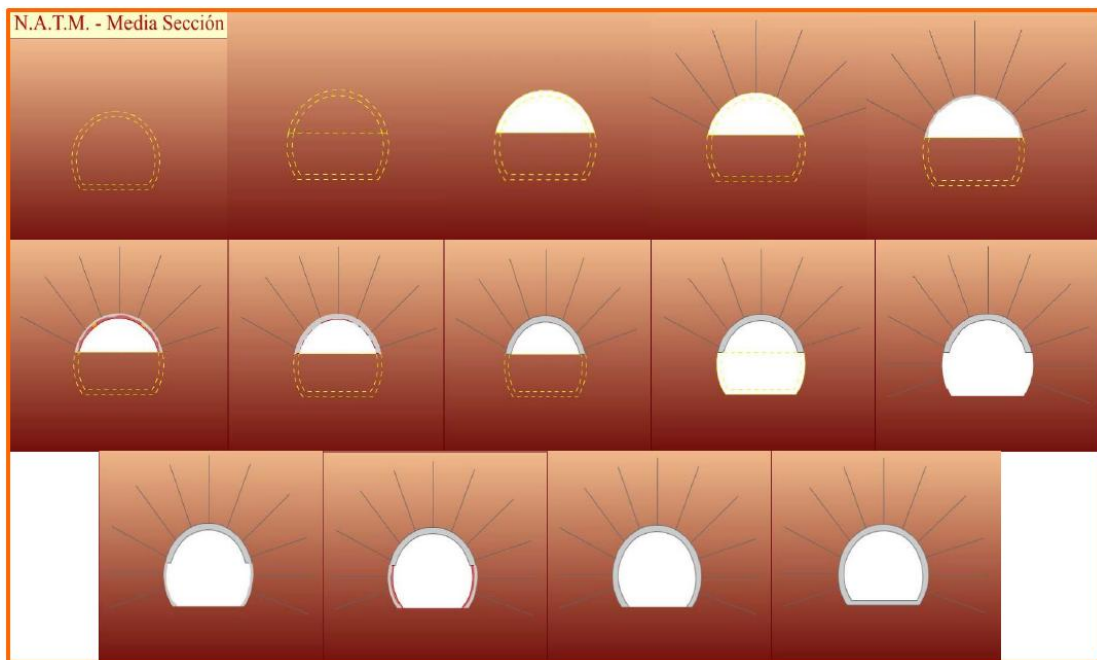


Figura 19. Procedimiento constructivo del Nuevo Método Austriaco a media sección. Fuente: Carlos Barba Ávila (2024)

El ajuste de la longitud de pase, precisamente, es una de las palancas operativas del NATM. En términos metodológicos, el “pase puede aumentarse si el comportamiento observado confirma estabilidad y convergencias reducidas; y debe disminuirse si el terreno muestra degradación, inestabilidad del frente, convergencias aceleradas o si se alcanzan umbrales de alerta/acción” (Gall y Munfah, s.f.). Este principio está implícito en la lógica observacional desarrollada en guías SEM, donde las clases de soporte se vinculan a la respuesta medida.

La ventaja principal del NATM/SEM es su capacidad para gestionar variabilidad geológica y condiciones cambiantes mediante un sostenimiento adaptable y una secuencia flexible, sustentada en instrumentación. En guías de práctica se destaca su “versatilidad en distintos terrenos y profundidades, siempre que se aplique con control y método observacional” (Gall y Munfah, s.f.).

En términos económicos, el planteamiento de deformación controlada puede inducir “diseños de sostenimiento más eficientes cuando el terreno permite movilizar parte de su capacidad autoportante, reduciendo sobredimensionamientos innecesarios” (Oteo, 1998).

Sus limitaciones aparecen allí donde la deformación admisible es extremadamente baja (entornos urbanos sensibles), donde la incertidumbre geológica es alta pero no se dispone de instrumentación y control suficientes, o donde el régimen hidráulico y la presencia de agua requiere estrategias de frente presurizado que el SEM no puede proporcionar por sí solo. Una limitación crítica, y a menudo mal tratada, es la dependencia del método de una cultura de control de calidad, auscultación e interpretación consistente.

En urbano, el NATM/SEM requiere especial cautela porque el principio de “pequeña deformación” se traduce en impacto potencial en superficie si la interacción terreno–soporte no se controla con rigor. El método sigue siendo aplicable, pero exige estrategias de presostenimiento, cierre temprano del anillo y umbrales conservadores, de forma que el objetivo deje de ser la economía por deformación y pase a ser la minimización del riesgo.

#### 2.8.1.2. Método *Cut and Cover*

“La técnica de falso túnel es un procedimiento de construcción para túneles superficiales donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupa el túnel, se construye el túnel a cielo abierto y se cubre una vez terminado” (Yepes, 2015). “Para profundidades de hasta 35–45 pies (10–14 m) este método suele ser más económico y práctico que la excavación subterránea convencional, y en túneles de metro son comunes los cortes de hasta 60 pies (18 m)” (Wilton, 1995).

Desde el punto de vista histórico, el “*Cut & Cover*” está vinculado al desarrollo del metro moderno. La “*Metropolitan Railway*” de Londres comenzó en 1860 mediante un procedimiento descrito como “*cut-and-cover methods—that is, by making trenches along the streets... and then restoring the roadway on top*” (Encyclopaedia Britannica, 2026), consolidando una lógica constructiva que todavía hoy se mantiene: apertura de zanja, ejecución estructural y restitución superficial. De forma similar, en el primer metro de Nueva York “*the contract stipulated that work proceed via cut-and-cover where possible*” (Nemo, 2024), recurriéndose a métodos en roca únicamente cuando las condiciones geológicas lo imponían. Este recorrido histórico demuestra que el método no es una solución residual, sino una técnica estructuralmente coherente cuando la excavación desde superficie es factible.

En términos constructivos, el método se materializa fundamentalmente en dos variantes:

- Excavación directa (*Bottom-up*)
- Excavación inversa (*Top-down*)

La primera de ellas es la que el “restablecimiento de la superficie se produce tras completar todas las obras, mientras que en la segunda el restablecimiento de la superficie se produce inmediatamente después de completar el primer nivel de la estructura subterránea” (ITA-AITES, s. f.). En el procedimiento bottom-up se ejecutan primero las pantallas o muros de contención, se procede al desagüe si es necesario, se excava hasta cota de solera con arriostramientos provisionales y se construye la estructura comenzando por la losa inferior. Posteriormente se ejecutan hastiales y losa superior, se impermeabiliza y se rellena hasta la rasante definitiva. Por el contrario, en el “top-down” las pantallas actúan desde el inicio como elementos estructurales definitivos, se hormigona la losa superior tempranamente y se restituye la superficie mientras la excavación interior continúa protegida bajo dicha losa, permitiendo solapar actividades y acortar plazos.

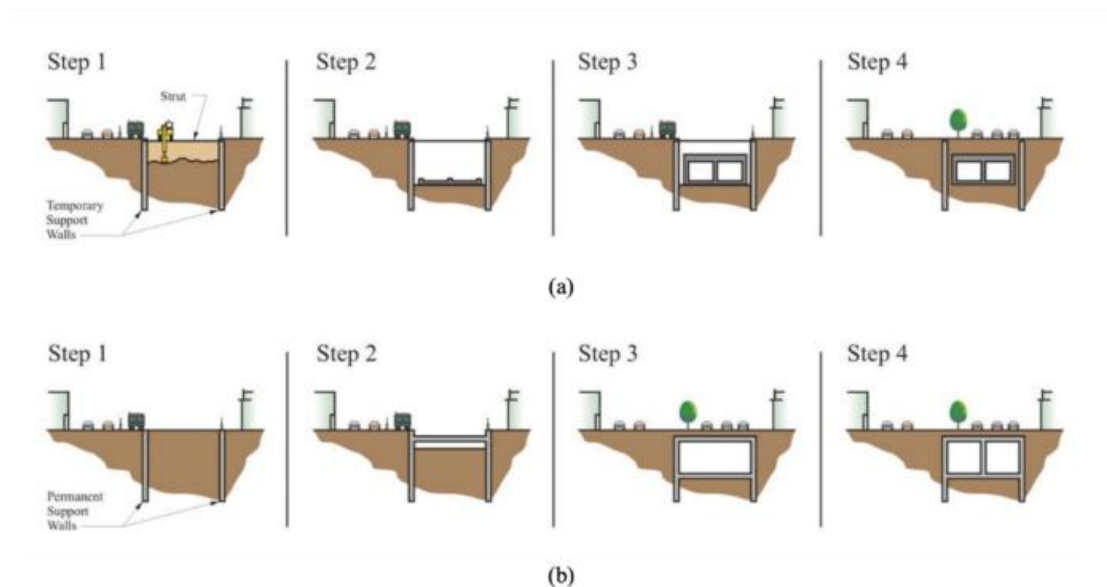


Figura 20. Fases del método Cut and Cover Arriba Bottom-Up, abajo Top-Down. Fuente: Works in Progress. (2024)

La decisión de ambas variantes no puede generalizarse, ya que “es difícil generalizar, ya que cada proyecto es único” (FHWA, 2009), pero sí puede vincularse a condicionantes como la limitación de ancho, necesidad de restaurar la superficie con rapidez o el tipo de control exigido sobre las deformaciones.

Las contenciones laterales constituyen el núcleo resistente del método. Estos se pueden clasificar en “taludes abiertos, contenciones temporales y contenciones permanentes” (FHWA, 2009). En zonas sin restricciones laterales pueden emplearse taludes; sin embargo, “en entornos urbanos

predominan soluciones verticales como tablestacas, muros de pilotes, pantallas continuas tipo y pilotes tangentes o secantes” (FHWA, 2009).

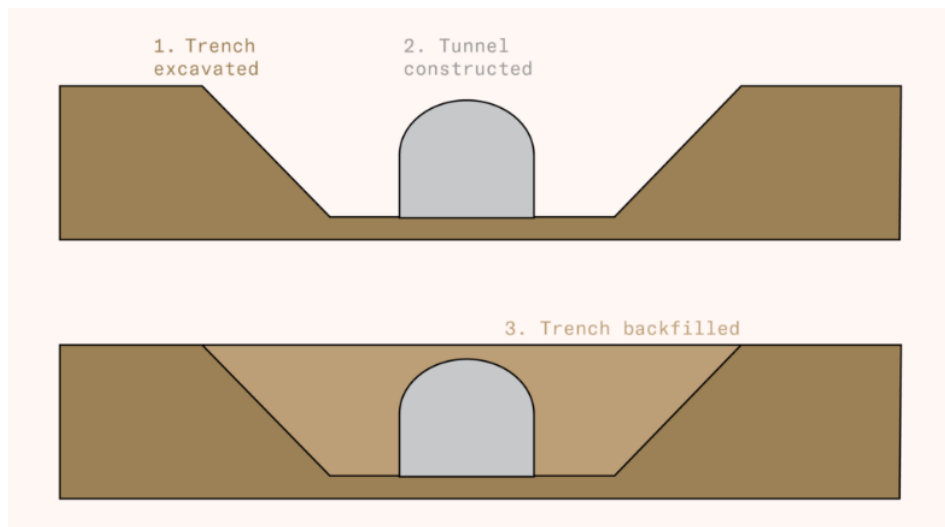


Figura 21. Proceso constructivo del método Cut and Cover. Fuente: Works in Progress (2024)

En el ámbito urbano, la interferencia con servicios constituye otro condicionante fundamental. La literatura advierte que “los túneles en entornos urbanos a menudo encuentran redes enterradas” (FHWA, 2009), lo que obliga a localizar, desviar o sustentar provisionalmente conducciones existentes. En proyectos ferroviarios españoles se recurre al falso túnel cuando la montera es insuficiente para ejecutar en mina, planteándose “pantalla de pilotes y losa superior” bajo infraestructuras existentes” (MITMA, s. f.), lo que demuestra su idoneidad como solución de cruce controlado.

La instrumentación forma parte inseparable del método. Se ha señalado que “la observación del comportamiento de las obras mediante la instrumentación se ha convertido en un aspecto de vital importancia” (Lara García, 1996), incorporando control topográfico, piezometría e inclinometría. Aunque los valores umbral dependen del proyecto concreto, la metodología exige definir límites de alerta y protocolos de actuación ante desviaciones.

### 2.8.1.3. Método clásico de Madrid – Método Belga

El denominado “Método Clásico de Madrid” es la adaptación y consolidación, en el contexto urbano madrileño, de un procedimiento tradicional de excavación en suelos comúnmente identificado como “Método Belga”. En la literatura técnica española aparece explícitamente la equivalencia terminológica al indicarse que el método clásico es “también llamado Método Belga” (Medina Rodríguez y Núñez Temes, 2002). Del mismo modo, en el monográfico de la ampliación del Metro

Madrid se precisa que el “Método Clásico de Madrid (antiguamente llamado Método Belga)” “constituye una técnica diferenciada frente a enfoques de frente abierto y frente mecanizado” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000)

Desde una perspectiva histórica, se trata de un método concebido para la excavación en suelo, con una génesis europea temprana y una posterior implantación masiva en Madrid. Esta transferencia histórica resulta coherente con el hecho de que, ya en el siglo XX, el método llegara a convertirse en una solución recurrente para túneles urbanos de baja cobertura, donde la prioridad absoluta es controlar la estabilidad del frente y limitar las deformaciones en superficie.

En Madrid, “el método se consolidó por su adecuación al subsuelo típico y por su enfoque de minimización del frente abierto, siendo el método constructivo por excelencia en el Metro de Madrid” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000). Esta condición no se entiende solo por tradición, sino por respuesta técnica a un problema fundamental de la tunelación en suelos:

- Estabilidad de frente
- Reducción del volumen excavado sin sostener

El rasgo que define el proceso constructivo es que “no se realiza a sección completa de una sola vez, sino mediante una partición muy controlada cuyo objetivo es mantener el frente abierto lo más pequeño posible y ejecutar cuanto antes un anillo resistente que estabilice el contorno” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000).

EN cuanto a las dimensiones típicas de la primera fase, “se excava un frente pequeño, inferior a los 3 m<sup>2</sup>” (Pérez Álvarez, s.f.), precisamente para que cualquier inestabilidad sea resuelta de manera inmediata con entibaciones.

La entibación constituye el corazón del método en sus fases iniciales, ya que la estabilidad del frente se logra por soporte inmediato. Esto se logra mediante “perfiles llamados “longarinas” combinados con tablas y pies derechos, configurando un sostenimiento cuajado en el avance” (Medina Rodríguez y Núñez Temes, 2002).

Una vez realizado el sostenimiento completo de la bóveda, esta se hormigona. Tras esto, la “excavación inferior (destroza) se ejecuta con un retraso respecto del frente, precisamente para no comprometer la bóveda recién ejecutada, con un retraso de 3 anillos” (Medina Rodríguez y Núñez Temes, 2002). Después, “la construcción de los hastiales se realiza por bataches con una regla esencial, no descalzar completamente la bóveda” (Núñez Peiró et al., 2025), y se explica el desfase

entre pases para asegurar que el apoyo de la bóveda nunca quede simultáneamente sin terreno o sin macizo lateral.

La fase final consiste en la “excavación y hormigonado de contrabóveda/solera y en la inyección del trasdós para eliminar huecos y reducir la vulnerabilidad hidráulica” (Pérez Álvarez, s.f.).

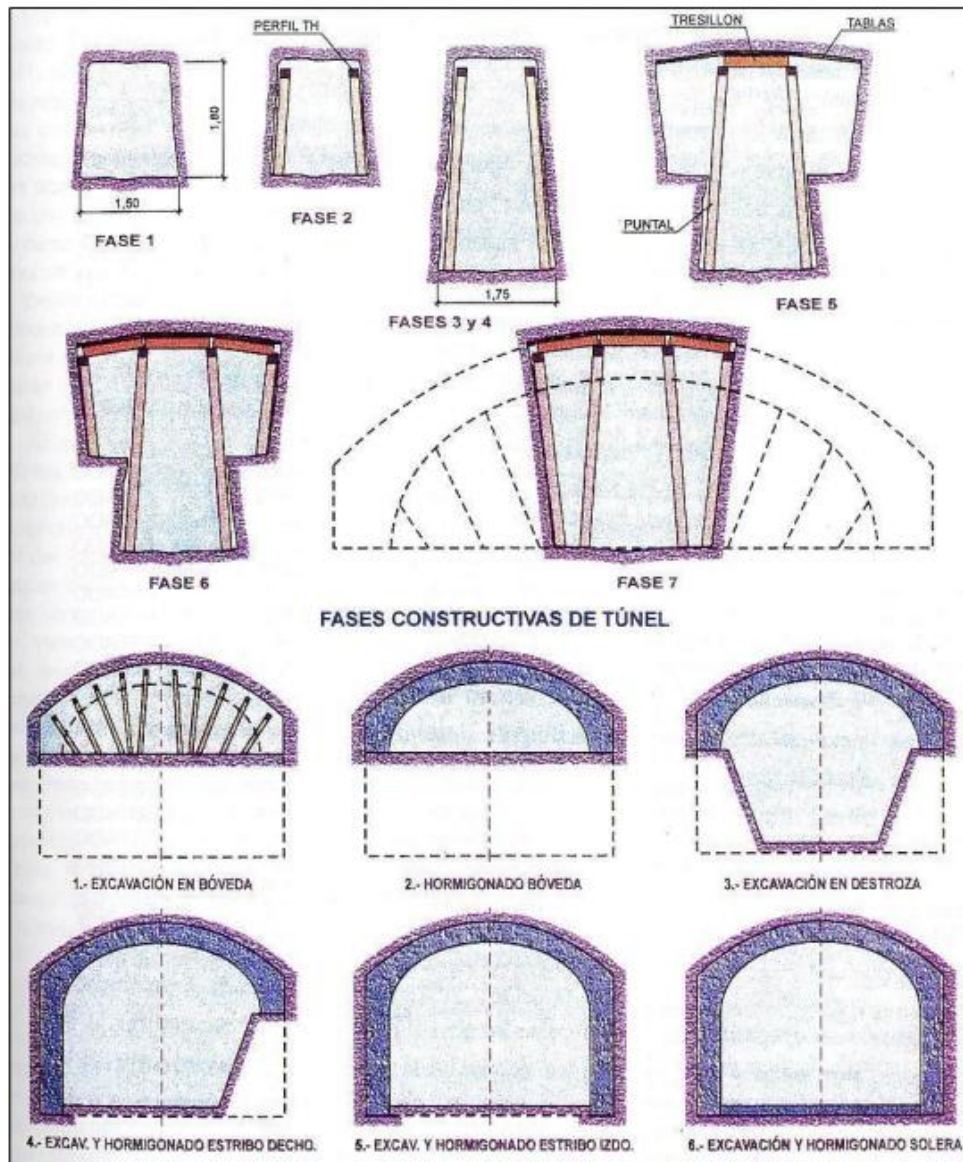


Figura 22. Proceso constructivo del Método Clásico Madrid o Método Belga. Fuente: Jordá Bordehore (2020).

El método belga/clásico de Madrid se justifica por un principio de seguridad constructiva: la estabilidad se logra reduciendo al mínimo el frente abierto sin sostener. En el caso de Madrid, esta lógica se ha usado para gestionar suelos con alternancias detríticas, yesíferas y niveles con comportamientos muy variables, donde el riesgo de colapso del frente es crítico.

“Sin embargo, su aplicación exige condiciones de terreno específicas. Un condicionante clave es que, durante la fase de bataches, parte de la bóveda puede quedar localmente descalzada, lo que obliga a disponer de un terreno con suficiente competencia para no inducir roturas o asentamientos excesivos.” (Pérez Álvarez, s.f.).

“En materia de geometría, el método se asocia a túneles de línea con luces moderadas, ya que incrementar la luz implica excavaciones excesivas en el avance y aumenta la superficie de frente abierto, anulando precisamente la ventaja principal de la técnica” (Pérez Álvarez, s.f.).

Las desventajas derivan directamente de la misma filosofía. La primera es la productividad: es un método intrínsecamente secuencial y con fuerte componente artesanal. Se califica como un método “de rendimientos reducidos y se cuantifica que permite avances entre 30 y 50 metros al mes con avances del orden de 2,5 m” (Pérez Álvarez, s.f.) La segunda desventaja es la dependencia crítica de personal especializado y del trabajo manual: se señala que la “necesidad de excavar con medios manuales y el elevado número de personal especializado condicionan la viabilidad de plazo” (Núñez Peiró et al., 2025).

Una tercera limitación, relevante en suelos con presencia de agua o en ambientes geológicamente agresivos (por ejemplo, yesos con riesgo de lixiviación), es “la interacción entre entibación, juntas y drenaje. En un estudio específico sobre túneles en terrenos salinos se afirma que el método belga tiene el inconveniente de que se crean una zona de alta permeabilidad” (Rodríguez Ortiz y Rodríguez Jurado, 2011).

Por último, desde la perspectiva evolutiva del método, este pierde peso frente a las soluciones mecanizadas, especialmente EPB en entornos urbanos, por motivos obvios de rendimientos y estandarización industrial. Aun así, no desaparece, se reubica como método preferente cuando la tuneladora no resulta viable.

#### 2.8.1.4. *Método Inglés*

El método inglés se trata de un procedimiento histórico de excavación de túneles, desarrollado y difundido ampliamente durante los siglos XIX y XX, principalmente en suelos con cierta cohesión, cuya característica era la excavación a sección completa en longitudes muy cortas, seguida de la ejecución del revestimiento definitivo.

Aunque hoy en día tenga un uso residual frente a otros métodos mecanizados o el NATM, se trata de una referencia técnica de gran valor, que sirve para entender cómo se gestionaba la estabilidad antes de la consolidación del hormigón proyectado y la instrumentalización moderna.

En la clasificación clásica de métodos convencionales, se asocia a un tipo de excavación “en mina, con gran dependencia del sostenimiento temporal de madera, siendo creado en Inglaterra para suelos como arenas y areniscas” (UNAM,2013), siendo su rasgo distintivo “el avance a sección completa del túnel, en una única operación” (UNAM, 2013) distinguiéndose de otros métodos como el belga / Madrid, donde la excavación se hace por fases para reducir el frente abierto.

Se trata de un método constructivo que se apoya en un principio estructural – constructivo sencillo, excavación de una longitud de avance breve, a sección completa, que se estabiliza mediante un sistema de entibaciones y puntales, de modo que la traza puede mantenerse estable hasta ejecutar el revestimiento definitivo. Este método chocaba con los que se utilizaban en la época, que “construyen la estabilidad por compartimentación y cierre temprano del arco” (Prelini, 1912), lo que prioriza un avance con la sección abierta, haciendo el sostenimiento de forma definitiva más adelante.

En cuanto al sostenimiento provisional, el método inglés requiere un armazón temporal que combina elementos longitudinales y puntales.

Por último, el orden de ejecución del revestimiento definitivo “primero se ejecuta, la contrabóveda, después los hastiales y finalmente la bóveda” (Prelini, 1912). Este procedimiento contrasta con el Método Belga / Madrid, que prioriza la ejecución de la bóveda para proteger la excavación interior, en este caso, el sostenimiento de la parte superior de la excavación queda bajo la capacidad portante del terreno y de la entibación.

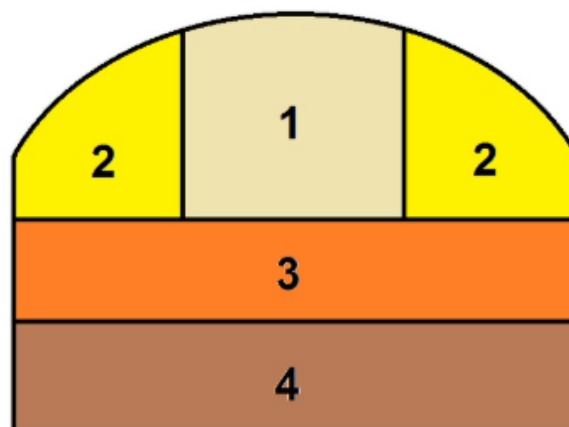


Figura 23. Fases del proceso constructivo del método inglés. Fuente: Yepes (2016)

Este método, como se ha mencionado anteriormente, basa su sostenimiento en entibaciones y puntales, lo que conlleva un uso intensivo de madera. Esto se traduce en dos consecuencias

técnicas, “una mano de obra especializada para garantizar el contacto y apriete del sostenimiento, y la segunda, la sensibilidad del método a la calidad del material y a la ejecución, dado que la estabilidad depende de las entibaciones durante periodos significativos” (Prelini, 1912).

Aunque el método inglés se desarrolló en una época previa a la instrumentación moderna, su aplicación contemporánea —si se diera— exigiría un sistema de auscultación alineado con los riesgos dominantes: asientos, deformaciones laterales, y cargas en puntales. No obstante, desde una lectura técnica defendible, el control mínimo en un entorno urbano o sensible debería incluir: nivelación topográfica de superficie (asientos), control geométrico y convergencia de la sección excavada (topografía interior), y monitorización de desplazamientos en estructuras cercanas.

En cuanto a las ventajas y limitaciones, como se ha podido observar, las limitaciones vienen con la evolución moderna, la sensibilidad de los materiales y la ejecución de los apuntalamientos. Desde una perspectiva geotécnica, tiene aplicación en arenas y areniscas. En “suelos blandos y saturados, donde el asiento debe ser mínimo, la técnica queda claramente superada por métodos que reducen el frente abierto y permiten el cierre temprano del contorno” (UNAM, 2013). En ciudades, además, la presencia de servicios enterrados y estructuras próximas eleva considerablemente el riesgo y el coste de control.

Como ventaja se puede valorar el hecho de reducir el número de juntas existentes y la continuidad estructural. Por otro lado, en el periodo de auge de este método, se simplificaban los acarrees de estructuras la ausencia de izado en vertical.

En la actualidad ha quedado reducido a un método clásico con valor didáctico para conocer el avance de la tecnología en obras subterráneas de desarrollo lineal.

#### 2.8.1.5. *Método Alemán*

Dentro del conjunto de métodos no mecanizados, semi-mecanizados o “clásicos” para obras subterráneas de desarrollo lineal, el método alemán se define por la partición de sección mediante galerías auxiliares, ubicadas en los hastiales, y por la decisión de conservar el núcleo central del terreno hasta que el contorno resistente principal – hastiales y bóveda – estén ejecutados. Este método se utiliza en “terrenos muy malos o luces relativamente grandes, superiores a los 8 metros, estableciendo así su ámbito típico de uso, grandes secciones y condiciones geotécnicas desfavorables” (Pérez Álvarez, s.f.)

Este método puede interpretarse como una respuesta y posterior adaptación a las limitaciones que presentaban los métodos belga / Madrid cuando la luz crece o el terreno no permite descalces

significativos. Mientras el método belga prioriza la bóveda temprana mediante una pequeña galería en clave, el alemán traslada la prioridad a los apoyos laterales y “compra” estabilidad manteniendo el núcleo central hasta poder cerrar la bóveda con apoyo seguro. “Esta inversión de orden es precisamente la característica que lo hace relevante en cavernas de estación y grandes cámaras, donde la pérdida de control de asientos diferenciales puede ser crítica en entorno urbano” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000; Pérez Álvarez, s. f.). La filosofía del método se apoya en tres ideas esenciales:

- Control estructural del contorno mediante los apoyos laterales
- Conservación del núcleo central como elemento de confinamiento
- Reducción de asientos diferenciales

El método “consiste en la conservación del núcleo central (destroza) hasta que los muros y la bóveda están completados, como si fueran “tres galerías”, donde el núcleo se mantiene hasta que hastiales y bóveda están terminados” (Pérez Álvarez, s. f.). Este mecanismo busca limitar deformaciones del terreno durante las fases más vulnerables, evitando que la bóveda se ejecute apoyada sobre un terreno todavía deformable o parcialmente descalzado.

El proceso constructivo del método alemán puede describirse, como una secuencia de ejecución que transforma una gran sección en un sistema estable, mediante galerías y bataches. apoyándonos en la imagen que se muestra, el orden de fases es:

1. Hastiales: Fases 1 y 2.
2. Costillas: 4
3. Bóveda: 3
4. Destroza: 5

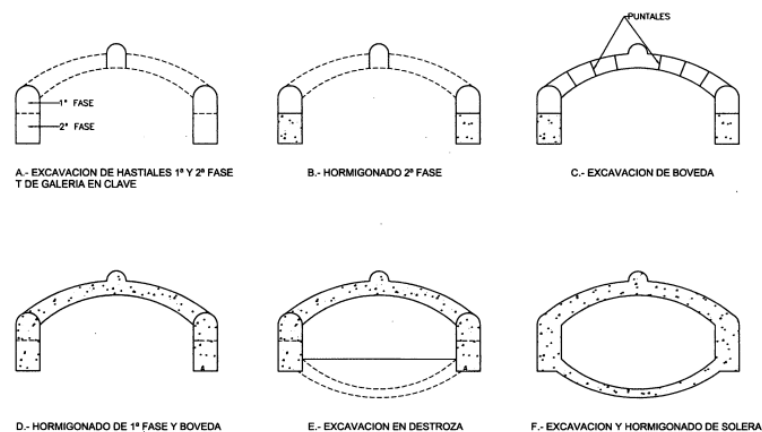


Figura 24. Fases del proceso constructivo del método alemán. Fuente: Melis Maynar (2000)

El proceso comienza con la ejecución de dos galerías laterales, generalmente en la base o en los laterales inferiores de la futura cámara/túnel, que permiten hormigonar progresivamente los hastiales por fases o bataches. “El trabajo por bataches alternos es coherente con los procedimientos clásicos de control: evita descalzar simultáneamente ambos lados y permite que el terreno conserve confinamiento parcial durante la construcción de los apoyos” (Pérez Álvarez, s.f.).

Una vez consolidados los hastiales, se ejecuta una galería de clave (o un sistema de ataque en coronación) para construir la bóveda. En esta fase, el hecho decisivo es que “la bóveda se apoya sobre los hastiales ya terminados, lo que reduce la incertidumbre respecto al asiento del apoyo y permite una lectura más controlada del sistema resistente. En cavernas de gran luz, la bóveda puede ejecutarse por tramos o “costillas” en sucesión, apoyándose en cerchas y encofrados” (Pérez Álvarez, s.f.).

El sostenimiento de este método se apoya en dos niveles: soporte temporal durante excavación (cerchas, encofrados, hormigón proyectado si se adopta una variante más moderna) y el revestimiento definitivo de hormigón armado de hastiales y bóveda, ejecutado por fases. En las “galerías laterales iniciales, el soporte suele organizarse para permitir el hormigonado por bataches de los hastiales. Ello implica una combinación de excavación controlada, apoyo provisional y encofrado/armadura del muro, con juntas entre bataches que deben tratarse con cuidado para garantizar continuidad estructural e impermeabilidad” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000).

En el caso de las costillas y bóveda, el método suele “apoyarse en cerchas y sistemas de encofrado para bóveda, con armaduras y hormigonado posterior, y que el presostenimiento (paraguas, inyecciones) se aplica cuando el terreno lo exige” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000).

En tramos urbanos, se debe valorar la interacción del método con sistemas de contención externos cuando existen estructuras cercanas o se ejecutan bajo zonas críticas, pudiendo coexistir con pantallas o pilotes. Estas necesidades no vienen anexas al proceso constructivo, sino que pueden darse en proyectos concretos donde surjan esas necesidades.

La elección de este método constructivo se justifica “con una sección grande o una cavidad de estaciones ferroviarias, con grandes luces y dimensiones, además de cuando no se puede garantizar el control de asientos o estabilidad durante la ejecución de la bóveda en primer lugar” (Pérez Álvarez, s.f.). Por lo tanto, el método alemán es preferible frente al belga cuando la sección es grande y no conviene ejecutar la bóveda apoyada en terreno malo o no consolidado, y preferible frente al

NATM cuando “la estrategia de deformación controlada no es compatible con la sensibilidad urbana o con la rigidez temprana” (Melis Maynar y Trabada Guijarro, 2000).

En presencia de suelos saturados, se le atribuye una robustez mayor por la capacidad de mantener el núcleo central aislado, al ejecutar los apoyos rígidos y bóveda, antes de comenzar con la destroza.

Aunque “resulta más costoso y lento, resulta más seguro ante malas condiciones del terreno y empujes” (Pérez Álvarez, s. f.). Esta idea puede ser la síntesis de las ventajas que tiene el método frente a otros, junto con la estabilidad y el control de asentamientos en grandes luces, derivado del apoyo y ejecución de los hastiales en primer lugar.

Por el contrario, la multiplicidad de fases y frentes de excavación requieren de una mayor mano de obra y coordinación, además de un elevado número de juntas de hormigonado y posibilidad de interferencias entre las operaciones.

### **2.8.2. Métodos mecanizados**

Los métodos mecanizados integran en una unidad operativa las funciones de excavación, transporte de material y, en muchos casos, colocación del revestimiento. Se caracterizan por el avance continuo o cíclico mecanizado y por un mayor grado de industrialización del proceso.

Dentro de la categoría se incluyen:

- Perforación y voladura
- Rozadoras
- Tuneladoras abiertas (TBM gripper), escudos simples y dobles
- Tuneladoras EPB (*Earth Pressure Balance*)
- Tuneladoras de presión de lodos (*Slurry Shield/Hydro Shield*)

Aunque tradicionalmente se asocia a métodos convencionales, la perforación y voladura constituye un sistema mecanizado por ciclos. Se basa en la perforación sistemática del frente mediante equipos hidráulicos, carga de explosivos y fragmentación controlada del macizo. Es especialmente eficaz en roca competente y se emplea frecuentemente en combinación con métodos secuenciales como el NATM. Su principal limitación es el carácter discontinuo del avance y la generación de vibraciones.

Las rozadoras son equipos mecanizados de ataque puntual que permiten excavación continua en rocas de resistencia media o baja. No son tuneladoras de sección completa, pero constituyen sistemas mecanizados eficaces en túneles de sección variable o galerías técnicas.

La ventaja principal de los métodos mecanizados radica en su elevado rendimiento y control geométrico, especialmente en proyectos de gran longitud. Su principal condicionante es la elevada inversión inicial y la necesidad de homogeneidad geotécnica suficiente para justificar su implantación.

Las tuneladoras representan el máximo grado de mecanización. Excavando a sección completa, pueden clasificarse en:

- TBM abiertas (*gripper*): destinadas a roca competente.
- Escudos simples: adecuados para suelos estables.
- Doble escudo: para terrenos mixtos o fracturados.
- EPB: para suelos cohesivos con control activo de presión.
- *Slurry / Hydroshield*: para suelos granulares y condiciones de alta presión freática.

SISTEMA	TIPO DE TERRENO	TIPO DE AVANCE	REVESTIMIENTO HABITUAL	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL
Perforación – Voladura	Roca competente	Cíclico mecanizado	Hormigón proyectado / bulones	Alta fragmentación controlada
Rozadora	Roca media – blanda	Continuo	Hormigón proyectado	Adaptabilidad geométrica
TBM Gripper	Roca dura	Continuo	Bulones / Dovelas	Alto rendimiento en roca
TBM Escudo Simple	Suelos estables	Continuo	Dovelas	Protección estructural
TBM Escudo doble	Terreno mixto	Continuo	Dovelas	Flexibilidad geológica
EPB	Suelos cohesivos	Continuo presurizado	Dovelas	Control activo de frente
<i>Slurry / Hydro Shield</i>	Suelos granulares saturados	Continuo presurizado	Dovelas	Estabilidad bajo el agua

Tabla 22. Resumen de métodos constructivos mecanizados. Fuente: Elaboración propia.

### 2.8.2.1. Perforación – Voladura

La perforación y voladura es un método de excavación en el que se ejecuta un patrón de taladros – generalmente con jumbo – se cargan con explosivos y se detonan conforme a una secuencia de

retardos para producir la rotura del macizo, generando un escombro y una nueva zona de avance. “Su empleo se ha asociado históricamente a la construcción de túneles ferroviarios y carreteros en roca; la evolución reciente no ha eliminado el método, sino que lo ha integrado como parte de ciclos de trabajo en otros métodos constructivos” (Pérez Álvarez, s.f.).

El carácter lineal de este tipo de obras hace que la comparación con otros métodos mecanizados sea habitual. “En túneles de gran longitud y geometría repetitiva, la tuneladora desplaza a este método; sin embargo, cuando se exigen cambios de sección, accesos limitados, tramos cortos o geologías heterogéneas, la perforación y voladura mantiene su ventaja competitiva” (Pérez Álvarez, s.f.). En este tipo de casos, se trata de una solución robusta, aunque deben controlarse técnica y administrativamente los impactos ambientales como vibraciones, ruidos y gases.

El fundamento físico de la perforación y voladura es la fracturación del macizo inducida por la energía liberada por el explosivo. La rotura se explica, desde un punto de vista conceptual, por la “combinación de ondas de choque y presión de gases que generan tensiones superiores a la resistencia del material, provocando fisuración y desprendimiento controlado del volumen entre taladros” (UNAM, 2013; Pérez Álvarez, s. f.). En términos de diseño, el objetivo no es “romper más”, sino romper lo suficiente y donde interesa: lograr una fragmentación adecuada para el desescombro, mantener el perfil geométrico dentro de tolerancias y minimizar los efectos adversos sobre el entorno y sobre el propio sostenimiento.

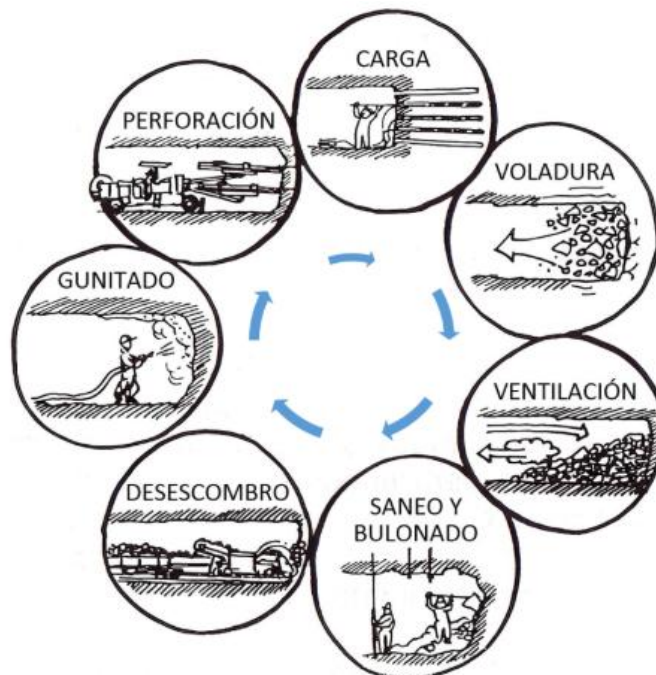


Figura 25. Fases del ciclo de perforación y voladura. Fuente: Yepes (2023)

La perforación y voladura se organiza en un ciclo repetitivo, en el que el avance se materializa tras cada voladura, que se resume en “carga, voladura, ventilación, saneo y bulonado, desescombro, gunitado y perforación” (Escobal et al., 2021).

En términos generales, el ciclo se inicia “con el replanteo del patrón de perforación y la ejecución de taladros. A continuación, se realiza la carga (explosivo y sistemas de iniciación), se verifican conexiones y se procede a la detonación. Tras la voladura se ejecuta ventilación y control de gases antes de reingresar al frente; se retira escombro (*mucking*) y se realizan operaciones de saneo (*scaling*) para eliminar bloques sueltos. La estabilización se completa con el sostenimiento primario —comúnmente bulonado y hormigón proyectado, y en ocasiones cerchas— y, si procede, con el sostenimiento secundario o definitivo en fases posteriores” (Escobal et al., 2021)

Como todos los procesos constructivos, este se puede adaptar en función de la sección y el entorno. En el caso de grandes secciones, “se puede ejecutar por fases, empleando galerías de avance, destrozadas laterales y/o banqueo de suelo” (Yepes, 2023).

Este método constructivo debe llevar asociado un control de efectos. En primer lugar, las vibraciones que condicionan la viabilidad del método en entorno urbanos o con infraestructuras sensibles. Debe tenerse en cuenta “los perfiles irregulares y la alteración del macizo rocoso remanente puede ser intensa si las voladuras no se disparan empleando técnicas de contorno en el perímetro” (Yepes, 2023), por lo tanto, debe llevar asociada en todo momento un sostenimiento. En estos casos, el coste de los sostenimientos puede ser más elevado que para otros métodos como las tuneladoras, debido al perfil irregular que queda tras la voladura.

Desde el punto de vista de seguridad, la gestión del riesgo incluye un plan de voladura, control estricto de explosivos, procedimientos de aviso y exclusión, verificación de conexiones, tiempos de espera, y protocolos de reingreso tras ventilación.

Este método constructivo compite frente a las TBM o rozadoras. El principal criterio para la elección frente a estos métodos es “la relación entre geología, geometría, longitud, acceso y restricciones urbanas. En macizos rocosos con cambios litológicos frecuentes, fallas o variabilidad de calidad, la flexibilidad del ciclo de voladura y la capacidad de adaptar sostenimiento y secuencia puede resultar ventajosa” (Pérez Álvarez, s. f.). También lo es cuando la sección no es circular o cuando el túnel incluye ensanchamientos, cavernas o cambios de geometría que penalizan la continuidad de una TBM (Pérez Álvarez, s. f.). En cambio, en túneles muy largos y homogéneos, la condición de ciclo discontinuo y la necesidad de gestionar vibraciones y ventilación pueden hacer menos competitiva

la solución frente a TBM, especialmente en entornos urbanos donde el control de vibraciones y el impacto social es determinante (UNAM, 2013).

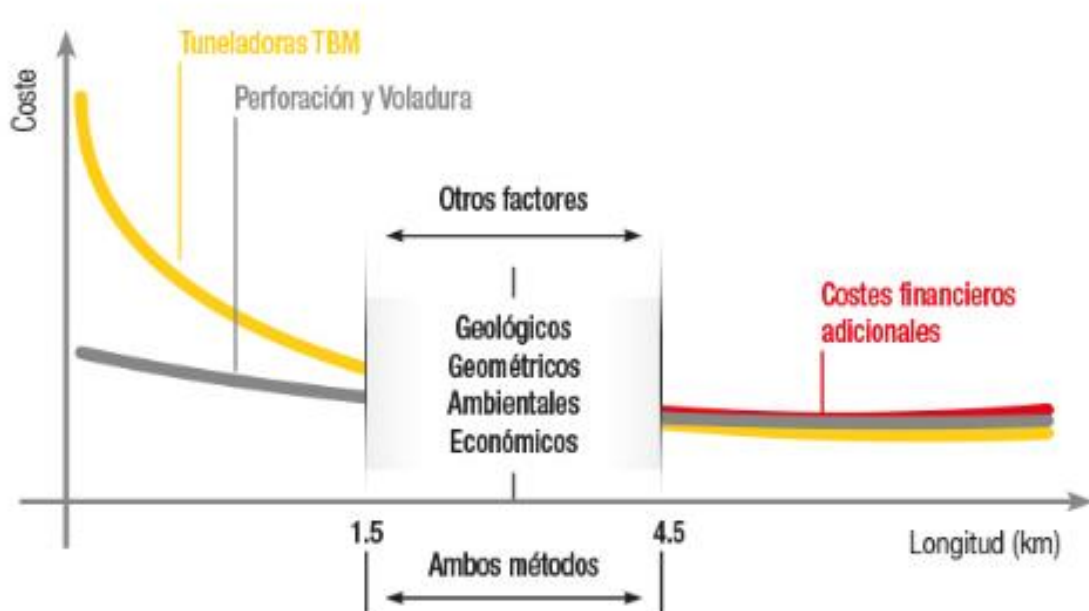


Figura 26. Costes según la longitud de túnel excavado. Fuente: Yepes (2023)

Entre las ventajas del método destacan la adaptabilidad al terreno, la posibilidad de múltiples frentes por accesos intermedios, la tolerancia a variación de sección, y la facilidad para implantar un enfoque observacional con sostenimiento inmediato en roca.

Entre las limitaciones se encuentran: control de vibraciones y ruido, sobreexcavación y mayor variabilidad geométrica, dependencia de ventilación tras voladuras, y restricciones administrativas y de seguridad asociadas al manejo de explosivos.

#### 2.8.2.2. Rozadoras

Las rozadoras son máquinas excavadoras diseñadas para túneles y galerías mediante un ataque puntual. Tal como lo sintetiza Torija (2012), “las rozadoras, también denominadas minadores en el sector extractivo, son máquinas de excavación que desarrollan el proceso de arranque mediante una cabeza giratoria provista de herramientas de corte de metal duro –picas– que inciden sobre la roca, montada sobre un brazo articulado o extensible; y cuentan además con un sistema de recogida y transporte de escombros desde el frente hacia la parte posterior de la máquina”. Por concentrar todo el esfuerzo de corte en un único cabezal, se les llama “de ataque puntual”: “la potencia total del motor de corte y el peso de la máquina se concentran en una única punta cortadora, lo que le permite arrancar rocas de elevada resistencia” (Torija, 2012).

El corte con rozadora se basa en el impacto y acción cortante de las picas sobre la roca o suelo. La cabeza, al girar, introduce las picas en el frente, produciendo zonas de fractura por compresión local y tracción en la grieta iniciada. En la práctica, el frente se ataca tanto en la parte superior como inferior (según diseño de la máquina y sistema de transporte); en algunos modelos el corte inicial se realiza de arriba abajo para facilitar la recolección de escombros, mientras en otros se puede optar al revés.

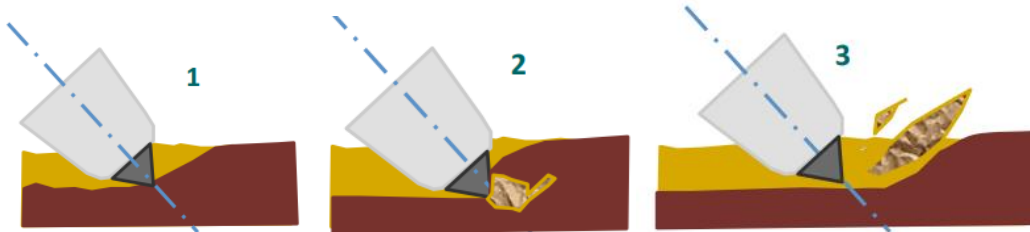


Figura 27. Funcionamiento de la rozadora. Fuente: Pérez Álvarez (s.f.)

La fragmentación depende de la dureza y estructura del macizo: en materiales cohesivos, pero no plásticos, el impacto crea clivajes y pedazos arrancados. Para manejar esta acción se utilizan picas de carburo de tungsteno de alta resistencia al desgaste. Con el avance continuo en túneles y minería, se han introducido “nuevas generaciones de herramientas de corte basadas en aleaciones especiales de carburo de tungsteno, nuevos sistemas de refrigeración de picas, nuevos procesos de corte con velocidades de giro de cabezales menores”

En cuanto al útil de corte, “las rozadoras pueden equiparse con cabezas de corte de distintos tipos según la sección a excavar. Existen principalmente dos diseños geométricos de cabezales: transversales y longitudinales. En un cabezal transversal, el eje de rotación es perpendicular al brazo cortador, de manera que las picas recorren toda la anchura de la galería con cada giro. En un cabezal longitudinal, el eje de rotación es paralelo al brazo o al eje del túnel, lo que genera un corte más focalizado sobre una parte de la sección” (Torija, 2012). Algunos modelos permiten incluso intercambiar fácilmente entre cabezales transversales y longitudinales para adaptarse al terreno.

La operación con rozadoras sigue un ciclo repetitivo de actividades que debe planificarse minuciosamente. En primer lugar, “la maquinaria se suele transportar desmontada al frente de trabajo, debido a su peso y restricciones de gálibo. Generalmente las excavadoras rozadoras son llevadas al frente de trabajo desarmadas por la dificultad que implica bajarlas al túnel ya armadas” (García Córdova, 2018). Una vez en el frente, se ensambla la unidad (montaje de chasis, brazo cortador, cabezal y convoy de bandas, etc.) y se ubica la máquina para optimizar el flujo de escombros hacia las cintas o vehículos de acarreo. La puesta en marcha del ataque exige posicionar

el cabezal cerca del frente: la máquina se sitúa de modo que se faciliten las maniobras de rezaga (transporte de escombros).

**PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN TÚNEL CON ROZADORA (DIAGRAMA SECUENCIAL)**

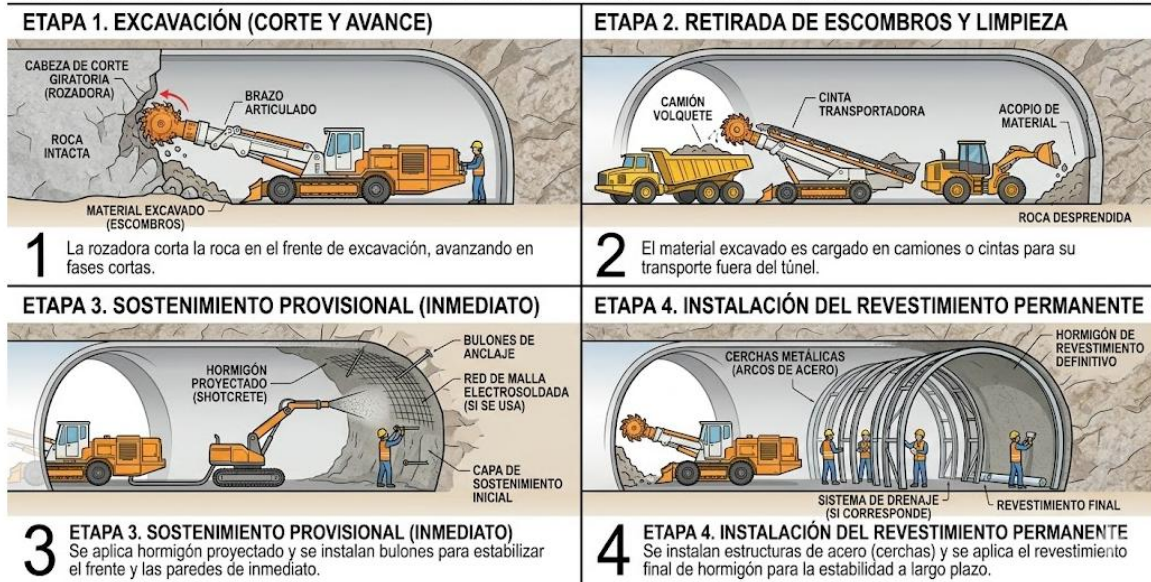


Figura 28. Proceso constructivo de un túnel mediante rozadora. Fuente: Elaboración propia.

Durante la fase de excavación, “el operador acciona la rotación del cabezal y los movimientos hidráulicos del brazo para labrar el frente de forma sistemática. El corte puede realizarse parcial o totalmente en sección plena; en túneles de altura limitada a menudo se procede en tramos, primero se avanza la parte superior o calota y luego la inferior - bench o destroza- manipulando el cabezal entre cada puesto” (García Córdova, 2018).

En máquinas con convoy de banda integrado, las picas depositan el detritus directamente en la banda. En caso contrario, se emplean palas cargadoras o camiones internos para evacuar la rezaga. El trecho excavado se suele limitar para permitir aplicar un sostenimiento provisional: una vez completada una longitud de avance, se detiene la máquina, y el frente queda preparado para instalar bulones, malla electrosoldada y/o hormigón proyectado. Según el caso, tras cada ciclo puede usarse hormigón proyectado o dovelas temporales hasta el refuerzo definitivo. Finalmente, la máquina se mueve hacia adelante y reinicia el ciclo.

La selección de una rozadora exige evaluar la geología de manera rigurosa. En general, “no deben emplearse en materiales plásticos ni saturados, pues se obturan. El material no debe estar en estado plástico o muy húmedo, pues esto traerá dificultades para el uso de la maquinaria” (García Córdova, 2018). Sin embargo, si en el frente se requieren múltiples galerías piloto o bancadas sucesivas (como

en algunas cavernas con excavación escalonada), las rozadoras pierden eficacia: “no se considera lógico el uso de las rozadoras, pues se impide el ataque simultáneo de todas las secciones; se recomienda entonces el uso de explosivos... o excavación manual” (García Córdova, 2018). Otros factores limitantes son la abrasividad (que acelera desgaste de picas) y la presencia de agua, filtraciones fuertes pueden embarrancar el cabezal.

El suelo debe ceder el corte del tipo impactante; la experiencia muestra que materiales muy frágiles o con numerosas capas laminadas pueden fragmentarse mejor con voladura. En resumen, las rozadoras son idóneas en macizos homogéneos, de mediana dureza, sin excesiva agua, donde pueden avanzar sin atascarse; fuera de ello, su uso es cuestionable.

Frente a una tuneladora (TBM), la rozadora ofrece mayor flexibilidad geométrica: puede adaptarse a radios pequeños y ajustar su configuración (corte, brazo, anillos provisionales) de manera más versátil. Su inversión inicial es mucho menor que la de una TBM, y no requiere fases de montaje tan elaboradas. Además, al excavar por impacto no produce vibraciones fuertes ni riesgo de sobrepresiones de aire, lo que favorece la seguridad en entornos urbanos. Sin embargo, su avance es sensiblemente más lento en roca dura, y el método exige un mantenimiento más frecuente.

En comparación con la perforación y voladura (P&V), la rozadora evita los impactos sísmicos y la compleja logística de explosivos, pero no logra la misma velocidad en terrenos muy competentes ni puede controlar tan finamente la forma resultante sin reperfilados.

En práctica, “la decisión se basa en aspectos geotécnicos (resistencias y fracturación), económicos (costo de equipo vs duración de obra) y logísticos (accesibilidad del frente). Utilizar rozadora o TBM es cuestión de un riguroso “análisis técnico-económico” del proyecto” (Torrija, 2012)

### 2.8.2.3. *Topos (TBM gripper), escudo simple y escudo doble*

Las tuneladoras constituyen un conjunto de equipos de excavación a plena sección capaces de integrar en un mismo tren de trabajo todo el ciclo necesario para realizar la excavación:

- Excavación
- Evacuación de escombros
- Colocación de sostenimiento o revestimiento

Dentro de este conjunto de herramientas nos encontramos con los topos – TBM de gripper – escudo siempre o escudo doble o telescópico. Existen otro tipo de tuneladoras o TBM (Tunnel Boring

Machine) que están enfocadas en otro tipo de terrenos menos competentes o suelos, que se mencionaran en siguientes apartados.

En lo que nos compete, se va a llevar a cabo el análisis de tres tipologías claves dentro de las obras subterráneas de desarrollo lineal, cuyo campo de actuación está en los macizos rocosos.

La familia denominada “topos” se asocia a TBM de roca que avanzan mediante “una cabeza de corte con discos y un sistema de empuje cuya reacción se logra por anclaje lateral sobre el propio macizo” (FHWA, 2009). El topo se orienta a “rocas medias o duras y su avance combina par de giro y empuje longitudinal, valiéndose de grippers apoyados directamente sobre el terreno” (Pérez Álvarez, s. f.). [1] El manual FHWA “concreta la idoneidad geotécnica del “open gripper-beam” indicando que este tipo es adecuado para roca “stable to friable” con “occasional fractured zones” y “controllable groundwater inflows” (FHWA, 2009).

En cuanto al procedimiento operativo, el ciclo del topo se describe como una secuencia repetitiva de empuje–corte–retirada de escombros–regrip. En el esquema, “la cabeza giratoria, equipada con discos, fractura el frente mientras los cilindros de empuje transmiten la carga; el sistema gripper se bloquea contra las paredes para reaccionar el empuje; el escombros es recogido por cucharas o “muck buckets” y transferido a una cinta; al final de la carrera, la máquina reconfigura apoyos (piernas traseras, retracción de cilindros y reposicionamiento de grippers) para iniciar un nuevo ciclo” (FHWA, 2009). Esta lógica, aunque simplificada, es metodológicamente clave: el rendimiento real se ve condicionado por tiempos de regrip, cambio de cortadores, mantenimiento y logística de escombros.

El equipamiento del topo no es solo la cabeza de corte, el tren posterior concentra potencia, servicios y logística. El tren posterior “constituido por los elementos posteriores que arrastra la máquina en su avance, tales como transformadores, carretes, captadores de polvo, ventilación, polipastos... o sistemas de evacuación de escombros” (Pérez Álvarez, s. f.), lo que justifica que la selección de método no pueda desvincularse de trazado, pendientes, radios, logística de abastecimiento y evacuación.

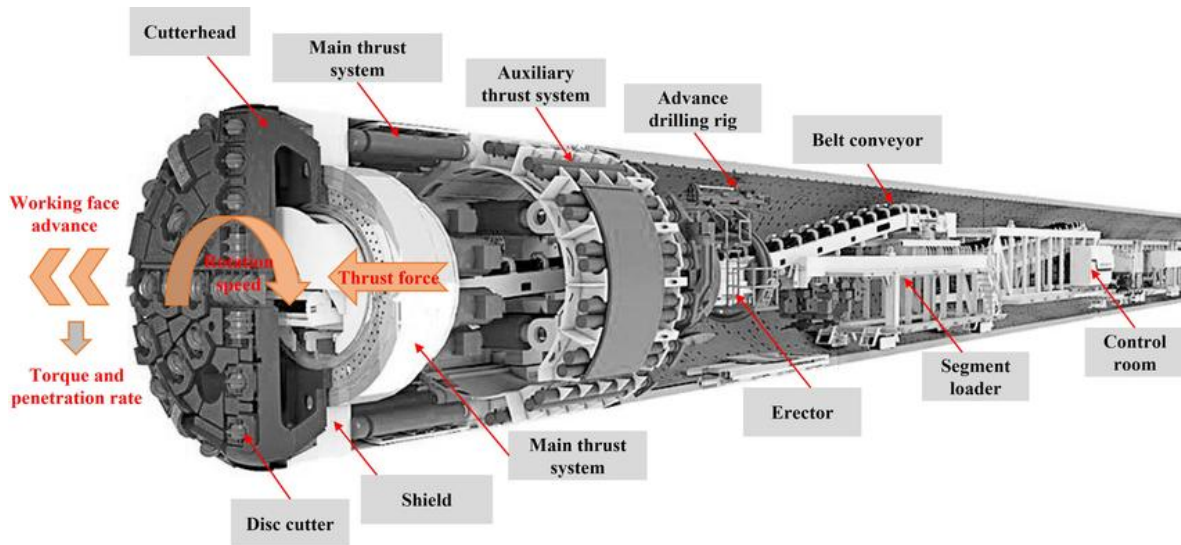


Figura 29. Partes de una tuneladora (TBM Gripper). Fuente: Wang (2023)

En cuanto a los sostenimientos, gran parte de los elementos de soporte pueden compatibilizarse con el uso de TBM en roca, como por ejemplo “bulonado, spiling/forepoling, preinyección, cerchas/anillos metálicos, hormigón proyectado y revestimiento segmental prefabricado” (FHWA, 2009)

En balance, el topo presenta ventajas competitivas en roca competente al generar un menor impacto al macizo que otros métodos, como puede ser la voladura, pero en contraposición, el tamaño completo de la maquinaria reduce su productividad en tramos con curvatura y cambios de sección.

A nivel geotécnico, la roca debe soportar la reacción de los grippers, y su protección es limitada frente a inestabilidades o agua, si no se complementa con sostenimientos y medidas de control.

En terrenos donde el macizo es menos competente, se pasa de un TBM gripper a una tuneladora de escudo simple, y en caso necesario a doble escudo.

Se define que el escudo “consiste en un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel y sirve para resistir la presión del terreno mientras el revestimiento se va construyendo dentro de esta protección” (De la Vega García, 2014). Este planteamiento explica por qué los escudos se asocian a suelos de baja estabilidad o a trabajos urbanos donde el control de deformaciones y asentamientos es crítico.

En cuanto a la estructura del escudo “se caracteriza por tres zonas, el extremo delantero reforzado donde se produce la excavación, una zona intermedia donde se aloja la maquinaria de empuje y

control y un faldón trasero, diseñado para soportar el túnel durante el montaje de los segmentos del revestimiento” (De la Vega García, 2014)



Figura 30. Tuneladora de escudo simple. Fuente: ITA (s.f.)

El procedimiento operativo del escudo se organiza por ciclos alternos de avance y montaje de anillos. “Terminado el avance, se limpia la plantilla dentro del faldón trasero del escudo, para poder proceder al montaje del revestimiento primario de las dovelas, que se instalan mediante un brazo erector de accionamiento hidráulico. La misma secuencia incorpora la retracción progresiva de los gatos, conforme se ensambla el anillo y el cierre mediante tornillería entre las dovelas y el anillo interior” (De la Vega García, 2014). Una vez finalizado, se inicia un nuevo ciclo, de forma que no existe simultaneidad entre el avance y el sostenimiento, dependiendo de la eficacia del cambio la productividad y de la logística de dovelas y mortero del trasdós.

En el caso específico de TBM de roca con escudo simple, se describe la “Single Shield TBM” como “una máquina con escudo abierto (cara no presurizada) para roca más frágil o roca blanda, avanzando mediante cilindros hidráulicos que empujan sobre el último anillo de dovelas, mientras el escombros se recoge y traslada mediante sistemas de transporte” (FHWA, 2009). Esta descripción permite justificar que el concepto de “escudo simple” se usa tanto en suelos (con muchas variantes, incluidas presurizadas) como en roca (escudo no presurizado), manteniendo la idea común de protección estructural y reacción del empuje sobre el revestimiento.

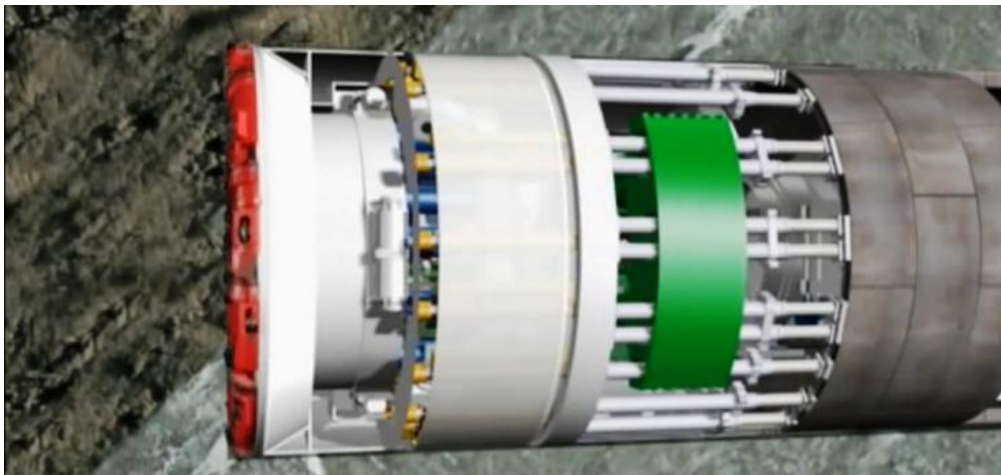
La contrapartida de esta filosofía es doble. Por un lado, aparecen exigencias potentes de logística y control de calidad del revestimiento: suministro, almacenamiento, colocación de dovelas, y el relleno del trasdós. Por otro, se incrementa la dependencia de la continuidad de suministro y de la

gestión de incidencias en el frente o en la zona trasera, ya que la máquina no puede seguir avanzando si el anillo no queda cerrado y el empuje no puede reaccionarse con seguridad.

Desde una perspectiva metodológica, el escudo simple es altamente útil cuando el terreno requiere un soporte constante y cuando el control de deformaciones es más determinante que la flexibilidad geométrica.

La segunda de las alternativas, las tuneladoras de doble escudo, se trata de una solución a la limitación productiva del escudo simple “que permite simultanear las fases de excavación y colocación del sostenimiento, con lo que se incrementarán de forma notable los rendimientos” (Pérez Álvarez, s. f.).

La tuneladora cuenta con una serie de implicaciones geométricas y de riesgo: por su constitución, “su longitud viene a ser el doble de cualquiera de los escudos y la máquina ha de afrontar como principal riesgo el poder quedar atrapada” (Pérez Álvarez, s. f.). Este riesgo no es anecdótico, condiciona el proyecto de accesos, rescate, posibilidad de desmontaje en caverna y estrategias de presostenimiento.



*Figura 31. Frente de ataque de una tuneladora de doble escudo. Fuente: Yepes (2015)*

Este tipo de máquinas cuentan en la actualidad con un control de procesos e instrumentalización interna, “hoy en día el seguimiento de la operación de la TBM se registra a través de sensores y dispositivos instalados en puntos clave para medir, registrar y almacenar datos operacionales durante el avance, articulándose mediante un sistema de Control de Procesos con el cual se pueden llegar a realizar análisis en tiempo real y post proceso con la finalidad de controlar, detectar y modificar los parámetros” (Pat Padilla, 2019).

Los parámetros internos típicos para registrar incluyen el empuje total y por cilindro, par de la cabeza, velocidad de rotación, tasa de penetración/avance, consumo de potencia, presiones hidráulicas, tiempos de ciclo, variables de transporte de escombros y, en máquinas presurizadas, presión de cámara y variables asociadas al tornillo o circuito de lodos. Todos estos parámetros dependerán del diseño de la tuneladora, condiciones geológicas geométricas de las obras, no disponiendo de unos valores o rangos objetivos.

Cuando estas obras se llevan a cabo en entornos urbanos o servicios sensibles, el esquema de instrumentalización se endurece, incluyendo control de asentamientos y movimientos de estructuras dentro del ámbito de la zona de influencia, además de convergencias o deformaciones del túnel debido a las acciones exteriores.

En cuanto al criterio de selección de este tipo de máquinas no puede atender únicamente a motivos tecnológicos, sino que debe estar basado en un análisis multicriterio que integra "geotecnia, hidrología, geometría, plazos, logística y riesgos" (FHWA, 2009). En comparación con perforación y voladura/NATM, la tunelación mecanizada aporta industrialización, regularidad geométrica y reducción del daño inducido al macizo, pero reduce la flexibilidad ante cambios abruptos si el diseño de la máquina y la logística no contemplan contingencias.

Estas tipologías no deben presentarse como "alternativas cerradas", sino como familias tecnológicas con modos de operación y exigencias logísticas distintas. La decisión correcta emerge cuando se conectan explícitamente: el mecanismo de reacción del empuje (grippers vs anillos), la estrategia de sostenimiento y revestimiento (bulonado/hormigón proyectado/cerchas vs dovelas), el control del frente (presurizado o no) y el sistema de medición y control que permite, por lo tanto, "controlar, detectar y modificar los parámetros sobre una base de datos operativa y objetivos de referencia" (Pat Padilla, 2019).

#### 2.8.2.4. EPB

Los escudos EPB (Earth Pressure Balance) son máquinas tuneladoras de presurización total del frente, indicadas para terrenos blandos con poca roca y saturados. Su distintivo es el uso del suelo excavado como medio de soporte, "el material excavado y el agua del terreno forman una mezcla plástica con la que se estabiliza el frente de excavación, y es extraída mediante un ciclo sin fin, siendo su principal uso obras en entornos urbanos o próximas a ciudades" (Escobar, 2006).

Esta máquina está diseñada para excavar manteniendo activa la presión en el frente equivalente a la presión del suelo, para evitar colapsos. En la práctica, "el cabezal de corte gira y perfora el suelo.

El suelo excavado es empujado hacia atrás por el avance de la cabeza, entrando en la cámara de corte. Para mantener estable el frente, se debe controlar su presión, actuando el tornillo sin fin como válvula de presión ajustable” (Escobar, 2006)

La clave operativa, como se ha podido intuir anteriormente es la presión del frente, que se mide constantemente mediante manómetros hidrostáticos. El objetivo de este es mantener igual la presión de la EPB a la existente en el suelo. Para ello, la válvula sin fin funciona como una válvula variable. A mayor velocidad de giro, más material fluye hacia fuera, disminuyendo la presión interna; al reducir la velocidad de giro, aumenta la resistencia del suelo.

Para el acondicionamiento del material en la máquina, se utilizan espumas o polímeros que se inyectan en la cabeza de corte, que penetran en el suelo, rompen la cohesión y generan un material más homogéneo, estas mezclas se denominan “lodos balanceados” y su viscosidad se ajusta para contener el frente.

El funcionamiento y puesta en marcha de la EPB se divide en fases. En primer lugar, el montaje inicial de la tuneladora, que llega a obra y se monta por secciones.

En la fase de arranque, la tuneladora aplica presión hidráulica gradual con los gatos de empuje y gira lentamente la cabeza, iniciando la perforación del frente mientras los tornillos sin fin trabajan a baja velocidad. “Se vigila la densidad del lodo, ajustando la espuma y bentonita inyectada en la cabeza, para acondicionar el suelo de la cámara” (Ramos, 2013). Este material es extraído por las cintas y vagones.

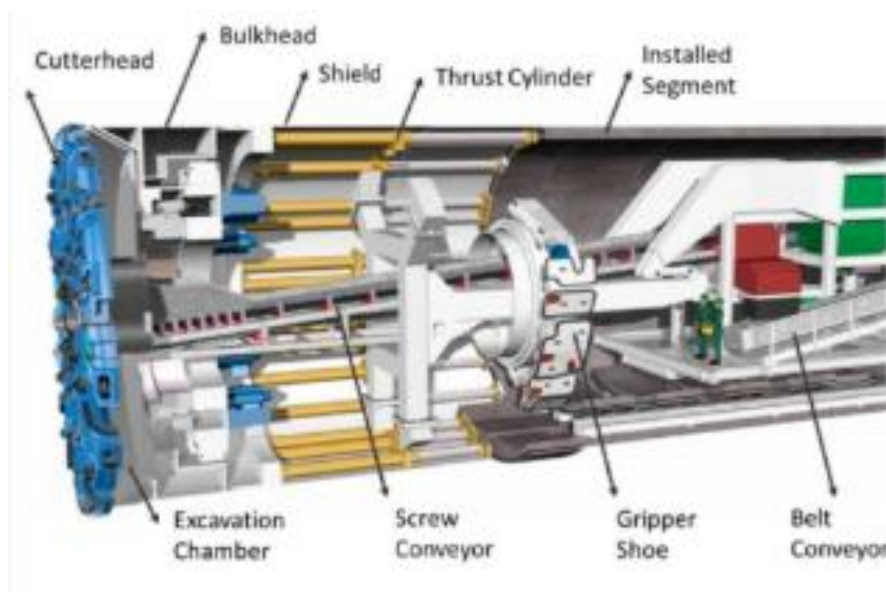


Figura 32. Partes de una EPB. Fuente: Fu et al. (2022)

La idoneidad geotécnica constituye el factor determinante en la selección de tuneladoras de tipo EPB (*Earth Pressure Balance*). Este sistema se emplea preferentemente en suelos blandos con cierta cohesión natural, capaces de ser excavados, mezclados y acondicionados hasta adquirir un comportamiento plástico que permita mantener la estabilidad del frente mediante presión interna controlada. “Resultan especialmente adecuados los terrenos finos o mixtos con contenido arcilloso suficiente para conferir cohesión, como arcillas blandas a medias, limos cohesivos y suelos limoso-arenosos que puedan estabilizarse mediante el uso de aditivos espumantes o polímeros” (Ramos, 2013).

Desde el punto de vista hidrogeológico, es imprescindible que el terreno presente una permeabilidad baja o moderada. “La capacidad del sistema EPB para mantener la presión de equilibrio en el frente depende de que el material excavado pueda comportarse como un medio plástico relativamente impermeable. En suelos con elevada permeabilidad o flujo significativo de agua subterránea, la presión aplicada tendería a disiparse rápidamente, comprometiendo la estabilidad del frente y el control de los asentos” (Ramos, 2013).

Las condiciones críticas asociadas al empleo de EPB “incluyen la presencia de nivel freático elevado, que obliga a mantener presiones internas superiores a la presión hidrostática para evitar entradas de agua y desestabilización” (Escobar, 2006). Asimismo, la resistencia del suelo debe situarse dentro de un rango compatible con la excavación mecánica continua: terrenos excesivamente sueltos y no cohesivos dificultan la formación del tapón plástico en la cámara, mientras que materiales demasiado competentes o rocosos superan la capacidad de corte eficiente del sistema. En contextos muy heterogéneos, la transición frecuente entre materiales puede generar problemas de control operativo.

Las tuneladoras de tipo EPB presentan una serie de ventajas que explican su amplia implantación en entornos urbanos y en suelos blandos o cohesivos. En primer lugar, su principal fortaleza radica en el mantenimiento de un frente activo presurizado, lo que permite “equilibrar las tensiones del terreno y reducir significativamente los asentos diferenciales en superficie. Este control continuo del equilibrio de presiones constituye un elemento clave en zonas urbanas sensibles, donde la deformación admisible es limitada” (García, 2018).

Asimismo, el sistema EPB posibilita una excavación continua, eliminando las interrupciones propias de los ciclos de perforación y voladura. Esta continuidad operativa mejora la regularidad del avance y reduce las perturbaciones dinámicas en el entorno. A diferencia de los métodos que emplean

explosivos, el EPB trabaja mediante corte mecánico, lo que minimiza vibraciones, proyecciones y riesgos asociados a detonaciones, incrementando la seguridad global del proceso constructivo.

No obstante, el sistema presenta también limitaciones que deben ser consideradas en la fase de selección tecnológica. El rendimiento puede verse comprometido en suelos de elevada resistencia, donde disminuye la eficiencia de corte, “o en materiales excesivamente plásticos, en los que el control del equilibrio reológico resulta complejo. La operación exige una elevada especialización técnica, dado que requiere una calibración precisa de presiones, velocidades y caudales de aditivos, así como una gestión logística continua de materiales acondicionadores” (Ramos, 2013).

En comparación con otros métodos constructivos, el EPB ocupa una posición intermedia claramente definida. Frente a una TBM abierta de roca (gripper) o voladuras, el EPB sacrifica capacidad de penetración en materiales competentes a cambio de un control efectivo del frente en suelos blandos. Una tuneladora abierta sin sistema de confinamiento no podría excavar terrenos granulares o arcillosos sin riesgo de colapso del frente.

#### 2.8.2.5. *Slurry Shields*

Una tuneladora *Slurry Shield* constituye un tipo de TBM de frente presurizado diseñado para la excavación en suelos granulares inestables y en condiciones de presencia significativa de agua subterránea. A diferencia de las tuneladoras EPB (*Earth Pressure Balance*), en las que la presión del frente se equilibra mediante el propio material excavado previamente acondicionado, las *Slurry Shield* utilizan un fluido externo —generalmente una suspensión bentonítica— como medio activo de estabilización. En la cámara de excavación se inyecta de forma continua lodo bentonítico, el cual se mezcla con el material arrancado por la cabeza de corte, generando una suspensión densa cuya presión se controla hidráulicamente. Esta suspensión “se mantiene a presión para estabilizar el terreno del frente” (Escobar, 2006), permitiendo equilibrar la presión intersticial y evitar fenómenos de colapso o sifonamiento en arenas y gravas saturadas.

La filosofía central es la presurización del frente con lodo. Se bombea bentonita desde el *backup* hasta la cámara de corte, mezclándose allí con el suelo excavado. El objetivo es “igualar la presión hidrostática del agua del suelo con la presión ejercida por la mezcla de lodo, logrando así estabilidad” (Escobar, 2006). “Se inyectan lodos bentoníticos en la cámara de la cabeza, de manera que este lodo forma con el material excavado una mezcla viscosa que se mantiene a presión para estabilizar el terreno del frente” (Escobar, 2006). Mientras el cabezal gira y corta el suelo, se mantiene siempre una inyección de lodo para llenar el hueco creado. La mezcla cargada de tierra

fluye por gravedad o por succión hacia las tuberías de extracción. “A diferencia del método EPB (que usa tornillo para extraer la tierra), en la *Slurry Shield* el lodo fluye al exterior impulsado por bombas de desagüe” (Escobar, 2006). Esto permite excavar suelos de granulometría amplia (arena gruesa, gravilla) donde un EPB tendría dificultades. El lodo mantiene el frente activo, evitando asentamientos locales. El suministro continuo de lodo exige bombas de alta presión y un sistema de inyección y dosificación.

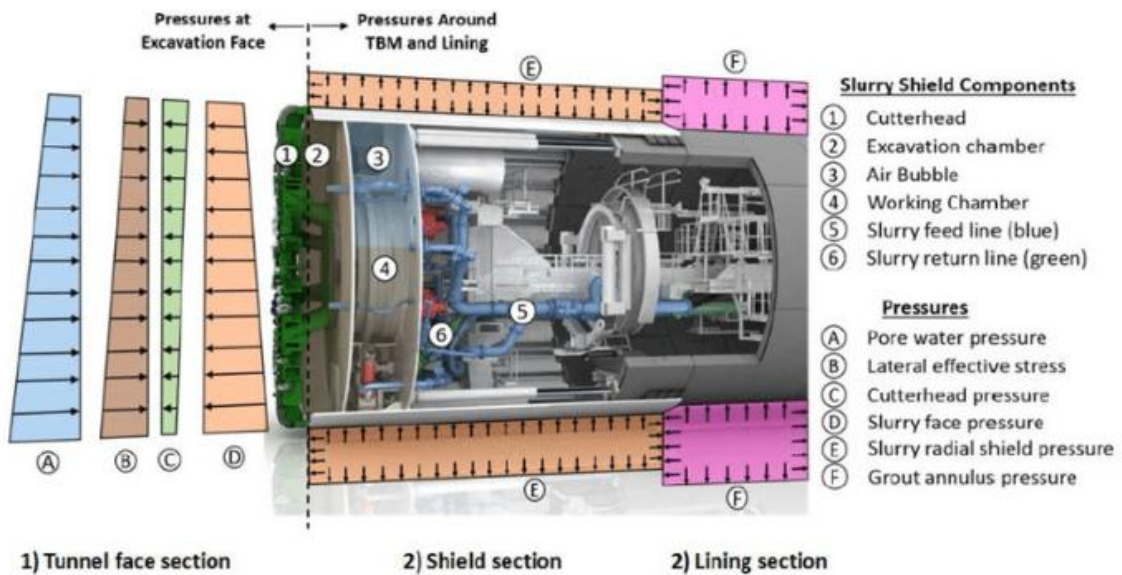


Figura 33. Esquema de la Slurry Shield TBM y componentes de presión. Fuente: Zili Li, et al. (2015)

La operación de la *Slurry Shield* se desarrolla mediante un proceso secuencial en el que integran el montaje de la máquina, la puesta en carga del circuito hidráulico y el ciclo continuo de excavación y revestimiento, todo ello bajo un estricto control de parámetros de presión y caudal.

En la primera fase se realiza el montaje inicial en el pozo de ataque o emboquille. La máquina se introduce de forma modular y se ensamblan progresivamente la estructura completa para comenzar a funcionar.

Una vez finalizado el montaje estructural, se procede a la carga del circuito de lodos y a la fase de carga de lodos y la presurización. El sistema se llena con suspensión bentonítica, y antes de iniciar la excavación, la cabeza de corte va girando lentamente sin avance para verificar la estabilización del frente.

El ciclo de excavación comienza cuando los gatos hidráulicos impulsan la tuneladora mientras la rueda de corte gira y fragmenta el terreno. El material excavado se mezcla inmediatamente con el lodo inyectado, formando una suspensión que se acumula en la cámara frontal. Esta mezcla es

aspirada por bombas de alta capacidad y conducida hacia la planta de separación. Durante esta fase, el equilibrio de presiones es fundamental: se monitorizan de forma continua la presión en la cámara frontal, el caudal de bombeo, el par de giro del cabezal y el empuje de los cilindros hidráulicos. El avance suele realizarse en incrementos controlados, deteniéndose periódicamente para la colocación del revestimiento.

“Tras completar la longitud correspondiente a un anillo de avance, la máquina se detiene para proceder al montaje de las dovelas prefabricadas en la parte posterior del escudo. De manera simultánea, se inyecta lechada de relleno en el espacio anular comprendido entre el terreno excavado y el revestimiento, garantizando el contacto estructural y evitando vacíos” (FHWA, 2009). Finalizada esta operación, se restablece la presión en la cámara frontal y se reinicia el ciclo de excavación.

“Este tipo de máquina resulta especialmente adecuado cuando el nivel freático es elevado y el terreno está constituido por materiales granulares susceptibles de colapso inmediato en ausencia de confinamiento, como arenas limosas, gravas finas, limos arenosos o depósitos aluviales saturados” (Escobar, 2006). En estas condiciones, el lodo bentonítico presurizado actúa como medio de sostenimiento activo, compensando la presión de poro y evitando fenómenos de sifonamiento o inestabilidad del frente.

Desde el punto de vista económico, “las *Slurry Shield* se justifican principalmente en túneles de longitud considerable y diámetros medios o grandes, donde la inversión inicial se amortiza mediante la continuidad y seguridad de avance” (FHWA, 2009).

En terrenos mixtos, donde coexisten fracciones arcillosas y arenosas la selección entre este tipo y las EPB deben basarse en la proporción predominante y el comportamiento esperado. En términos generales, cuando predomina la fracción granular y la permeabilidad es significativa, la solución de *Slurry Shield* suele ofrecer mayor seguridad; cuando existe cohesión suficiente y un suelo que puede comportarse como medio plástico, pueden valorarse las EPB.

#### 2.8.2.6. *Hidro Shields*

Una hidroescudo “son tuneladoras que emplea lodos tixotrópicos para garantizar la estabilidad del frente, con un sistema de conducción del escombros por vía húmeda mediante bombeo. Estas máquinas surgieron en los años sesenta para resolver el problema de la presurización de los frentes de excavación en materiales no cohesivos” (Yepes, 2020).

Los hidroescudos operan bajo el concepto de equilibrio hidráulico del frente. “Se mantiene una presión de lodo en la cámara frontal que iguala o supera la presión de agua del terreno. Durante la excavación, el cabezal rotatorio corta el suelo y simultáneamente se inyectan lodos que penetran en las grietas, formando una mezcla homogeneizada” (Escobar, 2006). Esta mezcla genera una presión contraria que evita el derrumbe. Se diferencia del EPB en que el soporte del frente proviene exclusivamente del fluido, no del suelo cementado; y se diferencia del *Slurry* convencional en que el hidroescudo suele diseñarse para presiones aún mayores y a menudo incorpora presiones de agua adicionales.

La ejecución con un hidroescudo se desarrolla mediante un proceso cíclico basado en el control hidráulico continuo del frente y en la alternancia entre excavación y colocación del revestimiento.

En una primera fase se realiza el montaje de la máquina en el pozo de arranque, ensamblando la rueda de corte, la cámara frontal presurizada, las conducciones de lodo y la planta provisional de separación. Paralelamente se instalan los sistemas auxiliares de transporte de material y dosificación de bentonita.

A continuación, el circuito se llena con lodo bentonítico y se procede a la presurización inicial. Se comprueba la estanqueidad del sistema y se ajusta la presión de trabajo para garantizar la estabilidad del frente antes de iniciar el avance.

El “ciclo de excavación comienza con la rotación del cabezal y el empuje progresivo de la máquina. El terreno excavado se mezcla con el lodo y es transportado hacia la planta de tratamiento, donde se separan los sólidos y se recircula el fluido limpio. Durante esta fase, el flujo y la presión se mantienen constantes para asegurar el equilibrio hidráulico” (Yepes, 2020).

Una vez alcanzada la longitud correspondiente a un anillo, se detiene la excavación y se instalan las dovelas del revestimiento en la parte posterior del escudo. De forma simultánea, se inyecta lechada para rellenar el espacio anular y garantizar el contacto con el terreno.

Finalizada esta operación, se restablece la presión en la cámara frontal y se reinicia el avance, repitiéndose el ciclo. En todo momento se mantiene la protección hidráulica del frente, evitando que quede sin soporte durante las transiciones entre fases.

El hidroescudo se selecciona “principalmente en terrenos altamente permeables y saturados, donde la estabilidad del frente depende de un control hidráulico continuo. Resulta especialmente adecuado en arenas y gravas situadas bajo el nivel freático, materiales poco cohesivos en los que

un sistema sin soporte presurizado podría provocar colapsos inmediatos” (Mendaña y Martínez, 2011). En estos casos, el lodo bentonítico permite equilibrar la presión de poro y garantizar la estabilidad durante la excavación.

Desde el punto de vista geotécnico, “los suelos más favorables son aquellos de granulometría media a gruesa, con baja plasticidad y suficiente permeabilidad para permitir la circulación del lodo. No obstante, las partículas no deben ser excesivamente grandes, para evitar obstrucciones en las tuberías, ni extremadamente finas, ya que una alta proporción de finos dificulta la decantación y el tratamiento del lodo” (Mendaña y Martínez, 2011). En presencia dominante de arcillas muy blandas o limos cohesivos, suelen valorarse soluciones tipo EPB, mientras que en terrenos rocosos o arcillas duras el hidroescudo no resulta adecuado.

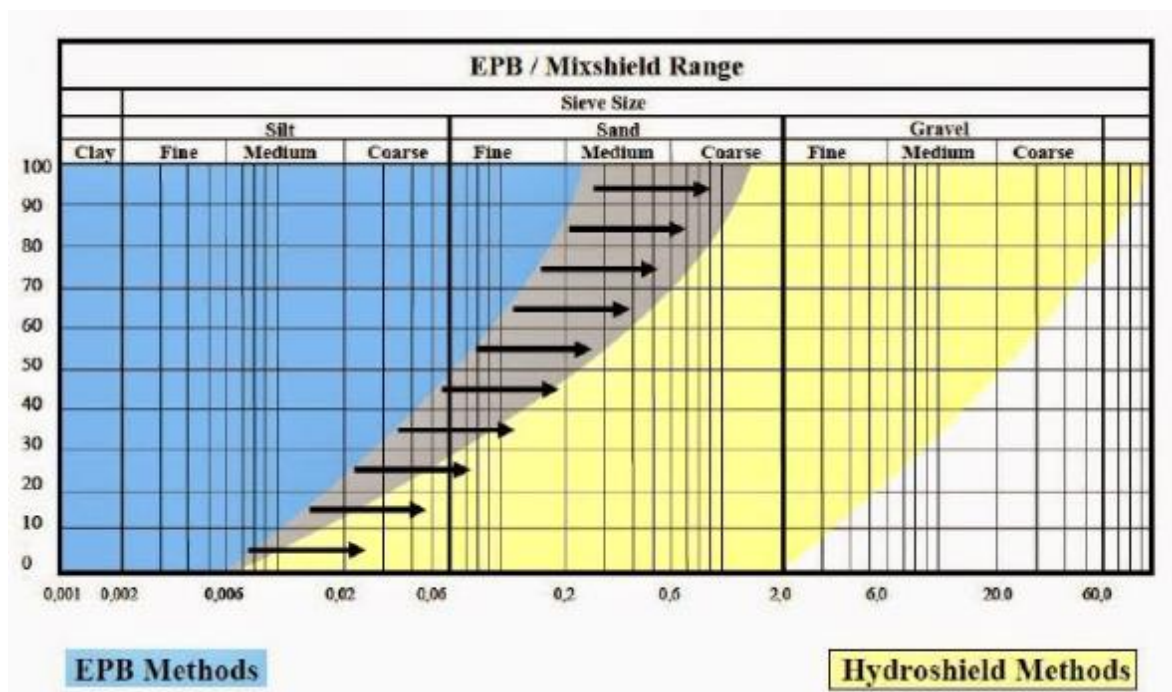


Figura 34. Campo de aplicación de los escudos. Fuente: Mendaña y Martínez (2011)

Entre los criterios fundamentales de selección destacan la permeabilidad y la presión de poro, que condicionan el nivel de presión hidráulica necesario en la cámara frontal; la granulometría del terreno, determinante para el funcionamiento de la planta de separación; y la longitud y diámetro del túnel, ya que este sistema se justifica económicamente en excavaciones de cierta entidad, generalmente de gran desarrollo longitudinal o diámetros medios y elevados. Asimismo, requiere una infraestructura logística significativa, incluyendo espacio para la planta de tratamiento de lodos, almacenamiento de bentonita y gestión del material decantado.

En tramos con presencia de roca competente o estratos arcillosos de alta resistencia, puede ser necesario reconsiderar el método constructivo, optando por tuneladoras de roca o soluciones convencionales.

En entornos urbanos saturados, especialmente bajo nivel freático, el hidroescudo se emplea con frecuencia por su capacidad para minimizar asentamientos y controlar eficazmente el equilibrio hidráulico del frente.

### ***2.9. Elementos para el sostenimiento en obras subterráneas***

El sostenimiento constituye uno de los aspectos fundamentales en el diseño y ejecución de obras subterráneas de desarrollo lineal, ya que permite garantizar la estabilidad del terreno durante y después de la excavación. A diferencia de los métodos constructivos, que definen como se genera el túnel, el sostenimiento determina como se controla la distribución de tensiones y las deformaciones inducidas por la obra y el terreno circundante. En este sentido, no solo tiene una función estructural, sino también geotécnica, al interactuar directamente con el terreno para evitar desplazamientos, colapsos y asegurar las condiciones de seguridad y servicio.

La elección del sistema de sostenimiento depende de múltiples factores, entre los que destacan la calidad geomecánica del terreno, la presencia de agua, la profundidad de la excavación, la geometría de la sección y el método constructivo adoptado. En macizos rocosos competentes, el objetivo puede ser simplemente controlar la caída de bloques o la apertura de discontinuidades; en suelos blandos o materiales muy fracturados, el sostenimiento debe asumir un papel estructural más relevante desde fases muy tempranas del avance.

Los elementos de sostenimiento pueden clasificarse, de forma general, en sistemas pasivos y activos, rígidos y flexibles, continuos y discontinuos, aunque en la práctica suelen emplearse combinaciones de varios de ellos para adaptar la respuesta estructural al comportamiento real del terreno. La tendencia actual se orienta hacia soluciones integradas, donde el sostenimiento inicial y el revestimiento definitivo forman parte de una estrategia conjunta de control de deformaciones y optimización de recursos.

En los apartados siguientes se analizan los principales elementos empleados en el sostenimiento de túneles y obras subterráneas de desarrollo lineal, describiendo su funcionamiento, ámbito de aplicación, ventajas, limitaciones y criterios de selección en función del contexto geotécnico y constructivo.

### 2.9.1. Cerchas

Una cercha en obras subterráneas se define como “arcos de acero estructural para sostenimiento de excavaciones, que se emplean tradicionalmente en túneles construidos con método tradicional” (Castilla Gómez et al., 2015), especialmente en terreno sueltos o sometidos a grandes presiones. Las cerchas complementan sistemas de soporte, como el gunitado y el bulonado, formando parte de un “sistema mixto”

En cuanto a su forma de trabajo “están trabajan a compresión, como arcos metálicos, y a flexión sobre sección rígida conformada” (Castanedo Navarro, 2014). En terrenos estables pueden diseñarse como “entibación rígida, con tramos de perfiles HEB o IPN de canto, formando un arco continuo. En terreno menos estable, se emplean cerchas deslizantes, tipo TH” (Castilla Gómez et al., 2015) De esta forma, en caso de movimientos del terreno, éstas se adaptan mejor que la entibación rígida, mientras que los perfiles TH no pierden capacidad portante ante desplazamientos.

Además, las cerchas ofrecen una armadura inicial dado que “sirven de refuerzo y encofrado para el hormigón proyectado” (Castanedo Navarro, 2014), quedando embebidas al realizar el gunitado.

En cuanto al montaje de las cerchas, tras realizar la excavación “se prepara el frente de actuación, limpiando el terreno o incluso realizando alguna inyección, en caso de ser necesario” (Castanedo Navarro, 2014).

Habitualmente se coloca la primera cercha en la clave, que se ancla provisionalmente en los laterales. A partir de ese momento, “se instalan las siguientes cerchas, solapadas o separadas según el diseño (habitualmente cada 0,5–1 m). Los extremos longitudinales se unen a la cercha anterior mediante placas atornilladas a tope” (Castanedo Navarro, 2014).

A medida que avanza la excavación, algunas cerchas pueden quedar incorporadas al revestimiento definitivo (por ejemplo, cerchas HEB embebidas en el hormigón del revestimiento), mientras que otras pueden retirarse. El destino final depende del proyecto y del sistema constructivo adoptado.

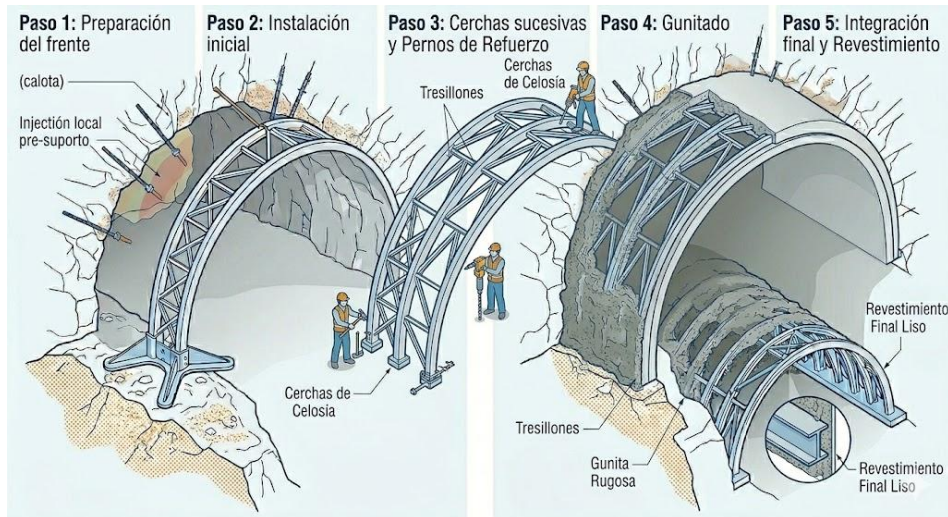


Figura 35. Proceso constructivo de las cerchas. Fuente: Elaboración propia

Este tipo de sostenimientos cuentan con una serie de ventajas que hace que sea habitual su uso. En primer lugar, “proporcionan un soporte inmediato y rígido al avance, permitiendo cubrir grandes luces sin deformaciones excesivas” (Castilla Gómez et al., 2015). Por otro lado, se trata de un sistema que puede integrarse con otros, como el gunitado y bulonado, lo que le da una ventaja de unión con otros sostenimientos. En caso de no formar parte del sostenimiento final, si la sección de la obra es continua, se pueden reutilizar en otras fases.

Por contra, este sostenimiento “requiere de gran cantidad de acero y equipo de maniobra, lo que dificulta el proceso y encarece el sistema. Ocupan espacio en la sección y pueden interferir con sistemas auxiliares necesarios para continuar con la excavación” (Castanedo Navarro, 2014).

Estas dificultades se traducen en un montaje lento, además de una unión entre cerchas que debe ser de calidad, lo que requiere unos equipos de montaje muy especializados. En caso de una geometría del trazado con curvaturas o cambios de sección, deja de ser óptimo al no poder adaptarse al trazado y cambios de sección.

Las cerchas constituyen un sistema de sostenimiento clásico y versátil en túneles, combinan la inmediatez de un soporte metálico con la fortaleza de una armadura integrada en el revestimiento final. “El diseño debe basarse en la interacción con el suelo (rígido vs móvil), por lo que es crucial seleccionar el perfil adecuado (cercha deslizante TH o cercha rígida HEB/IPN) según la calidad geotécnica” (Castilla Gómez et al., 2015).

En la práctica, las cerchas se usan como parte de un sostenimiento conjunto que minimiza los riesgos de desplome inmediato. Su empleo favorece la seguridad, pero implica mayor complejidad

constructiva. Metodológicamente, se concluye que las cerchas son especialmente recomendables cuando se requiere un arco permanente de refuerzo, actuando tanto en túneles por secciones amplias como en obras subterráneas donde el terreno sea lo bastante estable para no sobrepasar las capacidades de carga del acero.

### 2.9.2. Bulones

Un bulón se trata de “un elemento lineal de refuerzo que se coloca dentro de un taladro efectuado en el seno de la roca, con la misión de coser las juntas de la roca, impidiendo que los bloques puedan deslizarse a favor de las fracturas” (Erreygue Rocha, s.f.). Además de fijar las discontinuidades, los bulones confinan el macizo, “absorbiendo las tensiones de tracción y evitando zonas descomprimidas” (Erreygue Rocha, s.f.).

En la práctica se trata de un método de sostenimiento relacionado con los métodos constructivos tradicionales, por ejemplo, “con el NATM, el bulonado se aplica tras una capa inicial de hormigón proyectado y antes de proseguir con la excavación” (Erreygue Rocha, s.f.).

Existen múltiples tipos de bulones, en función del material y el método de fijación:

- Barra lisa con resina: Bulones de varilla de acero lisa insertada en taladro con cartucho de resina. “Se perfora, limpia el agujero, luego se inserta la varilla girándola para fracturar la resina. Históricamente fueron comunes, pero hoy casi no se usan en túneles modernos” (Castanedo Navarro, 2014).
- Bulones de anclaje mecánico: Tienen una punta de expansión y cabeza roscada. “Se introducen en el taladro y, al apretar la tuerca, una pieza metálica en la punta se ensancha contra la roca. Su ventaja es la posibilidad de pretensado” (Castanedo Navarro, 2014)
- Bulones autoperforantes (anclajes de barra hueca): Consisten en una barra hueca roscada que sirve simultáneamente de broca y tubo de inyección. “Se perfora presionando la barra; las rocas trituradas son evacuadas por la barra hueca mientras se inyecta lechada cementosa internamente” (Erreygue Rocha, s.f.). “Permiten longitudes muy largas (recomendado hasta 6-9 m según el equipo) y atravesar estratos fracturados. Son la tecnología predominante en proyectos grandes” (Castanedo Navarro, 2014).

Los bulones mencionados anteriormente suelen recibir tratamientos anticorrosión, para evitar los posibles daños que sufran a lo largo de la vida útil, debido al entorno en el que se encuentran.

El bulonado se ejecuta como un proceso secuencial que comienza con la “perforación del taladro en el macizo, continúa con su limpieza para garantizar una correcta adherencia y sigue con la

colocación del elemento de anclaje” (Erreygue Rocha, s.f.). A continuación, se realiza la inyección del material de fijación, asegurando que el espacio anular quede completamente relleno. Seguidamente, “se coloca la placa de reparto en la cabeza del bulón y, cuando el sistema lo requiere, se aplica el pretensado correspondiente. Finalmente, se respeta el tiempo de fraguado antes de que el anclaje entre en servicio” (Castanedo Navarro, 2014). Durante todo el proceso se controlan la correcta ejecución de cada fase y la calidad del anclaje instalado.



*Figura 36. Proceso de bulonado de hastial y bóveda del túnel. Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto al diseño de los bulones para el sostenimiento, se contempla el espaciamiento y el patrón de colocación en función de la luz del túnel y de la calidad del macizo rocoso. “Habitualmente se dispone en malla cuadrada o triangular, adaptándose a las condiciones geotécnicas y al avance de la excavación. En determinados casos, el sostenimiento se organiza por secciones horizontales siguiendo el desarrollo de la calota” (Erreygue Rocha, s.f.).

El bulonado forma parte de un sistema de sostenimiento compuesto. “Normalmente se proyecta hormigón proyectado sobre la excavación y se coloca malla metálica o elementos auxiliares de refuerzo. Los bulones trabajan conjuntamente con el hormigón proyectado” (Castanedo Navarro, 2014). El hormigón proporciona un soporte superficial inmediato, mientras que los bulones confinan el macizo y transmiten cargas hacia zonas más competentes. Cuando están pretensados, pueden movilizar carga desde fases tempranas, reforzando la primera capa de hormigón proyectado.

Entre las principales ventajas del bulonado destacan su capacidad de “refuerzo en profundidad, su adaptabilidad a distintas condiciones del terreno y su contribución a la confinación del macizo

rocoso, aumentando la resistencia global del conjunto roca-hormigón proyectado” (Castanedo Navarro, 2014). Además, su instalación temprana refuerza eficazmente el sostenimiento inicial.

Como limitaciones, presenta un proceso de ejecución relativamente lento, una elevada dependencia de la correcta instalación y del anclaje químico o mecánico, dificultades operativas en espacios reducidos y una logística exigente en cuanto a equipos y materiales.

### **2.9.3. Hormigón proyectado**

El hormigón proyectado constituye uno de los elementos esenciales en el sostenimiento de obras subterráneas de desarrollo lineal, principalmente en túneles excavados mediante métodos tradicionales, especialmente en el marco del Nuevo Método Austriaco (NATM). Se trata de un mortero u hormigón que se aplica neumáticamente sobre la superficie excavada, formando una capa adherida al macizo rocoso capaz de estabilizar el contorno y limitar deformaciones desde fases muy tempranas de la excavación.

“El hormigón proyectado es un mortero - mezcla húmeda o seca - con árido fino pulverizado directamente sobre la superficie” (FHWA, 2009). Esta definición pone de manifiesto su carácter proyectado y su capacidad de adaptación a superficies irregulares, lo que lo diferencia del hormigón colado in situ, que requiere encofrado y mayores tiempos de puesta en obra.

En el contexto de la obra subterránea, el hormigón proyectado se aplica inmediatamente después de la excavación de cada avance (calota, destroza o banco), constituyendo el sostenimiento primario junto con el bulonado. Tal y como señalan López Jimeno y López Jimeno, “el sostenimiento en túneles modernos se concibe como un sistema integrado en el que el hormigón proyectado trabaja solidariamente con el macizo y los anclajes” (López Jimeno y López Jimeno, 1997). Su función principal es crear una “cáscara” resistente adherida al contorno excavado que redistribuya tensiones superficiales y limite la caída de fragmentos, permitiendo que el terreno participe activamente en la estabilidad global.

Desde el punto de vista de la ejecución, el hormigón proyectado puede aplicarse mediante vía seca o vía húmeda. En el “método seco, el agua se incorpora en la boquilla en el momento de la proyección, mientras que en el método húmedo la mezcla se prepara previamente y se bombea hasta el frente. La elección depende de factores logísticos, ambientales y de control de calidad” (OSEPSA, 2012). En cualquier caso, la aplicación debe realizarse en capas sucesivas, asegurando la compactación y continuidad del revestimiento. En este sentido, el procedimiento técnico indica que “las capas de mortero proyectado deben formarse en varias pasadas de la boquilla” (OSEPSA, 2012),

evitando discontinuidades y garantizando el espesor de diseño. Asimismo, se advierte que “los rebotes y residuos nunca deben reutilizarse” (OSEPSA, 2012), ya que el material proyectado que no se adhiere pierde calidad mecánica y puede comprometer la integridad del conjunto.

El diseño de la mezcla del hormigón proyectado comparte principios con el hormigón convencional, aunque incorpora particularidades específicas. “Se emplean cementos Portland de resistencia media o alta, seleccionando cementos resistentes a sulfatos cuando existen aguas agresivas” (OSEPSA, 2012). En cuanto a los áridos, la granulometría se limita generalmente a fracciones finas para “favorecer la adherencia y reducir el rebote; según el procedimiento técnico citado, la arena debe presentar un módulo de finura entre 2,4 y 3,2” (OSEPSA, 2012), lo que contribuye a una adecuada trabajabilidad y cohesión. El empleo de aditivos resulta fundamental, especialmente acelerantes, plastificantes y reductores de retracción. De acuerdo con la documentación técnica, “entre los aditivos más empleados se encuentran acelerantes, plastificantes, superfluidificantes, retardadores e impermeabilizantes” (OSEPSA, 2012). Los acelerantes permiten una rápida ganancia de resistencia, aspecto clave cuando el sostenimiento debe activarse en pocas horas tras la excavación.

Con frecuencia se incorporan fibras metálicas o sintéticas en la mezcla para mejorar la tenacidad y controlar la fisuración. En este sentido, se señala que “las fibras reducen la retracción y la propagación de fisuras, mejorando la energía de fractura y la resistencia al impacto” (López Jimeno y López Jimeno, 1997). Alternativamente, el hormigón proyectado puede aplicarse sobre malla metálica soldada, que actúa como armadura superficial. “La malla soldada debe fijarse firmemente al área de aplicación, pues actúa como armazón para sostener el hormigón proyectado” (FHWA, 2009). Esta integración con mallas y bulones permite configurar un sistema compuesto en el que el hormigón proyectado proporciona confinamiento superficial, mientras que los anclajes transmiten cargas en profundidad hacia zonas más competentes del macizo.

El procedimiento de ejecución comienza con la preparación del soporte, que debe limpiarse de polvo, fragmentos sueltos y material inestable. Tal como recoge la FHWA, “la superficie debe limpiarse de material suelto antes de la aplicación” (FHWA, 2009), asegurando así una correcta adherencia. Posteriormente “se procede a la proyección por capas sucesivas hasta alcanzar el espesor definido en el diseño geotécnico” (López Jimeno y López Jimeno, 1997). Este espesor depende de la calidad del macizo, de la sección del túnel y del esquema de sostenimiento adoptado, pudiendo variar significativamente entre proyectos.

El control de calidad incluye la verificación de espesores, ensayos de resistencia a compresión sobre testigos y pruebas de adherencia al soporte, garantizando que la capa proyectada trabaje solidariamente con el terreno.

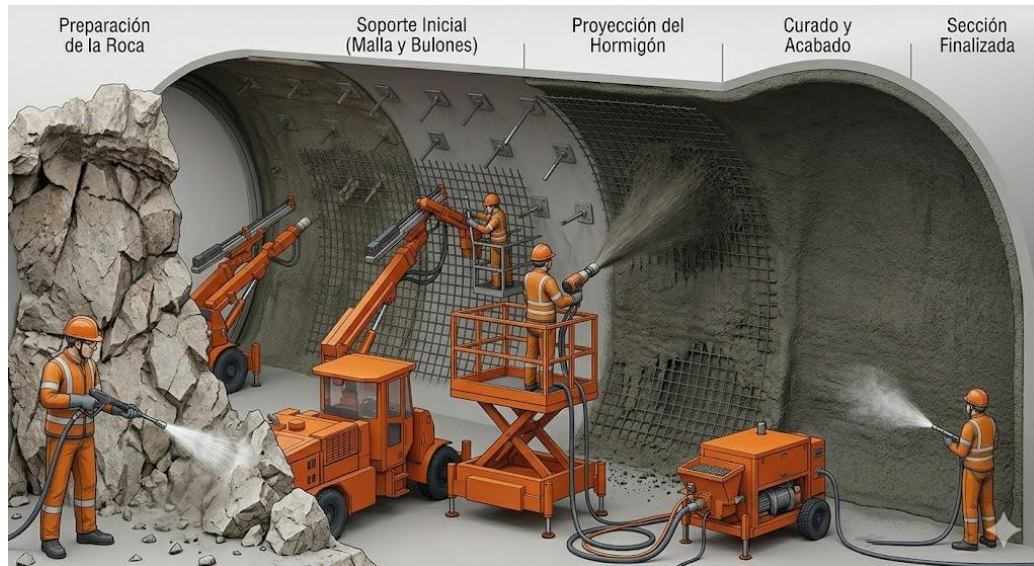


Figura 37. Proceso constructivo del hormigón proyectado. Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista estructural, el hormigón proyectado no suele actuar de manera aislada, sino integrado en un sistema que puede incluir bulones, cerchas metálicas y, en su caso, revestimientos definitivos de hormigón armado. En el marco del NATM, “el hormigón proyectado constituye el elemento superficial que confina el macizo, mientras que el bulonado proporciona el refuerzo interno y limita la apertura de discontinuidades” (López Jimeno y López Jimeno, 1997). Esta concepción sistémica es clave para comprender su comportamiento y su contribución a la estabilidad global.

Entre las principales ventajas del hormigón proyectado destacan su rapidez de ejecución, su capacidad de adaptarse a geometrías irregulares, la activación temprana del sostenimiento y su buena integración con otros elementos estructurales.

No obstante, presenta limitaciones relevantes, como la generación de rebote y polvo, la necesidad de un control riguroso de la dosificación y la dependencia de personal especializado para su correcta aplicación.

Este sostenimiento constituye un elemento fundamental en la actualidad en los sostenimientos de túneles excavados tanto en suelos competentes como en roca, especialmente cuando se requieren soportes inmediatos y flexibles. La eficacia de este método depende de un diseño adecuado de la

mezcla y un control de la ejecución, además de la integración con el resto de las partes del sostenimiento.

#### 2.9.4. Paraguas de micropilotes

El paraguas de micropilotes constituye una técnica de “presostenimiento empleada en túneles cuando el terreno situado en la bóveda presenta escasa capacidad autoportante y existe riesgo de colapso o deformaciones excesivas antes de que el sostenimiento convencional pueda activarse” (González Aleñar, 2011). Su fundamento consiste en ejecutar, con carácter previo a la excavación, una serie de micropilotes dispuestos en abanico desde la coronación del túnel, de manera que formen una estructura resistente en forma de arco o bóveda virtual que estabiliza el terreno superior y transfiere las cargas hacia zonas más competentes.

Desde el punto de vista conceptual, el paraguas de micropilotes se basa en un principio distinto al sostenimiento reactivo. Mientras que en este último el terreno se estabiliza inmediatamente después de excavar mediante hormigón proyectado y bulones, el paraguas actúa antes del avance, generando una estructura rígida que soporta el terreno incluso antes de retirar el material inferior. Así, los micropilotes “funcionan principalmente a compresión axial, absorbiendo el peso de la bóveda de terreno situada sobre la excavación y limitando las deformaciones” (OSEBE, s.f.). Esta acción reduce los asentamientos y minimiza el riesgo de inestabilidad súbita en suelos blandos, gravas sueltas, materiales colapsables o zonas con presencia de agua.

Los micropilotes utilizados en este sistema son elementos de pequeño diámetro, “habitualmente comprendidos entre 100 y 200 mm, perforados con inclinaciones variables desde la coronación hacia el interior del terreno” (Pérez Álvarez, s.f.). Una vez ejecutado el taladro, se introduce una armadura metálica —generalmente barra corrugada o tubo estructural— y se inyecta lechada de cemento desde el fondo hacia la boca del taladro, garantizando el relleno completo del espacio anular. “El mortero fraguado constituye el elemento resistente que transmite cargas al terreno circundante” (González Aleñar, 2011).

La ejecución del paraguas sigue una secuencia estrictamente ordenada. En primer lugar, se replantea el patrón de perforación sobre el contorno de la futura bóveda, “definiendo inclinaciones y espaciamientos que aseguren el solape entre pilotes” (Pérez Álvarez, s.f.). Posteriormente se perforan los taladros de forma controlada, evitando desestabilizar el frente.

“Cada micropilote se arma e inyecta inmediatamente tras la perforación, utilizando lechadas de cemento adecuadas a las condiciones del terreno y, cuando procede, aditivos para controlar la

filtración o mejorar la resistencia inicial” (González Aleñar, 2011). Una vez completado el conjunto y alcanzada la resistencia suficiente del mortero, se procede a la excavación del terreno situado bajo el paraguas. De este modo, la masa de suelo o roca queda sostenida por la bóveda de micropilotes, reduciendo la demanda sobre el sostenimiento primario posterior.



*Figura 38. Proceso constructivo del paraguas de micropilotes. Fuente: OSEBE S.A. (s.f.).*

El diseño del paraguas debe considerar “la longitud de los micropilotes, que ha de garantizar su empotramiento en terreno competente más allá de la zona afectada por la excavación, así como su espaciado y ángulo de inclinación” (González Aleñar, 2011). La configuración habitual busca que los pilotes se solapen tanto en planta como en sección longitudinal, formando una envolvente continua capaz de comportarse como arco resistente.

El paraguas de micropilotes rara vez actúa de forma aislada. Tras la excavación bajo su protección, “se completa el sostenimiento primario mediante hormigón proyectado, bulones y, en su caso, cerchas metálicas” (González Aleñar, 2011). Así, el paraguas asume la estabilización inicial del terreno superior, mientras que el hormigón proyectado y el bulonado consolidan el contorno excavado y garantizan la estabilidad a corto y medio plazo.

Desde el punto de vista del control y la instrumentación, resulta fundamental supervisar la inclinación y profundidad de cada micropilote, el volumen y la presión de inyección de la lechada y la respuesta deformacional del terreno durante la excavación posterior.

Entre las principales ventajas del paraguas de micropilotes destaca su capacidad de proporcionar un sostenimiento anticipado completo, reduciendo significativamente el riesgo de colapso en terrenos inestables y limitando asentamientos en superficie, lo que resulta especialmente relevante en entornos urbanos o en proximidad a infraestructuras sensibles. Asimismo, su ejecución permite adaptar la longitud y densidad de los micropilotes en función de la respuesta observada del terreno, en coherencia con el método observacional.

No obstante, presenta limitaciones importantes, como el incremento de costes y tiempos de ejecución debido a la perforación e inyección de numerosos elementos inclinados, así como la necesidad de equipos especializados y una logística compleja. Además, su utilización no resulta necesaria en macizos rocosos competentes, donde el sostenimiento convencional puede ser suficiente.

#### **2.9.5. Jet Grouting**

El *jet grouting* es una “técnica de mejora del terreno basada en la inyección de lechadas cementosas a muy alta presión con el objetivo de desagregar el suelo existente y mezclarlo in situ con el fluido inyectado, generando columnas o bloques de suelo-cemento de elevada resistencia y baja permeabilidad” (Yepes, 2019). En el ámbito de la ingeniería subterránea, esta técnica se emplea como sistema de presostenimiento o refuerzo del terreno en túneles excavados en suelos blandos, granulares o altamente permeables, donde el sostenimiento convencional podría resultar insuficiente.

Históricamente, la técnica se desarrolló a mediados del siglo XX y alcanzó gran difusión a partir de los años setenta, consolidándose como una solución versátil para la mejora de suelos en cimentaciones y, posteriormente, en túneles urbanos. En el contexto subterráneo, “su aplicación permite formar pantallas continuas o prebóvedas de suelo-cemento antes de la excavación, reduciendo significativamente el riesgo de colapso y limitando los asentamientos en superficie (Pérez Álvarez, 2012).

El procedimiento constructivo comienza con la perforación de un taladro guía hasta la profundidad prevista. Posteriormente “se introduce el varillaje de jet y se inicia la inyección a alta presión, combinada con la rotación y extracción controlada del tubo. De esta forma se genera progresivamente una columna de suelo-cemento alrededor del eje del taladro. El control de la velocidad de extracción, la presión de inyección y el caudal resulta determinante para garantizar la homogeneidad de la columna” (Pérez Álvarez, 2012).

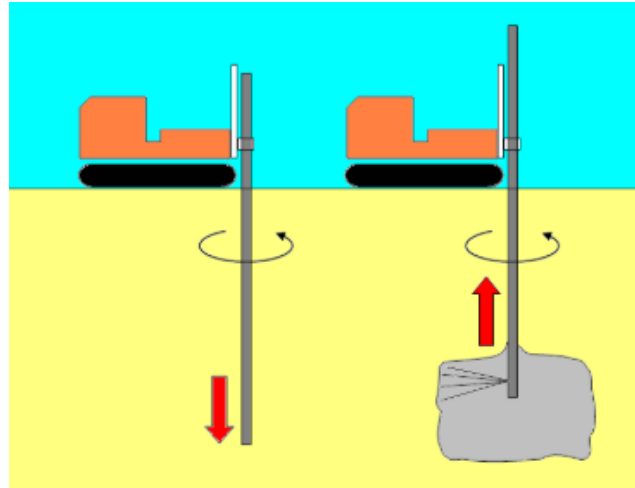


Figura 39. Procedimiento básico del jet-grouting. Fuente: Yepes (2019)

Para formar pantallas continuas o prebóvedas en túneles, las columnas se disponen en malla con un determinado grado de solape lateral. De esta manera, “el conjunto de columnas actúa como un bloque rígido capaz de soportar el terreno superior antes de la excavación” (Pérez Álvarez, 2012). Una vez ejecutado el tratamiento y alcanzada la resistencia suficiente del suelo-cemento, se procede a la excavación bajo la protección de esta estructura mejorada.

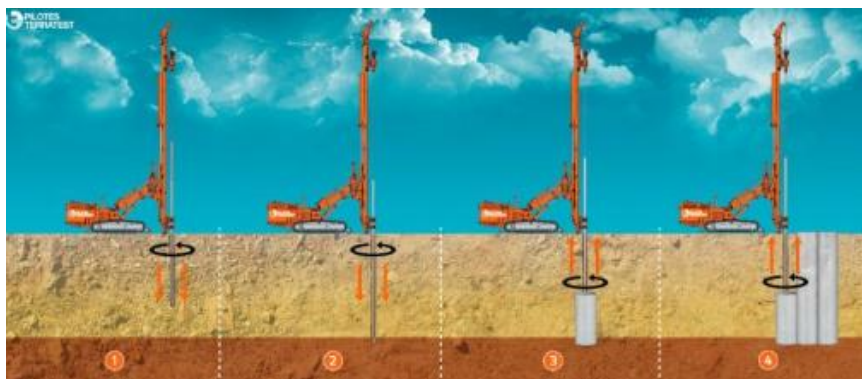


Figura 40. Ejecución de una pantalla con la técnica de jet-grouting. Fuente: Yepes (2019)

El diseño del *jet grouting* debe considerar el diámetro y la longitud de las columnas, la separación entre ejes, la presión de inyección y las características del terreno. En túneles, “la longitud suele extenderse más allá de la zona afectada por la excavación para asegurar el anclaje en terreno competente. Asimismo, la resistencia final del suelo-cemento y su permeabilidad son parámetros críticos, especialmente en entornos con presencia de agua” (Pérez Álvarez, 2012). La técnica permite reducir significativamente la permeabilidad del terreno tratado, lo que la convierte en una solución eficaz para el control de filtraciones.

En cuanto a su interacción con otros sistemas de sostenimiento, el *jet grouting* suele integrarse con hormigón proyectado, bulones o micropilotes. Tras excavar bajo la pantalla de columnas, “se proyecta habitualmente hormigón en el frente para consolidar el contorno y garantizar el trabajo conjunto del sistema. En determinados casos, puede combinarse con bulonado interior para reforzar localmente la excavación” (Pérez Álvarez, 2012). De este modo, el *jet grouting* actúa como elemento de mejora previa del terreno, mientras que el sostenimiento convencional asegura la estabilidad a corto y medio plazo.

Entre las principales ventajas del *jet grouting* destacan su elevada capacidad de mejora del terreno, su adaptabilidad a distintas granulometrías y su eficacia en el control de asentamientos y filtraciones. “Esta técnica resulta especialmente adecuada cuando otros métodos de inyección no penetran eficazmente en suelos granulares finos” (Yepes, 2019). Además, permite crear estructuras de geometría compleja sin necesidad de excavación previa.

No obstante, presenta limitaciones importantes, como el “elevado coste asociado a los equipos especializados y al consumo de cemento, la necesidad de un control exhaustivo durante la ejecución y la gestión de los lodos resultantes de la inyección” (Yepes, 2019). Asimismo, su aplicación en macizos rocosos competentes resulta limitada, ya que la capacidad de erosión del chorro es menor en materiales muy duros.

#### **2.9.6. Inyecciones**

Las inyecciones constituyen una “técnica fundamental en la ingeniería de túneles para la consolidación del terreno y el control de filtraciones, mediante la introducción forzada de materiales fluidos en el macizo rocoso o suelo con el fin de modificar sus propiedades mecánicas e hidráulicas” (Rey Sabín et al., 2016). “Su finalidad principal es mejorar la resistencia, reducir la permeabilidad o rellenar huecos y fisuras que comprometan la estabilidad de la excavación o la estanqueidad del revestimiento” (Pérez Álvarez, 2012).

En términos generales, una inyección se define como la introducción a presión de un fluido en el terreno para consolidar o impermeabilizar el medio tratado. Esta definición recoge la doble vertiente de la técnica, por un lado, la mejora estructural del macizo mediante el relleno y cohesión de discontinuidades; por otro, la reducción de la permeabilidad para impedir filtraciones de agua hacia el interior del túnel. “En el ámbito subterráneo, las inyecciones pueden emplearse como tratamiento previo a la excavación, como complemento del sostenimiento primario o como actuación correctiva en fases de explotación” (Rey Sabín et al., 2016).

Desde el punto de vista tipológico, las inyecciones pueden clasificarse según el material empleado y su mecanismo de acción. “Las inyecciones cementosas consisten en la introducción de lechadas o morteros de cemento que, al fraguar, rellenan fisuras y huecos formando un conglomerado rígido. Estas se utilizan ampliamente en consolidación de macizos fisurados y en inyecciones de contacto tras la ejecución de revestimientos” (Pérez Álvarez, 2009).

Las “inyecciones químicas emplean resinas sintéticas —acrílicas, epoxi o poliuretano— que penetran en fisuras finas y polimerizan posteriormente. En particular, las espumas de poliuretano se caracterizan por su elevada capacidad de expansión, ya que pueden aumentar varias veces su volumen inicial al contacto con el agua” (Rey Sabín et al., 2016), lo que las convierte en una solución eficaz para el sellado rápido de filtraciones activas. Por su parte, las resinas epoxi se emplean en la reparación estructural de grietas, mientras que los geles acrílicos proporcionan sellados más flexibles y adaptables.

Las inyecciones de contacto se utilizan habitualmente “tras la colocación de dovelas o la ejecución de hormigón proyectado, con el objetivo de rellenar los vacíos entre el revestimiento y el terreno” (Sika, 2016). Este procedimiento garantiza la transmisión homogénea de cargas entre el terreno y el revestimiento y mejora la estanqueidad del conjunto.

Desde el punto de vista operativo, “el procedimiento de inyección comienza con la perforación de taladros de pequeño diámetro en la zona a tratar. La disposición de estos taladros depende de la geometría del defecto o del patrón de consolidación previsto, pudiendo adoptarse esquemas en malla, en tresbolillo o alineaciones específicas en juntas y fisuras” (Rey Sabín et al., 2016). Tras la perforación, se limpian los taladros mediante aire comprimido o lavado para asegurar la correcta penetración del fluido.

A continuación, se prepara el material inyectable con la dosificación adecuada y se procede a su introducción mediante bombas específicas. La presión de inyección se incrementa progresivamente, comenzando con “valores bajos para permitir la permeación inicial y evitando superar los límites que puedan provocar fracturación no deseada del terreno” (Rey Sabín et al., 2016). Durante el proceso se controlan de forma continua la presión aplicada, el volumen inyectado y el retorno de fluido.

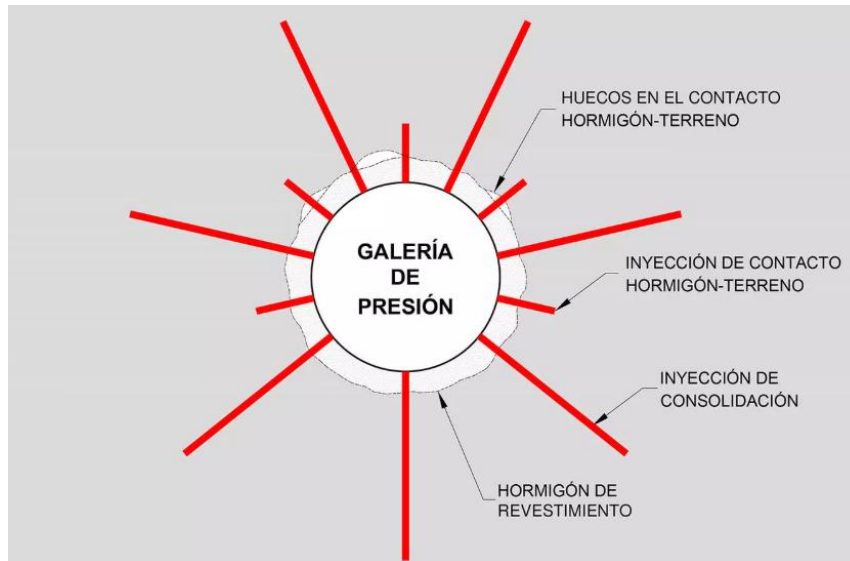


Figura 41. Esquema básico de inyecciones en obras subterráneas de desarrollo lineal. Fuente: Keller (s.f.)

El diseño de una “campaña de inyecciones depende de factores geotécnicos como la permeabilidad, el grado de fracturación, la presencia de agua y la naturaleza del terreno” (Pérez Álvarez, 2009). “En macizos muy fisurados se prefieren lechadas fluidas o resinas de baja viscosidad capaces de penetrar en discontinuidades finas. En suelos granulares permeables pueden emplearse inyecciones de permeación a baja presión. En cambio, en terrenos con filtraciones activas se priorizan resinas expansivas que bloqueen rápidamente el flujo de agua” (Rey Sabín et al., 2016). La elección del material y la presión de inyección debe evitar la generación de fracturas secundarias o levantamientos del terreno.

Las inyecciones se integran con el resto de sistemas de sostenimiento. Tras la aplicación de “hormigón proyectado, la inyección del trasdós mejora el contacto y evita huecos residuales. En combinación con bulones, puede emplearse lechada cementosa o resina para anclar las barras al terreno” (Rey Sabín et al., 2016). En determinados casos, las inyecciones complementan sistemas de mejora más intensivos como micropilotes o *jet grouting*, actuando de forma localizada en puntos donde se detectan debilidades.

Entre las principales ventajas de las inyecciones destacan su capacidad para actuar de manera localizada en zonas inaccesibles, la posibilidad de adaptar la viscosidad y reactividad del material según las condiciones del terreno y su eficacia en el control de filtraciones. Además, permiten reforzar puntos débiles sin necesidad de ejecutar estructuras adicionales de gran entidad. No obstante, “presentan limitaciones importantes, como la incertidumbre en la trayectoria del fluido,

el elevado coste de algunos productos químicos y la necesidad de equipos especializados y personal experimentado” (Rey Sabín et al., 2016).

### **2.9.7. Galerías de drenaje/Drenes**

Las galerías de drenaje, también denominadas galerías de alivio, “constituyen un sistema pasivo de control de agua en túneles cuyo objetivo es interceptar, recoger y evacuar las aguas de filtración presentes en el macizo circundante, reduciendo así las presiones hidrostáticas sobre el revestimiento y mejorando la estabilidad global de la infraestructura” (Yepes, 2020). Su función no es impermeabilizar el túnel en sentido estricto, sino aliviar las presiones intersticiales y conducir el flujo hacia puntos de descarga controlados.

Desde el punto de vista conceptual, el drenaje en túneles tiene como finalidad “asegurar la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes o cunetas longitudinales” (Rey Sabín et al., 2016). Esta idea resume su principio básico permitir que el agua fluya de manera controlada, evitando acumulaciones que puedan generar empujes indeseados sobre la solera, los hastiales o la bóveda. Asimismo, se señala que el drenaje tiene por objeto “recoger las aguas de filtración y conducir las a las cunetas o puntos de evacuación” (Pérez Álvarez, 2009), garantizando que el revestimiento estructural trabaje en condiciones hidráulicas favorables.

El funcionamiento de las galerías de drenaje se basa en un sistema gravitatorio. Se disponen tuberías perforadas o zanjas drenantes en las zonas donde el agua tiende a concentrarse, habitualmente en la base de los hastiales o en la solera del túnel. Estas conducciones se rodean de material granular filtrante y geotextil, que permiten el paso del agua y evitan la colmatación por finos del terreno. El agua captada es conducida longitudinalmente hasta sumideros, pozos o salidas al exterior, reduciendo el nivel piezométrico en el entorno inmediato del túnel y limitando la transmisión de presión al revestimiento.

Los elementos principales del sistema incluyen tuberías perforadas —generalmente de PVC o polietileno—, material filtrante granular, geotextiles de protección y arquetas de inspección. El material filtrante debe seleccionarse de acuerdo con la granulometría del terreno, garantizando que permita el paso del agua sin arrastre de finos. El geotextil cumple una función esencial como barrera de filtración y debe mantener sus propiedades durante toda la vida útil del túnel. En este sentido, “se enfatiza que el drenaje y que su mantenimiento es clave para asegurar su operatividad a largo plazo” (Rey Sabín, 2016).

El procedimiento constructivo comienza con la excavación de la zanja o galería de drenaje, ya sea integrada en la sección principal del túnel o como excavación auxiliar paralela. Se prepara un lecho de apoyo con grava o mortero pobre, asegurando la pendiente necesaria para el escurrimiento gravitatorio. Posteriormente se colocan las tuberías perforadas, se rodean con material filtrante y se envuelven con geotextil continuo. Finalmente, el conjunto se integra en la solera o en el revestimiento, manteniendo accesos para inspección y limpieza.

Las galerías de drenaje se integran con el resto de sistemas de sostenimiento e impermeabilización. En túneles impermeabilizados mediante membranas, el drenaje suele situarse detrás del revestimiento primario, de modo que recoja las filtraciones residuales antes de que alcancen la capa estructural. “En combinación con el hormigón proyectado, el drenaje contribuye a mantener el contacto del revestimiento con un terreno descargado hidráulicamente. Asimismo, debe coordinarse con la disposición de bulones y cerchas para evitar interferencias durante la ejecución” (Rey Sabín, 2016).

Entre las principales ventajas de las galerías de drenaje destacan su carácter pasivo —no requieren aporte energético continuo—, “su eficacia en la reducción de presiones hidráulicas y su contribución a la durabilidad del revestimiento” (Escobal et al., 2021). Además, constituyen una solución robusta y tecnológicamente sencilla, de aplicación generalizada en túneles lineales.

No obstante, presentan limitaciones. Su ejecución implica “costes adicionales y puede requerir excavaciones auxiliares que incrementan la complejidad constructiva. Asimismo, ocupan espacio en la sección transversal y exigen un plan de mantenimiento continuado, ya que la colmatación por sedimentos es el principal riesgo operativo” (FHWA, 2009). Además, no eliminan la presencia de agua en el macizo, sino que la gestionan, por lo que en determinadas condiciones deben complementarse con sistemas de impermeabilización o inyecciones.

#### **2.9.8. Dovelas**

Las dovelas prefabricadas constituyen uno de los sistemas de revestimiento estructural más extendidos en túneles excavados mediante tuneladora (TBM), especialmente en entornos urbanos y en túneles de gran longitud. Se trata de “elementos segmentados de hormigón armado fabricados en planta industrial que, ensamblados in situ, forman anillos estructurales continuos capaces de soportar las cargas del terreno y garantizar la estanqueidad del túnel”. (Rey Sabín et al., 2016), consolidándose como solución predominante en túneles de metro, carreteras y ferrocarriles metropolitanos.

Cada anillo está compuesto por varias “dovelas trapezoidales —generalmente entre cuatro y nueve piezas, más una dovela llave de cierre— que se unen mediante pernos o tornillos de alta resistencia” (Rey Sabín et al., 2016). Este sistema segmentado sustituye al hormigonado in situ tradicional, ofreciendo mayor control de calidad, rapidez de ejecución y repetitividad geométrica. La fabricación industrial permite controlar dosificaciones, curado y tolerancias dimensionales, asegurando una homogeneidad difícilmente alcanzable en obra.

Desde el punto de vista estructural, el revestimiento segmentado se concibe como un anillo resistente sometido a esfuerzos radiales y circunferenciales derivados del empuje del terreno y de las sobrecargas. “El comportamiento del anillo depende de su espesor, de la rigidez del hormigón armado y del diseño de las juntas. El sistema trabaja como una estructura cerrada capaz de redistribuir esfuerzos a lo largo de la circunferencia, transmitiendo las cargas de manera uniforme” (Rey Sabín et al., 2016). La filosofía de diseño considera el anillo como elemento resistente principal, en contraste con el método convencional, donde el sostenimiento primario y el revestimiento definitivo se ejecutan en fases diferenciadas.

El procedimiento constructivo comienza con el avance de la tuneladora hasta completar la excavación de un tramo equivalente al ancho de un anillo. A continuación, el erector integrado en el escudo coloca las dovelas en el orden previsto, “normalmente comenzando por las piezas inferiores y laterales y finalizando con la dovela llave. Una vez completado el anillo, se procede al apriete de los pernos de unión, asegurando la correcta compresión de las juntas. Posteriormente se inyecta lechada en el espacio anular entre el extradós del anillo y el terreno excavado, sellando huecos y mejorando el contacto terreno-revestimiento” (Rey Sabín et al., 2016).

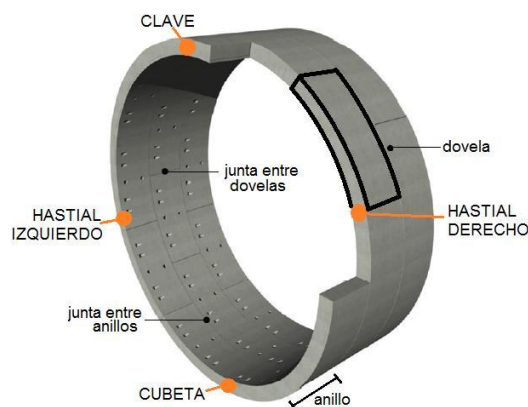


Figura 42. Partes de un anillo de dovelas como sostenimiento de túneles. Fuente: Goeneweg (2007)

En cuanto a los materiales, “las dovelas se fabrican generalmente con hormigones de alta resistencia y elevada durabilidad, incorporando armaduras densas para controlar fisuración y esfuerzos de

manipulación. En determinados proyectos se emplean fibras metálicas o aditivos específicos para mejorar el comportamiento frente al fuego o la agresividad química del terreno” (FHWA, 2020). El recubrimiento de las armaduras se dimensiona en función de la clase de exposición, especialmente en presencia de sulfatos o cloruros.

El diseño geométrico del anillo debe considerar el diámetro interior del túnel, el espesor estructural requerido y la compatibilidad con el escudo de la tuneladora. “El número y tamaño de dovelas por anillo se selecciona en función del diámetro y de la capacidad de manipulación del erector. Reducir el número de juntas simplifica el montaje y mejora la estanqueidad, pero implica dovelas de mayor peso y exigencia logística” (FHWA, 2020).

Entre las principales ventajas del revestimiento con dovelas destacan la elevada calidad estructural, la rapidez de montaje, la inmediata capacidad portante y la excelente estanqueidad cuando las juntas están correctamente ejecutadas. Además, permite una ejecución altamente mecanizada y repetitiva, reduciendo la exposición del personal en el frente de excavación.

Como limitaciones, presenta un coste inicial elevado asociado a la fabricación y logística, menor flexibilidad ante cambios geométricos imprevistos y una alta dependencia de la precisión en la ejecución. Errores en el sellado de juntas o en la alineación pueden generar filtraciones difíciles de corregir posteriormente.

### **2.9.9. Método Bernold**

El método Bernold es un procedimiento de sostenimiento vinculado a la tunelación convencional que se caracteriza por la utilización de chapas metálicas conformadas que actúan simultáneamente como encofrado perdido y como armadura colaborante, permitiendo ejecutar un revestimiento de hormigón vibrado muy próximo al frente de excavación y alcanzar una rigidez temprana elevada. “No es habitual actualmente la realización de túneles con empleo de chapa Bernold” (Castanedo Navarro, 2014) lo que indica que su aplicación generalizada ha sido desplazada por soluciones basadas en hormigón proyectado y bulonado; no obstante, mantiene vigencia en situaciones singulares como emboquilles, viseras y zonas localmente inestables.

Desde el punto de vista conceptual, el rasgo definitorio del método radica en el “empleo de chapas metálicas de geometría específica que desempeñan una doble función estructural, que actúan como encofrado perdido y armadura colaborante” (Pérez Álvarez, 2009) destacando su capacidad para integrar en una única solución el confinamiento durante el hormigonado y la colaboración estructural posterior del acero. Esta formulación sintetiza la esencia del sistema: la chapa no se

retira tras el vertido, sino que permanece incorporada al revestimiento final, contribuyendo a su comportamiento mecánico.

El procedimiento constructivo comienza tras la excavación del pase correspondiente y el saneo del frente. Se colocan en primer lugar “cerchas metálicas que definen la geometría de la sección y sirven de soporte para las chapas” (Pérez Álvarez, s. f.), configurando un encofrado continuo adaptado al contorno excavado. Una vez completado el paño de chapa, “se procede al vertido del hormigón entre la chapa y el terreno” (Pérez Álvarez, s. f.), asegurando su compactación y relleno adecuado mediante vibrado. Tras el fraguado, el sistema puede complementarse con una capa adicional de hormigón proyectado cuando las condiciones lo requieran.

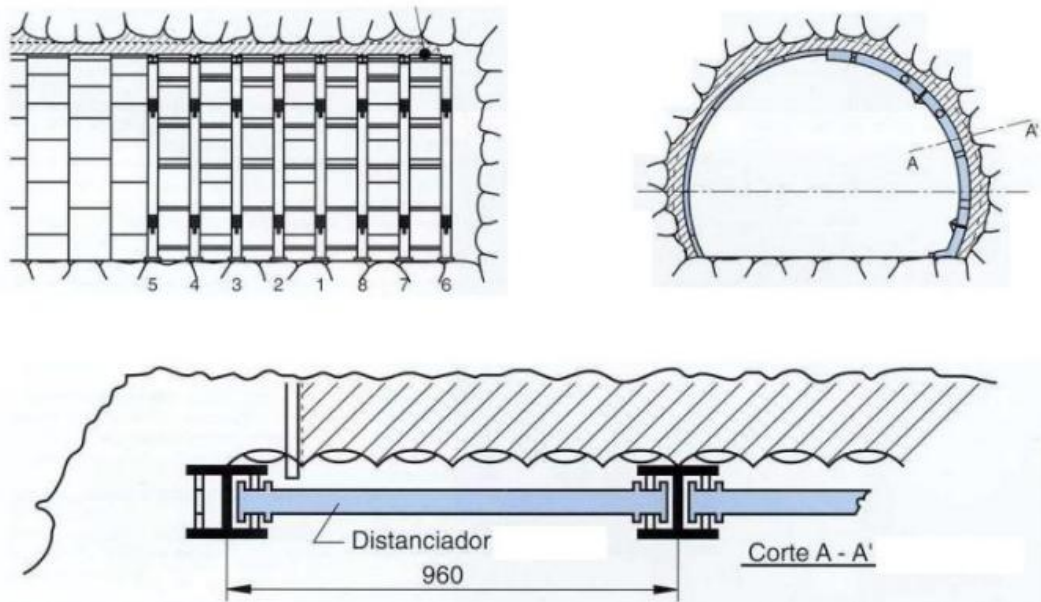


Figura 43. Sección constructiva del método Bernold. Fuente: Yepes (2016)

La interacción del método Bernold con otras técnicas de presostenimiento es especialmente relevante en zonas de elevada complejidad geotécnica. “Su uso puede combinarse con paraguas de micropilotes e inyecciones en zonas hundidas o chimeneas, configurando una secuencia de medidas donde el paraguas estabiliza el terreno adelantado, la chapa Bernold permite un cierre rígido inmediato y las inyecciones completan la consolidación del trasdós” (Castanedo Navarro, 2014).

En cuanto a materiales, las chapas Bernold presentan una “geometría nervada que les confiere rigidez suficiente para actuar como encofrado durante el hormigonado y como refuerzo distribuido en fase de servicio” (Castanedo Navarro, 2014). El control de ejecución se centra en la correcta alineación y fijación de las chapas, la calidad del hormigonado y la verificación de la continuidad del contacto terreno–revestimiento.

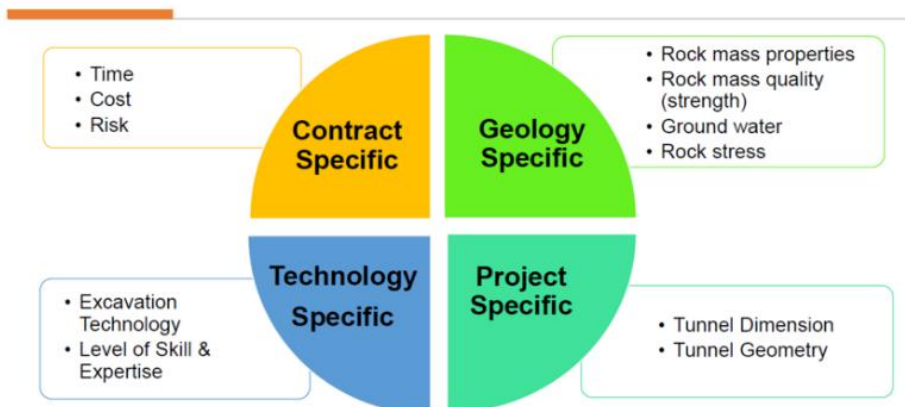
Entre las ventajas del método Bernold destaca “la rapidez de ejecución de un revestimiento rígido continuo y la mejora del contacto con el terreno, lo que reduce el riesgo de desprendimientos en fases tempranas” (Escobar et al., 2021). Su capacidad para proporcionar una bóveda resistente inmediatamente después de la excavación constituye su principal aportación frente a métodos más flexibles. No obstante, presenta limitaciones significativas como un “mayor coste asociado al material metálico, menor adaptabilidad frente a variaciones geológicas y una rigidez que puede resultar excesiva en enfoques observacionales donde se busca permitir deformaciones controladas del macizo” (Rey Sabín et al., 2016).

### 2.10. Relación entre tipología de túnel, método de excavación y partición de sección

La selección del proceso constructivo en una obra subterránea constituye una de las decisiones más determinantes del proyecto, ya que condiciona no solo la ejecución material del túnel, sino también su comportamiento durante la fase constructiva, la definición de los sostenimientos provisionales y definitivos, los plazos y los costes asociados. Como señala Oteo Mazo, “el proceso constructivo no puede entenderse como una consecuencia posterior del diseño, sino como un elemento estructural del propio planteamiento técnico” (Oteo Mazo, s.f.).

En este sentido, la tipología del túnel —longitud, sección, entorno urbano o interurbano, profundidad, presencia de agua, accesos— se encuentra íntimamente vinculada al método de excavación elegido. Oteo Mazo insiste en que “la selección del proceso constructivo debe basarse en criterios técnicos, económicos y de viabilidad operativa, evaluando de manera conjunta las características del terreno, la sección proyectada y la posibilidad de amortización de los equipos empleados” (Oteo Mazo, s.f.).

#### Factors consideration for selecting the method



*Figura 44. Factores de decisión para la selección del método constructivo. Fuente: Bahadur (2003)*

En túneles ejecutados mediante métodos convencionales, como perforación y voladura o excavación mecánica puntual, la excavación se realiza de forma secuencial y cíclica. Este tipo de procedimiento permite una elevada capacidad de adaptación a cambios geológicos durante la ejecución, lo que resulta especialmente relevante en terrenos heterogéneos o con elevada incertidumbre.

El Manual Técnico para el Diseño y Construcción de Túneles de Carretera de la FHWA establece que “los métodos secuenciales permiten ajustar el sostenimiento y la geometría de excavación en función del comportamiento observado del terreno, lo que constituye una ventaja significativa en condiciones variables” (FHWA, 2009). Esta filosofía está estrechamente vinculada al Método de Excavación Secuencial (SEM/NATM), donde la comprensión del comportamiento del macizo rocoso es esencial para movilizar su capacidad portante natural.

En este contexto, las clasificaciones geomecánicas adquieren un papel fundamental. Bieniawski advierte sobre los errores en la aplicación de las clasificaciones y subraya que estas deben utilizarse como herramientas de apoyo al diseño del sostenimiento y no como recetas cerradas (Bieniawski, s.f.). La determinación del RMR o de otros índices permite estimar tiempos de autoestabilidad y orientar la necesidad de particionar la sección.

Cuando la sección del túnel es amplia o el terreno presenta baja competencia, resulta habitual recurrir a la partición longitudinal de la excavación. Celada Tamames describe “los métodos de sección de partida, en los que la excavación se divide en fases —avance superior, destroza, contrabóveda— con el objetivo de controlar deformaciones y garantizar la estabilidad del frente” (Celada Tamames, 2008). Esta partición no responde únicamente a criterios geométricos, sino a la necesidad de adaptar el proceso constructivo al comportamiento del terreno.

En suelos blandos o rocas muy alteradas, Melis Maynar señala que “la ejecución en fases permite reducir asentamientos y controlar la convergencia en entornos urbanos, donde las deformaciones admisibles son limitadas” (Melis Maynar, 2010). Por tanto, en métodos convencionales existe una relación directa entre calidad del terreno, tamaño de sección y necesidad de partición.

Los métodos semimecanizados constituyen una solución intermedia entre la excavación tradicional y la mecanización integral. La documentación técnica sobre sistemas de arranque describe el “uso de rozadoras y martillos hidráulicos como técnicas de excavación mecánica no integral,

especialmente adecuadas para túneles de longitud moderada o secciones variables” (Mendaña, 2012).

En estos casos, la tipología del túnel influye decisivamente en la elección del equipo. “Secciones complejas, bifurcaciones o geometrías no circulares favorecen el uso de maquinaria de ataque puntual. Sin embargo, la dureza y abrasividad del terreno condicionan el rendimiento y la viabilidad económica de estos equipos” (Mendaña, 2012)

La partición de sección sigue siendo habitual en este grupo, especialmente en terrenos de baja competencia. La ejecución en fases permite compatibilizar la excavación mecánica con la colocación inmediata de sostenimientos provisionales, ajustando el proceso a la respuesta observada del terreno.

Las tuneladoras representan el nivel máximo de industrialización en la excavación de túneles. Oteo Mazo describe estos equipos como “sistemas integrales capaces de realizar la excavación a sección completa, la evacuación del material y, en muchos casos, la colocación del revestimiento definitivo de forma continua” (Oteo Mazo, s.f.).

La selección de una TBM está fuertemente condicionada por la tipología del túnel. En general, su empleo resulta adecuado en túneles de gran longitud y sección constante, donde la inversión inicial puede amortizarse mediante altos rendimientos de avance. Por el contrario, en “túneles cortos o con cambios frecuentes de sección, la mecanización integral puede resultar económicamente desventajosa” (Oteo Mazo, s.f.).

El Manual de la FHWA subraya la importancia de “una caracterización geotécnica exhaustiva antes de optar por una TBM, dado que la presencia de fallas, cambios litológicos bruscos o condiciones hidrogeológicas adversas puede comprometer la operación” (FHWA, 2009).

En métodos mecanizados, la partición de sección no se plantea desde el punto de vista geométrico, ya que la excavación se realiza a sección completa. No obstante, sí puede existir una partición funcional del túnel en tramos con diferentes condicionantes geotécnicos o constructivos, lo que influye en la selección del tipo de escudo, la presión de frente o el diseño del revestimiento.

La relación entre tipología del túnel, método de excavación y partición de sección puede sintetizarse en tres principios fundamentales:

- El método constructivo debe adaptarse a la calidad y variabilidad del terreno, no únicamente a la forma final del túnel.

- La partición de sección constituye una herramienta técnica para controlar la estabilidad y las deformaciones, especialmente en métodos no mecanizados.
- La mecanización integral reduce la flexibilidad geométrica, pero aumenta la productividad en túneles largos y homogéneos.

Melis Maynar enfatiza que el “diseño del proceso constructivo debe considerar el comportamiento del terreno durante la excavación y no únicamente las condiciones finales del túnel terminado” (Melis Maynar, 2010). Esta idea refuerza la necesidad de analizar conjuntamente tipología, método y secuencia de ejecución.

En conclusión, la elección del método de excavación no puede desvincularse de la tipología del túnel ni de la estrategia de partición adoptada. La coherencia entre estos tres elementos constituye la base de un proyecto técnicamente sólido y económicamente viable.

### **2.11. Innovación y tendencias en obras subterráneas**

La ingeniería de túneles y obras subterráneas lineales se encuentra en una fase de profunda transformación impulsada por la digitalización, la automatización de procesos constructivos y la incorporación de criterios avanzados de sostenibilidad. Estas tendencias no responden únicamente a la evolución tecnológica, sino también a la creciente complejidad de los proyectos, al incremento de las exigencias de seguridad y al compromiso con la eficiencia energética y la economía circular.

Uno de los cambios más significativos en la última década ha sido la transición desde modelos BIM estáticos hacia entornos digitales integrados orientados a la gestión del ciclo de vida de la infraestructura. En el ámbito subterráneo, la digitalización permite integrar información geotécnica, estructural y operativa en plataformas colaborativas, mejorando la trazabilidad de decisiones y la coherencia entre fases de diseño y construcción.

Diversos estudios señalan que los gemelos digitales aplicados a infraestructuras subterráneas constituyen “una representación digital dinámica que integra datos del activo físico para apoyar la monitorización, simulación y toma de decisiones” (Babanagar et al., 2025). Esta integración facilita la monitorización continua del comportamiento del túnel, el análisis predictivo del mantenimiento y la optimización de la operación. En el ámbito de la gestión de activos, se ha observado que la digitalización avanzada permite “mejorar la eficiencia operativa y reducir significativamente tiempos en procesos de mantenimiento” (Duijvestijn y Haitsma, 2023).

La incorporación de sensores distribuidos, sistemas IoT (*Internet of Things*) y plataformas de análisis de datos en tiempo real ha permitido avanzar hacia modelos de gestión basados en condición, sustituyendo progresivamente esquemas de mantenimiento correctivo o preventivo por estrategias predictivas fundamentadas en datos medidos in situ.

La evolución tecnológica de las tuneladoras (TBM) ha sido uno de los principales vectores de innovación en obras de desarrollo lineal subterráneas. En proyectos recientes se ha documentado el uso creciente de algoritmos de aprendizaje automático para optimizar parámetros de excavación y anticipar incidencias geológicas. Según Singh et al. (2025), “los sistemas basados en aprendizaje automático aplicados a la excavación mecanizada han alcanzado una elevada precisión en la predicción de condiciones geológicas adversas, permitiendo ajustar parámetros operativos en tiempo real y reducir riesgos asociados a cambios bruscos de terreno”.

En entornos geológicos complejos, la introducción de TBM de densidad variable permite adaptar el modo de operación entre presión de tierras (EPB) y lodos presurizados sin necesidad de sustituir la máquina. Herrenknecht AG (2025) describe estas “máquinas como sistemas híbridos capaces de garantizar la estabilidad del frente en condiciones geológicas variables mediante la adaptación controlada del modo de soporte”.

Más allá de la excavación, la automatización se extiende a sistemas de monitorización estructural y control de convergencias, integrando datos en tiempo real para validar hipótesis de diseño y reducir la incertidumbre durante la ejecución.

La innovación en materiales constituye otro eje estratégico en la evolución de las obras subterráneas. La mejora de la durabilidad de los revestimientos responde tanto a exigencias estructurales como a criterios de sostenibilidad a largo plazo.

En el ámbito de los refuerzos estructurales, el uso de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) en dovelas prefabricadas ha demostrado ventajas significativas frente al acero convencional en ambientes agresivos. Caratelli et al. (2017) destacan que el GFRP es “no conductor de electricidad y no magnético”, lo que reduce problemas asociados a corrientes parásitas en entornos ferroviarios y mejora la durabilidad en ambientes con elevada humedad o presencia de sales.

Asimismo, el desarrollo de hormigones avanzados con capacidad de autorreparación representa una línea de investigación prometedora. Se ha señalado que el hormigón autorreparable puede “sellar microfisuras mediante procesos de precipitación mineral inducida, prolongando la vida útil de las infraestructuras y reduciendo necesidades de mantenimiento” (BuildTwin, 2025). Aunque su

aplicación en túneles lineales aún se encuentra en fases de consolidación, su potencial en entornos de difícil acceso resulta significativo.

La sostenibilidad en obras subterráneas ha pasado de ser un criterio complementario a constituir un objetivo estructural del proyecto. En este contexto, la integración de sistemas energéticos en el propio revestimiento del túnel ha dado lugar al concepto de túneles energéticos. Brandl, Adam y Markiewicz (2006) describen los “sistemas geotérmicos integrados en estructuras subterráneas como soluciones que permiten aprovechar el intercambio térmico entre el terreno y la infraestructura para calefacción y refrigeración”, convirtiendo el túnel en un elemento activo dentro del sistema energético urbano.

Por otro lado, la gestión del material excavado (muck) se ha transformado mediante tecnologías avanzadas de clasificación y reutilización. Hauzinger et al. (2025) destacan el empleo de “tecnologías de sensores apoyadas en inteligencia artificial para la clasificación optimizada del material excavado”, facilitando su reutilización como árido o material de relleno, reduciendo la huella ambiental del proyecto.

En la fase de operación, la optimización energética también se manifiesta en sistemas de ventilación bajo demanda (Ventilation on Demand, VOD). Chinyadza et al. (2026) señalan que la aplicación de inteligencia artificial en sistemas de ventilación permite “ajustar dinámicamente el caudal de aire en función de condiciones operativas reales”, alcanzando reducciones significativas en el consumo energético.

Las tendencias actuales en obras subterráneas lineales apuntan hacia una convergencia entre digitalización, automatización y sostenibilidad. La innovación no se limita a la maquinaria o a los materiales, sino que implica una transformación integral del proceso de diseño, construcción y operación. La integración de modelos digitales dinámicos, algoritmos de optimización, materiales avanzados y estrategias de economía circular redefine el concepto tradicional de túnel como infraestructura pasiva, convirtiéndolo en un sistema inteligente y adaptativo dentro del entorno urbano e interurbano.

### **2.12. Síntesis histórica y analítica de las obras subterráneas de desarrollo lineal**

El presente capítulo ha desarrollado de forma sistemática el estado del arte de la ingeniería de obras subterráneas de desarrollo lineal, abordando su evolución histórica, su base geotécnica y geomecánica, las metodologías de caracterización del terreno y las soluciones constructivas actualmente disponibles.

En primer lugar, se ha expuesto la evolución histórica de las obras subterráneas, desde los métodos manuales y empíricos hasta la industrialización completa mediante tuneladoras de última generación. Esta evolución no ha sido únicamente tecnológica, sino también conceptual: el paso de una excavación basada en la experiencia práctica a una ingeniería apoyada en la caracterización geotécnica, el análisis del comportamiento del terreno y la integración de modelos predictivos ha transformado radicalmente el diseño y ejecución de túneles.

Se ha analizado el comportamiento del terreno frente a excavaciones subterráneas, diferenciando entre macizos rocosos y suelos, y poniendo de manifiesto que la respuesta mecánica del terreno — redistribución de tensiones, deformaciones, convergencias, fenómenos de *squeezing*, hinchamiento o colapso. En este contexto, se han identificado y estudiado los parámetros geotécnicos y geomecánicos fundamentales que gobiernan dicha respuesta: resistencia, deformabilidad, estado tensional, discontinuidades, permeabilidad y condiciones hidrogeológicas.

El capítulo ha profundizado en las principales clasificaciones geomecánicas en macizos rocosos — RMR de Bieniawski, Q de Barton, GSI de Hoek y adaptaciones de Romana— así como en las clasificaciones de suelos más empleadas. Se ha realizado una comparativa crítica entre estos sistemas, analizando sus fundamentos, ámbitos de aplicación y limitaciones, destacando su carácter empírico y su utilidad como herramientas de predimensionamiento más que como modelos deterministas de diseño. Se ha puesto especial énfasis en la necesidad de interpretar las clasificaciones como instrumentos de apoyo a la decisión técnica, integrándolas con el juicio ingenieril y la observación en obra.

Asimismo, se han revisado las metodologías existentes para la caracterización de obras subterráneas, incluyendo técnicas de investigación directa e indirecta, subrayando la importancia de la calidad, representatividad e incertidumbre de los datos geológicos y geotécnicos en las fases iniciales del proyecto.

En el ámbito constructivo, se ha desarrollado un análisis exhaustivo de los métodos empleados en la excavación de túneles. Por un lado, los métodos convencionales y semimecanizados —Nuevo Método Austriaco, Cut & Cover, métodos clásicos— mantienen su vigencia por su flexibilidad y capacidad de adaptación a entornos geológicos variables o condicionantes urbanos complejos.

Por otro, los métodos mecanizados han redefinido la ingeniería subterránea contemporánea, incluyendo voladura, tuneladoras abiertas para roca, rozadoras, escudos simples y dobles, sistemas

EPB, Slurry Shield e Hidroshield, cada uno con un campo de aplicación claramente delimitado por la competencia del terreno, su permeabilidad y las condiciones hidrogeológicas.

El estudio se ha completado con el análisis de los principales elementos de sostenimiento —cerchas, bulones, hormigón proyectado, paraguas de micropilotes, jet grouting, inyecciones, drenes y dovelas— entendidos como parte de una estrategia integral de control de deformaciones y redistribución de tensiones. Se ha destacado que el sostenimiento no es un elemento accesorio, sino una parte estructural y geotécnica esencial del sistema túnel–terreno.

Finalmente, se ha abordado la relación entre tipología de túnel, método de excavación y partición de sección, demostrando que la elección constructiva no puede realizarse de forma aislada, sino como resultado de una integración coherente entre comportamiento del terreno, geometría, entorno y objetivos funcionales de la infraestructura. El capítulo se ha cerrado con una visión sobre innovación y tendencias actuales, incorporando digitalización, automatización, nuevas tecnologías de tunelación y criterios de sostenibilidad.

En conjunto, el estado del arte desarrollado establece el marco técnico y conceptual necesario para comprender la complejidad de la toma de decisiones en obras subterráneas y el nicho en el que se encuentra la herramienta que se va a desarrollar a lo largo del proyecto. La integración entre caracterización geomecánica, método constructivo y sistema de sostenimiento constituye el eje vertebrador de la ingeniería subterránea moderna y la base sobre la que se fundamenta el desarrollo metodológico posterior del presente trabajo.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

#### 3.1. Justificación de la necesidad de la herramienta de decisión

La definición de una obra subterránea de carácter lineal se apoya, en sus primeras fases de estudio y anteproyecto, en un conjunto de datos geotécnicos y geométricos que condicionan de forma decisiva el desarrollo posterior del proyecto. En la práctica profesional, es habitual que las decisiones iniciales sobre las particiones de sección longitudinal, métodos constructivos, tipos de sostenimiento y ritmos de avance se adopten con un nivel de información incompleto o bajo plazos ajustados.



Figura 45. Esquema general de desarrollo de un proyecto de obra subterránea de desarrollo lineal. Fuente: Elaboración propia

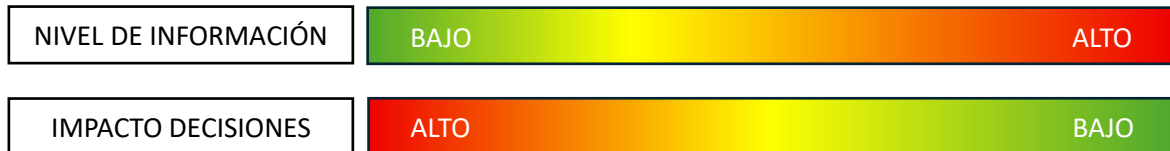


Figura 46. Nivel de información e impacto de las decisiones a lo largo del desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se muestra en las gráficas anteriores, las decisiones más relevantes en una obra subterránea suelen adoptarse en etapas muy tempranas del proceso, donde la información es todavía limitada. Estas decisiones condicionan la evolución posterior del proyecto, la necesidad de ajustes sucesivos y en muchos casos, la viabilidad técnica y económica.

En estas fases iniciales del proyecto, el proceso de toma de decisiones no depende únicamente de los datos existentes, sino que se apoya de forma significativa en la experiencia previa y el conocimiento del equipo técnico sobre obras que se han ejecutado en la zona o en contextos geotécnicos similares.

La elección de las diferentes acciones que se deben llevar a cabo a lo largo de la obra suele basarse en soluciones ya conocidas por el personal técnico, que han demostrado un funcionamiento adecuado en actuaciones anteriores. Si bien este enfoque resulta lógico, y en muchos casos eficaz, introduce una variante en la dependencia directa del bagaje técnico del personal implicado y del grado de conocimiento específico del entorno geológico, lo que puede limitar la exploración de alternativas distintas o más adecuadas para el caso concreto.

Esta dependencia del criterio individual y del conocimiento local hace que, ante condiciones similares, diferentes equipos técnicos puedan plantear soluciones distintas, no siempre comparables entre sí. En este contexto, la ausencia de un marco sistemático que permita relacionar los datos disponibles con alternativas constructivas objetivas dificulta la trazabilidad de las decisiones adoptadas y reduce la capacidad de analizar de forma estructurada distintas opciones.

<b>Fase del proyecto</b>	<b>Información geotécnica</b>	<b>Factores técnicos dominantes</b>	<b>Factores condicionantes</b>
Estudios previos / Anteproyecto	Baja	Interpretación preliminar del terreno, experiencias previas, analogías con obras cercanas	Plazos ajustados, falta de sondeos, incertidumbre geológica
Proyecto básico	Media	Definición inicial del trazado, métodos constructivos viables, primeras hipótesis de sostenimiento	Información parcial del terreno, necesidad de simplificación
Proyecto constructivo	Alta	Caracterización detallada del terreno, diseño de sostenimientos, planificación constructiva	Coordinación técnica, optimización de soluciones

*Tabla 23. Factores que influyen en la toma de decisiones en las distintas fases de proyecto. Fuente: Elaboración propia*

Se constata en el ámbito profesional que las decisiones que se toman en fase de proyecto condicionan de manera determinante la forma de actuar, afectando no solo al diseño técnico o geométrico de la obra, sino a la planificación, estimación de costes y la organización de los diferentes medios humanos y técnicos.

Esta situación se ve agravada por la limitación de tiempo y plazos cada vez más ajustados que caracterizan los trabajos de la ingeniería en la actualidad, afectando de manera directa a la fase de redacción del proyecto.

En este contexto, las decisiones iniciales relativas al método constructivo, la partición del túnel, los sistemas de sostenimiento o los ritmos de avance deben adoptarse, en muchos casos, con un nivel de información incompleto y sin la posibilidad de realizar análisis exhaustivos o comparativas detalladas entre alternativas.

En estas fases tempranas, no siempre resulta viable evaluar de forma sistemática las distintas opciones constructivas, lo que incrementa el riesgo de adoptar planteamientos poco ajustados a las condiciones reales del terreno o del entorno. Como consecuencia, es frecuente que estas decisiones iniciales deban revisarse o modificarse en fases más avanzadas del proyecto, una vez se dispone de información más precisa procedente de campañas geotécnicas específicas, ensayos de laboratorio o datos de auscultación durante la ejecución.

Estos reajustes tardíos suelen traducirse en pérdidas de tiempo, reducción de la productividad y, en determinados casos, en dificultades para actualizar de forma coherente la documentación técnica del proyecto, dando lugar a desviaciones económicas y a un aumento de la incertidumbre durante los periodos necesarios para corregir las decisiones adoptadas inicialmente.

Por su parte, en el ámbito de las empresas constructoras, los departamentos de estudios afrontan una problemática específica en los procesos de licitación de obras subterráneas. Habitualmente, estos equipos deben trabajar con la información geotécnica proporcionada en el proyecto, que en muchos casos es limitada o genérica, y bajo plazos de entrega muy exigentes que restringen la posibilidad de realizar análisis alternativos en profundidad.

A pesar de estas limitaciones, resulta necesario plantear soluciones constructivas coherentes, justificar la metodología de ejecución, definir los medios materiales y humanos y estimar los costes asociados. En este contexto, es habitual que se adopten como referencia las soluciones incluidas en el proyecto que se licita, aun cuando puedan existir alternativas técnicas viables que no se exploran por falta de tiempo, herramientas adecuadas o un marco sistemático que permita compararlas de forma objetiva.



*Figura 47. Esquema general de desarrollo de oferta para la administración pública. Fuente: Elaboración propia*

En este escenario, la elección también se ve condicionada nuevamente por la experiencia previa del equipo técnico en obras anteriores, lo que puede derivar en planteamientos conservadores o poco optimizados.

La ausencia de una herramienta que permita evaluar de forma sistemática diferentes alternativas constructivas dificulta la capacidad de análisis y limita la presentación de propuestas técnicas diferenciadas.

<b>Aspecto</b>	<b>Fases de proyecto (ingeniería / consultoría)</b>	<b>Estudios de licitación (empresas constructoras)</b>
información geotécnica	Bajo-medio en fases iniciales, aumentando progresivamente a medida que avanza el proyecto	Limitado y condicionado a la información incluida en el proyecto de licitación
Precisión de los datos	Variable, con hipótesis preliminares y necesidad de validación posterior	Fija, sin posibilidad de ampliar campañas geotécnicas
Plazos disponibles	Ajustados, especialmente en anteproyecto y proyecto básico	Muy reducidos, definidos por el calendario de la licitación
Grado de incertidumbre	Alto en fases iniciales, decreciente con el desarrollo del proyecto	Alto, con escaso margen para reducirlo
Análisis de alternativas	Moderada, dependiente del tiempo y de la experiencia del equipo técnico	Limitada, condicionada por plazos y recursos disponibles
Rapidez en la toma de decisiones	Alta, para orientar el desarrollo del proyecto	Muy alta, para poder presentar una oferta técnica y económica competitiva
Consecuencias de decisiones erróneas	Modificaciones posteriores del proyecto, ajustes técnicos y económicos	Riesgo de ofertas poco competitivas o problemas durante la ejecución
Rol de herramientas de apoyo	Orientar y estructurar decisiones preliminares	Comparar alternativas y justificar propuestas técnicas

Tabla 24. Comparativa entre fase de proyecto y licitación en obras subterráneas. Fuente: Elaboración propia

Por todos estos motivos mencionados anteriormente, se pone de manifiesto la necesidad de disponer de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permita estructurar y sistematizar el proceso de predimensionamiento y estudio de obras subterráneas, reduciendo la dependencia exclusiva del conocimiento individual o local del equipo técnico. Una herramienta que sea capaz de integrar la información geotécnica disponible en fases preliminares y relacionarla con

soluciones constructivas, ofreciendo un abanico de alternativas razonadas que puedan ser evaluadas y comparadas desde las primeras fases. Su carácter dinámico permitiría, además incorporar progresivamente nueva información a medida que se disponga de ella, manteniendo la coherencia y planteamiento a lo largo de todo el ciclo del proyecto.



Figura 48. Comparativa entre situación actual y escenario apoyado por la herramienta. Fuente: Elaboración propia

De este modo, la herramienta que se propone no pretende sustituir la experiencia ni el criterio del ingeniero, sino complementarlos y reforzarlos, proporcionando una base técnica objetiva que facilite la comparativa de información, toma de decisiones y reduzca la incertidumbre en estas fases preliminares y anteproyectos tan importantes, contribuyendo a la mejora de la eficiencia, calidad técnicas y productividad tanto en la redacción de proyectos como en los estudios técnicos y económicos asociados a los procesos de licitación de estos.

### 3.2. Limitaciones de los métodos actuales de caracterización y decisión

La caracterización del terreno se trata de uno de los pilares fundamentales en la ingeniería cuando hablamos de obras subterráneas, sobre la que se basan las decisiones constructivas que se toman. Sin embargo, la forma en la que esta información se emplea en fases preliminares presenta una serie de limitaciones que afecta a la coherencia, trazabilidad y calidad de las decisiones. Estas limitaciones no están relacionadas con la validez de las clasificaciones adoptadas – RMR de Bieniawski, Q de Burton, ICE, Romana, etc. – que están ampliamente contrastadas y aceptadas, sino con el modo en el que se utilizan de forma aislada y no integrada dentro de un proceso de decisión. Uno de los aspectos más relevantes es el uso independiente y no comparativo de las clasificaciones geomecánicas. En muchos proyectos, el análisis del terreno se apoya de manera predominante en

una única clasificación, seleccionada en función del criterio técnico, experiencia previa o formación. Así, ante un mismo tramo de túnel con un valor de RMR de Bieniawski, por ejemplo, de 65, distintos técnicos pueden proponer soluciones constructivas en función de su interpretación personal o experiencia propia.

De igual forma, para un mismo proyecto, los técnicos pueden basar su decisión en el RMR de Bieniawski, otro en la de Barton, otro en Romana y otro en otra clasificación reconocida, sin que exista una comparación sistemática entre los resultados obtenidos por cada una de ellas.

Esta forma de trabajo introduce un componente arbitrario en la toma de decisiones, no porque las clasificaciones sean imprecisas, sino porque se utilizan de manera parcial. La falta de una visión conjunta impide identificar las convergencias, divergencias o rangos de comportamiento del terreno que pueden enriquecer el análisis. En este sentido, la ausencia de herramientas que permitan disponer simultáneamente de la información proporcionada por varias clasificaciones limita la capacidad del técnico para evaluar de forma global las posibles soluciones constructivas.



Figura 49. Esquema conceptual comparativo de la situación actual y el enfoque integrado. Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto relevante es la interpretación manual de los resultados, basada habitualmente en tablas, gráficos y documentos de apoyo que el técnico consulta de manera individual. Aunque este proceso es válido y forma parte del ejercicio profesional, resulta poco eficiente en contextos donde los plazos son reducidos y la información disponible no está completa. Además, esta interpretación manual suele apoyarse en hojas de cálculo internas, tablas o documentos heredados de proyectos anteriores, cuya estructura y alcance dependen en gran medida del equipo que los ha desarrollado.

La dependencia de soluciones tipo heredadas constituyen otra limitación habitual. En muchas zonas, ciudades o entornos geológicos y geotécnicos similares, se tiende a reproducir las soluciones que han funcionado correctamente en el pasado. Ejemplo de ello son los métodos constructivos asociados a determinados ámbitos geográficos como el conocido “Método Belga/Método Clásico Madrid”, que han demostrado su eficiencia en contextos específicos. Si bien estas soluciones resultan en muchos casos adecuadas, seguras y rápidas de valorar en fase de proyecto, basándose en la eficiencia del método, su aplicación sistemática puede limitar la exploración de alternativas técnicas igualmente válidas.

Este enfoque conservador, basado en la repetición de soluciones, reduce la capacidad de innovación y dificulta la adaptación a nuevas condiciones, cuando se dispone de información adicional o cuando el trazado presenta singularidades frente a actuaciones anteriores.

La falta de una comparativa estructurada de alternativas es otra de las limitaciones con las que se cuenta actualmente en fases preliminares de proyecto. En muchos casos, una vez elegida la solución, no se realiza una valoración de otra serie de alternativas que permitan disponer de un abanico de opciones. Esta carencia dificulta la revisión del planteamiento cuando se incorporan nuevos datos geotécnicos o se cambian las condiciones de contorno.

La situación descrita es especialmente relevante en el ámbito de las empresas constructoras y sus departamentos de estudios. Estos no tienen como objetivo principal la realización ni comprobación detallada de los cálculos estructurales o geotécnicos – que se asumen como correctos en el proyecto de licitación - sino la evaluación técnica y económica de la solución propuesta, así como la identificación de posibles alternativas que permitan optimizar la ejecución de la obra.

En este contexto, el equipo técnico centra su trabajo en el análisis de la información disponible en el proyecto, como el anejo geotécnico y geológico correspondiente, la definición de medios, rendimientos y procesos constructivos. Sin embargo, esta labor se desarrolla sin el apoyo de una herramienta específica que permita comparar diferentes métodos constructivos en función de los

datos disponibles del terreno, dependiendo de nuevo del conocimiento técnico, experiencia previa y soluciones ya ejecutadas anteriormente.

Además, la ausencia de un marco de trabajo estructurado dificulta la realización de comparativas económicas preliminares entre las distintas soluciones, basadas en parámetros clave como volúmenes de excavación, rendimientos de avance, tipología y cuantía de sostenimientos, necesidad de tratamientos auxiliares y medios de transporte. Estas partidas anteriormente mencionadas representan una parte importante del coste total de la obra y condicionan de manera directa la competitividad de esta frente a otras.

Por otro lado, existen numerosas aplicaciones y herramientas informáticas orientadas al diseño de obras subterráneas – GEO5, Strato, TPC *TunnelCAD*, *OpenTunnel Designer* entre otros – que se basan en modelos numéricos avanzados, herramientas de cálculo estructural o entornos BIM, que han sido creadas para fases de proyecto más avanzadas, cuando la geometría, los parámetros geotécnicos y las condiciones de contorno están ya suficientemente definidas. Estas herramientas resultan útiles para el dimensionamiento detallado, verificación de soluciones y extracción de documentación gráfica de proyecto, pero no están orientadas a la toma de decisiones inicial, donde la información es incompleta y se requiere rapidez, flexibilidad y capacidad de comparación para ahorrar tiempo que se podrá dedicar más adelante al uso de estas herramientas anteriormente mencionadas para darle un mejor acabado al proyecto.

<b>Aspecto analizado</b>	<b>Herramientas actuales basadas en el diseño</b>	<b>Necesidades reales en fases preliminares y licitación</b>
Fase principal de aplicación	Proyecto avanzado / diseño constructivo	Estudios previos, anteproyecto y licitación
Objetivo principal	Verificación y dimensionamiento detallado	Orientación, predimensionamiento y comparación
Tipo de información requerida	Alta y precisa	Limitada, incompleta o aproximada
Tratamiento del terreno	Modelo único y definido	Rangos, escenarios y alternativas
Uso de clasificaciones geomecánicas	Parcial o indirecto	Integrado y comparativo

<b>Aspecto analizado</b>	<b>Herramientas actuales basadas en el diseño</b>	<b>Necesidades reales en fases preliminares y licitación</b>
Capacidad de comparar alternativas	Limitada o inexistente	Esencial
Gestión de la incertidumbre	Implícita o no considerada	Explícita y asumida
Tiempo de preparación	Elevado	Reducido
Tiempo de cálculo	Medio–alto	Muy bajo
Nivel de especialización requerido	Alto	Medio
Adecuación a estudios de licitación	Baja	Alta
Flexibilidad ante cambios de datos	Limitada	Alta
Tipo de resultado	Solución cerrada	Abanico de soluciones viables

*Tabla 25. Comparativa entre herramientas actuales basadas en el diseño y las necesidades reales. Fuente: Elaboración propia*

En consecuencia, se identifica una brecha clara entre los métodos actuales de caracterización y las necesidades reales en las fases iniciales del proyecto y los departamentos de estudios. La ausencia de una herramienta que integre múltiples clasificaciones permita comparar alternativas de forma sistemática, reduciendo la dependencia exclusiva del criterio individual del técnico pone de manifiesto una oportunidad de desarrollar un modelo de apoyo en este nicho.

La herramienta propuesta en este Trabajo Fin de Máster se plantea como una respuesta a estas limitaciones que se han observado, sin buscar la sustitución de los métodos existentes ni el criterio profesional, sino como complemento y herramienta de apoyo.

El objetivo es proporcionar un marco estructurado que facilite la comparación de soluciones y los procesos de decisión de manera conjunta, especialmente donde el tiempo y la información es limitada.

### **3.3. Herramientas y modelos de apoyo a la decisión en ingeniería geotécnica y subterránea**

En la actualidad existen numerosas herramientas y modelos de apoyo que permiten analizar el comportamiento del terreno, dimensionar estructuras y verificar las soluciones constructivas. Estas herramientas han experimentado un notable desarrollo en las últimas décadas, impulsadas por el avance de la capacidad de cálculo, la digitalización de los procesos de proyecto y la implantación de entornos colaborativos. No obstante, su utilidad y alcance varían significativamente en función de la fase del proyecto en la que nos encontremos.

Uno de los grupos de herramientas más extendido se trata de los modelos numéricos, basados en métodos de cálculo como los elementos finitos o diferencias finitas. Estas herramientas permiten simular con gran detalle el comportamiento del terreno y de las estructuras subterráneas, analizando estados tensionales, deformaciones y procesos constructivos, de forma que se pueda verificar la seguridad y la viabilidad de una solución concreta. Su principal ventaja reside en la precisión y profundidad de análisis, lo que las convierte en herramientas fundamentales en fases avanzadas de proyecto y durante la verificación de la solución seleccionada.

Sin embargo, requieren de una definición precisa de la geometría de la solución, parámetros geotécnicos y condiciones de contorno conocidas y un periodo de modelización y cálculo elevado, además de conocimientos técnicos de uso de las herramientas.

Otro de los grupos importantes y más relevantes en los últimos años se trata de las herramientas BIM (*Building Information Modeling*) o entorno de modelado digital. Estas plataformas favorecen la coordinación entre disciplinas, gestión de información del proyecto y visualización de la obra, permitiendo integrar geometría, proceso constructivo y datos asociados. Su principal aportación se basa en la coordinación y coherencia, permitiendo detectar las interferencias entre los trabajos de distintas disciplinas.

Al igual que con los modelos numéricos, estas herramientas están orientadas a fases de proyecto avanzadas, donde las soluciones ya han sido definidas y permiten una visualización de la obra finalizada, sin proporcionar por sí mismas criterios para la selección preliminar de soluciones.

Asimismo, existen programas específicos de diseño estructural de túneles, que se enfocan en el dimensionamiento de revestimientos, sostenimientos y estructuras asociadas al correcto funcionamiento de la obra a lo largo de su vida útil. Su utilidad es indiscutible en el desarrollo técnico del proyecto, pero su enfoque y uso parten de una solución ya adoptada con anterioridad.

Junto con este conjunto de herramientas digitales, nos encontramos con las guías técnicas y recomendaciones de las distintas instituciones, organizaciones nacionales e internacionales de referencia en la ingeniería subterránea que continúan siendo fundamentales para el diseño y ejecución de obras subterráneas. Estos documentos proporcionan criterios generales, rangos de aplicación y recomendaciones basadas en la experiencia acumulada, resultando útiles para orientar al técnico a alcanzar la solución más viable.

Sin embargo, su aplicación requiere de una interpretación manual y contextualizada, que no ofrece un marco que permita comparar las diferentes clasificaciones geomecánicas ni las soluciones para un mismo tramo de obra.

<b>Tipo de herramienta</b>	<b>Fase preliminar</b>	<b>Proyecto avanzado</b>	<b>Comparación de alternativas</b>	<b>Rapidez de uso</b>
Modelos numéricos	Baja	Muy alta	Baja	Baja
Herramientas BIM	Baja	Alta	Muy baja	Media
Software de diseño estructural	Baja	Alta	Muy baja	Media
Guías técnicas	Media	Media	Baja	Media

*Tabla 26. Tipología de herramientas existentes y su grado de adecuación a las distintas fases de proyecto. Fuente: Elaboración propia*

En conjunto, se observa que las herramientas existentes ofrecen un elevado nivel de detalle y fiabilidad técnica, pero están claramente orientadas al análisis y verificación de soluciones adoptadas en fases preliminares. Existe, por lo tanto, la falta de una herramienta específicamente diseñada para fases preliminares, donde se requiere integrar información incompleta, comparar alternativas de manera rápida y eficaz y reducir la dependencia del criterio individual de cada técnico.

En este contexto, la herramienta que se presenta se diferencia de las anteriores al centrarse en el predimensionamiento y la toma de decisiones iniciales, actuando de guía a lo largo del proyecto, con especial hincapié en las fases preliminares y fases de estudio de ejecución de obra, además de puente entre la caracterización geomecánica del terreno y las posibles soluciones constructivas.

A diferencia de las herramientas y aplicaciones mencionadas anteriormente, no pretende realizar cálculos ni verificaciones finales, sino proporcionar la información necesaria dentro de un marco de trabajo que permita evaluar, comparar y descartar alternativas en función de los datos disponibles, integrando simultáneamente múltiples clasificaciones geomecánicas y criterios constructivos.

De este modo, la herramienta que se plantea complementa las existentes, facilitando una transición de información más coherentes y estructurada hacia las fases de diseño avanzado y ejecución. Su aportación se sitúa en la zona en la que existe un vacío, la necesidad de tomar decisiones fundamentadas, rápidas y comparables cuando la información es limitada y las consecuencias de dichas decisiones tienen una marcada importancia.

#### ***3.4. Identificación de carencias y oportunidades de mejora***

El análisis realizado en los apartados anteriores muestra que, pese al desarrollo técnico que han alcanzado las obras subterráneas, aún existen una serie de carencias en la forma en la que se toman las decisiones durante las fases iniciales del proyecto y en las fases de estudio que se realizan en fase de licitación de las obras por parte de las empresas constructoras. Estas carencias están relacionadas con la inexistencia de un enfoque metodológico que permita integrar, estructurar y comparar la información disponible de manera sistemática.

Una de las principales carencias observadas es la falta de integración entre las distintas clasificaciones geomecánicas. En la práctica profesional, estas clasificaciones se utilizan habitualmente de forma independiente, seleccionando una u otra en función del criterio técnico, experiencia previa o contexto del proyecto. Este uso aislado impide obtener una visión conjunta de las diferentes clasificaciones y dificulta la identificación de respuestas en fases preliminares.

Siguiendo con lo anterior aparece una dependencia excesiva del criterio individual del técnico, que se convierte en el principal factor de decisión cuando la información está incompleta y los plazos son ajustados. Si bien la experiencia profesional es un valor fundamental, su peso exclusivo en la toma de decisiones introduce variabilidad entre proyectos y equipos, dificultando la trazabilidad de las soluciones adoptadas, complicando la revisión o justificación de planteamientos cuando se cambian las condiciones de proyecto.

Otra carencia que se ha observado es la dificultad para comparar alternativas de forma estructurada. En muchos casos, una vez se adopta la solución preliminar o la que se valida en fase de anteproyecto, no se analizan otras posibles opciones ni se documentan las razones de su descarte. Esta falta de comparación reduce la capacidad de optimización del proyecto y limita la identificación de soluciones, que, aun siendo viables técnicamente, no forman parte del repertorio habitual del equipo de diseño o el entorno geográfico.

Finalmente, como se ha comentado anteriormente, se constata la ausencia de herramientas específicas orientadas al predimensionamiento de obras subterráneas. Las herramientas que

existen en la actualidad están enfocadas en el diseño avanzado, cálculo de estructuras y validaciones de soluciones definidas, sin entrar a cubrir el ámbito intermedio entre la caracterización del terreno y la definición de la solución. Este espacio obliga a los técnicos a recurrir a procedimientos manuales o soluciones tipo, que resultan útiles en fases en las que se requiere rapidez y coherencia.

Estas carencias se manifiestan de forma especialmente acusada en las fases de estudio de proyectos en procesos de licitación, donde los equipos técnicos trabajan con información geotécnica limitada, plazos muy ajustados y sin capacidad para ampliar o contrastar los datos disponibles. En estos escenarios, la caracterización del terreno incluida en el proyecto de licitación suele constituir la única base técnica para la toma de decisiones, lo que incrementa la dependencia del criterio individual del técnico y de soluciones previamente conocidas.

Esta situación limita la capacidad de las empresas constructoras para presentar alternativas técnicas coherentes, además de realizar valoraciones económicas de estas. En consecuencia, muchas de las decisiones que se toman en estas fases se basan en lo redactado en el proyecto, reduciendo el margen de optimización técnica de las propuestas presentadas.

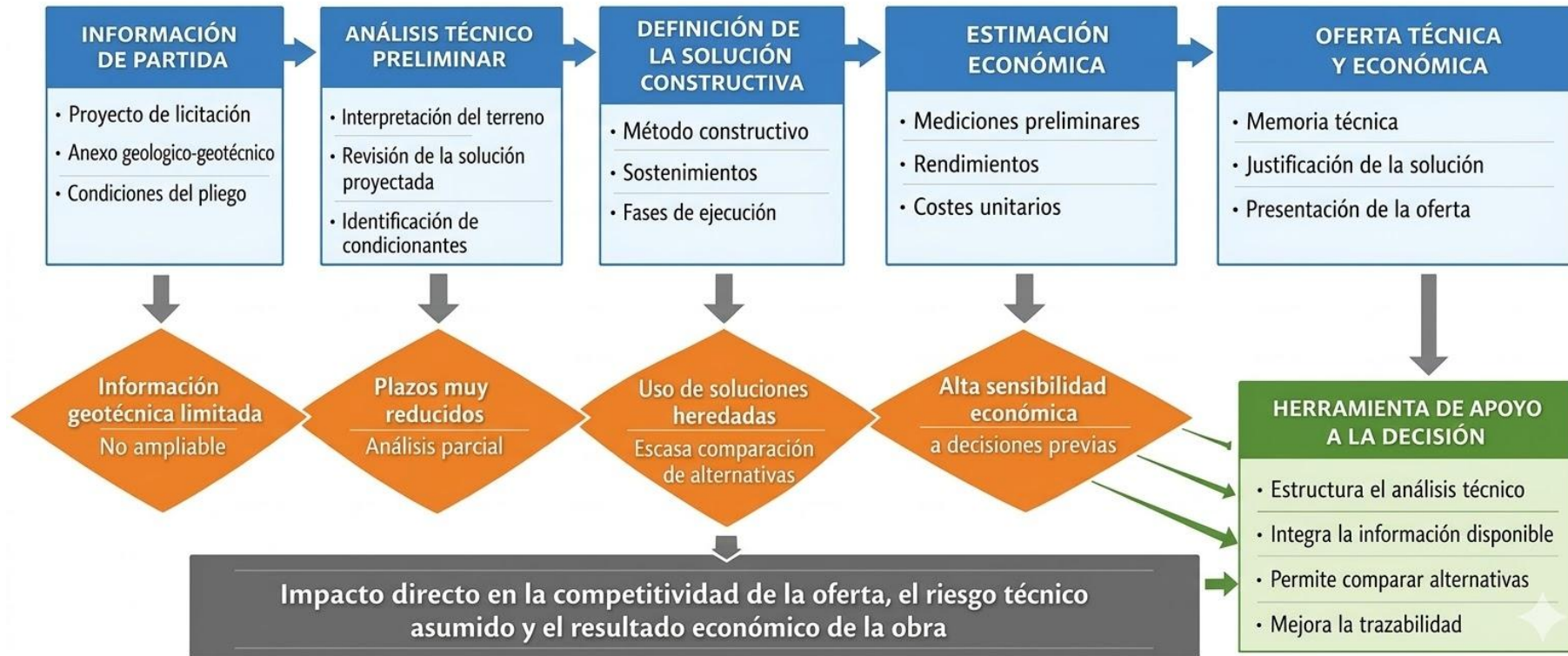


Figura 50. Esquema del proceso de toma de decisiones en fase de licitación. Fuente: Elaboración propia

Estas carencias que se han planteado, lejos de suponer una debilidad, constituyen una oportunidad clara de mejora, generando un marco de análisis que permitiría enriquecer la información disponible, reduciendo la incertidumbre de las decisiones. Del mismo modo, la incorporación de la herramienta de apoyo a la toma de decisiones permite reducir la dependencia exclusiva del criterio individual y una forma de mantener una trazabilidad de las decisiones tomadas.

La posibilidad de comparar alternativas de forma rápida y estructurada abre la puerta a una mejora significativa en la eficiencia del proceso de proyecto, en la calidad técnica de las soluciones adoptadas y en la capacidad de optimización tanto técnica como económica. Este aspecto resulta especialmente relevante en estudios de licitación, donde la comparación de distintos métodos constructivos y procesos asociados puede marcar la diferencia entre propuestas técnicamente similares.

Asimismo, el desarrollo de una herramienta específica para el predimensionamiento representa un cambio metodológico claro, incorporando un componente innovador al proceso de toma de decisiones en fases preliminares. Este cambio no consiste en introducir nuevos modelos de cálculo ni en sustituir herramientas consolidadas, sino en organizar y sistematizar el conocimiento existente, integrando datos geotécnicos, clasificaciones y criterios constructivos en un entorno único orientado a la toma de decisiones tempranas. Este enfoque contribuye, además, a mejorar la trazabilidad, la coherencia y la reproducibilidad de las decisiones adoptadas.

<b>Carencia identificada</b>	<b>Consecuencia en proyecto y licitación</b>	<b>Oportunidad de mejora con la herramienta propuesta</b>
Uso aislado de clasificaciones geomecánicas	Interpretaciones parciales del macizo; soluciones distintas para un mismo problema según el técnico o la clasificación empleada	Integración simultánea de varias clasificaciones, permitiendo contrastar resultados y reducir la incertidumbre
Dependencia excesiva del criterio individual	Alta variabilidad en decisiones preliminares; dificultad para justificar técnicamente las soluciones adoptadas	Apoyo sistemático a la decisión, manteniendo el criterio técnico pero reforzado por un marco objetivo

<b>Carencia identificada</b>	<b>Consecuencia en proyecto y licitación</b>	<b>Oportunidad de mejora con la herramienta propuesta</b>
Falta de comparación estructurada de alternativas	Selección temprana de una única solución sin análisis comparativo; soluciones conservadoras o poco optimizadas	Evaluación rápida y homogénea de distintas alternativas constructivas
Ausencia de herramientas de predimensionamiento	Retrabajos en fases avanzadas del proyecto; ajustes tardíos de método y sostenimiento	Definición temprana de soluciones coherentes y reducción de cambios posteriores
Información geotécnica limitada en licitaciones	Estudios técnicos basados en supuestos; dificultad para plantear alternativas justificadas	Análisis preliminar robusto a partir de la información disponible en proyecto
Falta de comparación económica preliminar	Dificultad para estimar costes y rendimientos de alternativas; menor competitividad en ofertas	Valoración económica aproximada de diferentes procesos constructivos y sus partidas principales
Dependencia de soluciones tipo heredadas	Repetición sistemática de métodos conocidos; escasa exploración de alternativas	Identificación de soluciones viables fuera del repertorio habitual del equipo técnico

*Tabla 27. Relación entre carencias identificadas, consecuencias y oportunidades de mejora asociadas. Fuente: Elaboración propia*

Se pone de manifiesto que la herramienta no pretende sustituir los métodos existentes ni el criterio profesional del ingeniero, sino complementarlos, reforzando el proceso de toma de decisiones en un contexto técnico donde actualmente existe un vacío.

### ***3.5. Brecha entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas***

La caracterización geomecánica del terreno constituye un elemento fundamental en el estudio y diseño de las obras subterráneas. A través de los distintos sistemas de clasificación se obtiene una descripción estructurada del macizo rocoso o suelo por el que discurrirá la obra, basada en

parámetros como la resistencia, la calidad de las discontinuidades, el estado tensional o la presencia de agua. Sin embargo, esta caracterización, aun siendo imprescindible para llevar a cabo el proyecto, no define los procesos constructivos por sí mismos.

Las clasificaciones geomecánicas describen el comportamiento esperado del terreno, pero no establecen una traducción directa entre los valores obtenidos y las decisiones constructivas. La elección del método de excavación, la partición de la sección, los sostenimientos asociados o los ritmos de avance se realiza habitualmente a partir de recomendaciones generales, guías técnicas y, de forma muy significativa, de la experiencia del técnico responsable. En consecuencia, el paso desde la caracterización del terreno hasta la definición de la solución constructiva no responde a reglas únicas ni automáticas, sino a un proceso interpretativo que introduce un grado elevado de subjetividad.

Esta situación da lugar a un “*gap*” entre la información disponible y las decisiones constructivas, especialmente en fases preliminares. Las clasificaciones describen un marco descriptivo, pero no resuelven de forma directa cuestiones como el método constructivo más adecuado, el sostenimiento más eficiente o las particiones de sección necesarias a lo largo del trazado.

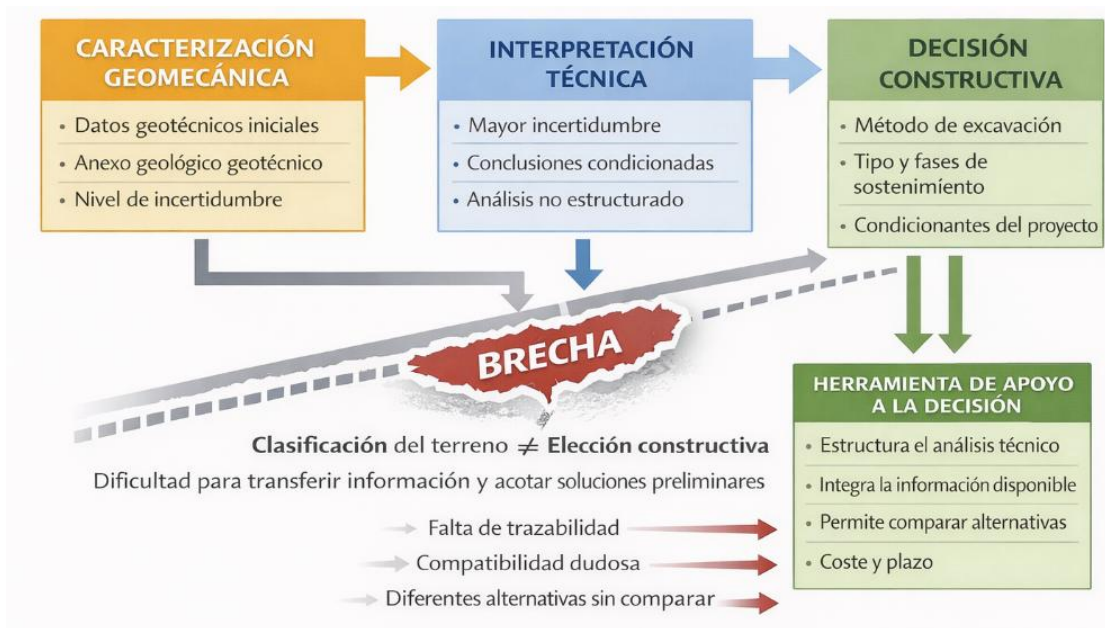


Figura 51. Proceso actual de toma de decisiones y representación de la brecha existente. Fuente: Elaboración propia

La ausencia de una traducción directa puede ilustrarse mediante ejemplos conceptuales habituales en la práctica profesional. Un mismo tramo de túnel con un valor de RMR determinado puede admitir distintas soluciones constructivas en función de la interpretación del técnico: excavación

convencional con sostenimiento inmediato, métodos secuenciales con distintas particiones de sección o incluso métodos mecanizados en determinados contextos.

Del mismo modo, un mismo método constructivo puede dar lugar a soluciones de sostenimiento diferentes según el peso que se otorgue a determinados parámetros geomecánicos o a la experiencia previa en obras similares.

Caracterización geomecánica	Posibles soluciones constructivas
RMR medio–alto	Método convencional, método secuencial, mecanización parcial
Q variable por tramos	Cambios de sostenimiento y longitudes de avance
Macizo heterogéneo	Particiones de sección adaptativas
Presencia de agua	Métodos auxiliares y refuerzo del sostenimiento

*Tabla 28. Ejemplos conceptuales de diferencias entre clasificaciones y soluciones constructivas. Fuente: Elaboración propia*

Estos ejemplos ponen de manifiesto la admisión de múltiples combinaciones posibles, pudiendo ser expresado como:

$$\text{Solución constructiva} = f(\text{Clasificaciones, criterios técnicos, experiencia, condicionantes(Nivel freático, trazado geométrico, longitud, etc.)})$$

*Ecuación 11. Relación entre solución constructiva y variables de decisión. Fuente: Elaboración propia*

Donde intervienen una serie de variables que no son únicamente geomecánicas – longitud de túnel, entorno urbano, accesos, plazos o recursos disponibles -.

Esta brecha es relevante en las fases de estudio para licitaciones, donde la información geotécnica disponible es la incluida en el anexo correspondiente del proyecto, sin capacidad de llevar a cabo nuevos sondeos, además de disponer de un margen reducido para los análisis. En estos casos, los equipos suelen definir soluciones constructivas en base a lo incluido en el proyecto, siendo estas interpretaciones conservadoras, con soluciones tipo, dado que disponen de escasa capacidad para comparar y justificar alternativas.

Por ello se busca un marco intermedio que conecte de forma estructura la caracterización geomecánica y la definición constructiva, para que evolucionen de forma conjunta. Estas desconexiones que existen pueden traducirse en ajustes tardíos en fase de proyecto o incluso

durante la ejecución de obra, cuando se dispone de la información más precisa del terreno, con el consiguiente impacto en plazos, costes y productividad.

En este contexto que se indica, se pone de manifiesto la necesidad de un enfoque intermedio, capaz de actuar como nexo entre la caracterización y la definición de soluciones constructivas preliminares, permitiendo estructurar y sistematizar el proceso de toma de decisiones, integrando las distintas clasificaciones junto con los criterios constructivos y condicionantes del proyecto.

De este modo, la brecha identificada entre la caracterización y la solución constructiva no debe entenderse como una deficiencia de las clasificaciones existentes, sino como una oportunidad para mejorar el proceso de decisión en fases preliminares.

### ***3.6. Potencial de una herramienta sistemática de soluciones constructivas***

Las carencias identificadas a lo largo de este capítulo ponen de manifiesto la necesidad de disponer un enfoque distinto para abordar las decisiones que se toman en las obras subterráneas, principalmente en fases preliminares de proyecto y los estudios asociados a procesos de licitación.

Una herramienta de estas características permitiría estructurar y organizar el proceso de decisión, integrando de forma conjunta la información geomecánica disponible, los condicionantes del proyecto y los criterios constructivos habituales, frente a los procesos actuales, basados en interpretaciones individuales, soluciones tipo que han funcionado con anterioridad, proporcionando un enfoque sistemático que facilitaría la identificación de un abanico de soluciones viables, descartando aquellas que no resulten compatibles con los datos conocidos, dando alternativas validas técnicamente que no forman parte de las soluciones habituales.

Desde el punto de vista técnico, el principal valor añadido reside en su capacidad para relacionar la caracterización del terreno con las decisiones que se toman en el ámbito constructivo, actuando como un marco de referencia que, a partir de las clasificaciones principales y de los datos básicos del proyecto, permita orientar la selección del método constructivo, particiones de sección, sistemas de sostenimiento y rangos de avance más adecuados para cada tramo.

Otro aspecto que merece la pena destacar se trata de la capacidad de adaptación progresiva que dispondrá la herramienta. En fases preliminares, la información es limitada, pero a medida que el proyecto avanza y se incorporan nuevos datos procedentes de los ensayos, sondeos y estudios realizados, se permite actualizar los parámetros de entrada, afinando los resultados y descartando las soluciones inicialmente consideradas como válidas o incorporando nuevas alternativas. Este

funcionamiento reduce la probabilidad de cambios bruscos y permite una evolución más organizada del proyecto.

<b>Fase</b>	<b>Información disponible</b>	<b>Uso principal de la herramienta</b>
Estudios previos	Media	Identificación de soluciones viables
Anteproyecto	Alta	Comparación técnica de alternativas
Proyecto básico	Media	Ajuste de métodos y sostenimientos
Proyecto constructivo	Alta	Verificación de coherencia global
Licitación	Variable	Evaluación técnica y económica

*Tabla 29. Evolución del uso de la herramienta en las diferentes fases del proyecto. Fuente: Elaboración propia*

Por otro lado, en el caso de las licitaciones, el potencial sigue siendo interesante. La posibilidad de evaluar distintas alternativas constructivas a partir de la información disponible en el proyecto permite a los departamentos de estudios plantear soluciones técnicas coherentes y justificadas, que pueden coincidir o no con la solución proyectada por la Administración. Este enfoque busca la elaboración de memorias técnicas más sólidas y permite realizar comparativos útiles a nivel interno para presentar el sobre económico correspondiente, basadas en parámetros clave de este tipo de proyectos como volúmenes de excavación, tipología de sostenimientos, rendimientos de avance o medios auxiliares necesarios.

Desde una perspectiva global, ocupa un espacio que actualmente no se encuentra cubierto por ninguna de las herramientas existentes en el mercado, siendo su aportación práctica no solo a nivel del proyecto, sino que busca la optimización de plazos y mejora de la competitividad en entornos de licitación.

En consecuencia, la implementación de una herramienta de estas características pretende dar un salto cualitativo en la forma de abordar las fases iniciales y de estudio de las obras, de forma que queda justificado el desarrollo de la metodología que se presenta en el siguiente capítulo, donde se definirá el planteamiento general de la herramienta, los parámetros de entrada, su lógica de decisión y las variables de salida.

### **3.7. Aplicación de la herramienta en fases de proyecto y estudios de licitación**

La herramienta que se plantea a lo largo de este Trabajo Fin de Máster se concibe como un instrumento que apoye a las decisiones a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida de un proyecto de obras subterráneas.

El alcance que tendrá estará limitado al nivel de información con el que se cuente, permitiendo su utilización desde fases tempranas de proyecto como en estudio técnicos asociados a procesos de licitación, donde los plazos de entrega de este tipo de estudios tienen grandes restricciones.

En fase de proyecto, desde los estudios previos hasta la fase de proyecto constructivo, la herramienta tiene como objetivo orientar la definición de soluciones constructivas preliminares a partir de la caracterización geomecánica conocida y de los datos del trazado. En los estudios previos y anteproyectos, donde la información geotécnica es limitada, la herramienta permite identificar los métodos constructivos potencialmente viables, descartar aquellos incompatibles con las condiciones de contorno y ofrecer una primera aproximación a las fases constructivas, particiones de sección, sistemas de sostenimiento y rangos de avance de excavación.

A medida que el proyecto avanza y se dispone de mayor información extraída de campañas de sondeos, ensayos del terreno y documentación existente, la herramienta puede utilizarse para refinar soluciones inicialmente planteadas o aportar nuevas que en un principio se habían descartado. En estas fases no sustituye a las herramientas cálculo existentes, sino que aporta información del planteamiento constructivo, reduciendo la probabilidad de cambios en etapas posteriores.

Ya en fase de proyecto constructivo la herramienta pierde importancia frente a las aplicaciones de cálculo, sirviendo únicamente de apoyo para la justificación técnica de las decisiones ya tomadas, permitiendo la trazabilidad del proceso y la posibilidad de documentar la evolución de las decisiones preliminares.

Esta herramienta busca también tener importancia en fases de estudio de las licitaciones públicas o privadas, donde los equipos trabajan únicamente con la información disponible del proyecto u otros proyectos anteriores, sin posibilidad de ampliar las campañas de reconocimiento. La herramienta permite evaluar de forma rápida y estructurada los procesos constructivos posibles, a partir de los datos disponibles.

De esta forma se facilita la comparación de alternativas técnicas, permitiendo analizar los distintos métodos constructivos y demás trabajos que permiten llevar a cabo la obra. Este análisis

comparativo resulta fundamental para la elaboración de memorias técnicas sólidas y para la justificación de soluciones alternativas a las propuestas en el proyecto.

Pretende también ser de apoyo en esta fase para poder realizar estudios económicos preliminares, ya que, a partir de las soluciones propuestas, permita estimar de forma aproximada las magnitudes clave que forman parte del proceso constructivo. Estas estimaciones permiten comparar las alternativas desde un punto de vista técnico-económico, mejorando la calidad y consistencia de las ofertas.

La posibilidad de plantear soluciones distintas a las de proyecto permite a la administración contribuir a poner en valor el esfuerzo técnico realizado en la elaboración de la memoria técnica, frente a propuestas que se limitan a valorar la solución incluida en el proyecto.

### ***3.8. Objetivos específicos derivados de la necesidad detectada***

Una vez analizadas las necesidades que existen en este tipo de proyectos, se plantea el objetivo de la herramienta. Este se basa en servir como apoyo sistemático al proceso de predimensionamiento y definición de soluciones constructivas, actuando como nexo entre la caracterización del terreno y las decisiones constructivas iniciales.

Esta herramienta debe permitir integrar de manera conjunta las principales clasificaciones geomecánicas, evitando su uso aislado y facilitando la interpretación comparativa de las diferentes clasificaciones aceptadas en la actualidad. A partir de dicha caracterización, debe identificar los métodos constructivos potencialmente viables, así como la definición preliminar de las fases constructivas, sostenimientos, particiones de sección y ritmos de avance de la excavación para cada tramo longitudinal, siempre de forma orientativa y sin sustituir el diseño detallado y cálculo estructural.

Asimismo, se busca reducir el criterio individual del técnico en fases tempranas, proporcionando un marco que facilite la comparación de la información disponible, buscando mejorar la coherencia y justificar de forma ordenada las decisiones. En este sentido, se busca una herramienta flexible y con capacidad de adaptarse al aumento progresivo de las características del terreno.

Ya entrando en la aplicación práctica, busca tener utilidad tanto en fases de estudio de alternativas, anteproyectos y proyecto constructivo, además de departamentos de estudios de empresas constructoras.

En conjunto, los objetivos específicos de la herramienta se orientan a cubrir el vacío existente entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas preliminares, posicionándola como un elemento intermedio dentro del ciclo de vida del proyecto. La herramienta no pretende sustituir el criterio profesional del ingeniero ni las herramientas de cálculo avanzado, sino complementarlas, aportando un enfoque sistemático, reproducible y eficiente que mejore la calidad técnica, la planificación y la competitividad de las decisiones adoptadas desde las primeras etapas del proyecto. En la tabla que se muestra a continuación se pretende resumir la relación existente entre las fases de uso de la herramienta y los objetivos principales que busca esta.

<b>Ámbito de aplicación</b>	<b>Objetivo principal de la herramienta</b>
Estudios previos	Identificación de métodos constructivos viables
Anteproyecto	Orientación de fases, sostenimientos y avances
Proyecto básico	Ajuste preliminar por tramos
Proyecto constructivo	Verificación de coherencia global
Licitación	Comparación técnica y económica de alternativas

*Tabla 30. Relación entre la fase de proyecto y el objetivo principal de la herramienta. Fuente: Elaboración propia*

## 4. METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para el desarrollo de la herramienta de predimensionamiento, que servirá de apoyo en la toma de decisiones en obras subterráneas, que ha sido concebida para su aplicación en fases preliminares del proyecto y estudios técnicos asociados a procesos de licitación.

La metodología se construye a partir de las necesidades detectadas en el apartado anterior y que tiene como objetivo estructurar el proceso mediante el cual la información geomecánica disponible se transforma en procesos constructivos.

El enfoque adoptado pretende ser la definición de un marco sistemático de predimensionamiento, capaz de integrar diferentes clasificaciones geomecánicas, criterios constructivos y condicionantes del proyecto. De este modo, la herramienta se sitúa en un nivel intermedio entre la caracterización del terreno y la definición de soluciones constructivas preliminares.

La metodología se estructura en torno a la definición de parámetros de entrada, la aplicación de criterios de clasificación y correlación, y la obtención de variables de salida que orientan la selección de métodos de constructivos, fases de ejecución, sistemas de sostenimiento y rangos de avance. Todo esto se basará en una lógica de decisión basada en reglas condicionales y umbrales, que permiten adaptar los resultados al grado de información disponible y la evolución del conocimiento del terreno.

Finalmente, se aborda la validación conceptual de la metodología, evaluando su coherencia interna con los objetivos planteados, así como para apoyar la toma de decisiones en fases de incertidumbre, plazos ajustados y necesidad de realizar comparaciones.

### ***4.1. Planteamiento general de la herramienta***

La herramienta que se presenta a lo largo de este Trabajo Fin de Máster busca ser de apoyo a la decisión y el predimensionamiento, estructurada bajo un marco metodológico que trate de realizar el trabajo de forma sistemática, orientado a facilitar la definición de soluciones constructivas preliminares en obras de carácter subterráneo.

Su principal finalidad es actuar como nexo entre la caracterización geomecánica del terreno y la toma de decisiones en fases iniciales, además de, en fases de licitación servir como herramienta para el planteamiento de alternativas coherentes, todo ello sin sustituir en ningún momento el diseño y cálculo necesario en este tipo de obras.

Desde el punto de vista del alcance, la herramienta no busca formar parte de las aplicaciones existentes para el cálculo o dimensionamiento de elementos estructurales, situándose en el nivel previo, donde se utilice como soporte técnico que permita ordenar, integrar y comparar toda la información disponible, de forma que las decisiones iniciales se adopten de forma coherente, trazable y justificada.

La herramienta tiene como planteamiento general la integración simultánea de las diferentes clasificaciones más aceptadas en el mundo de las obras subterráneas, evitando su uso de forma aislada. A diferencia de los enfoques que se utilizan hoy en día, la herramienta pretende considerar de forma conjunta los resultados obtenidos a partir de varios sistemas de clasificación, permitiendo la comparación e interpretación del comportamiento del terreno. De esta forma, con una información menos precisa, podemos conocer cómo valora el terreno cada una de las clasificaciones de forma simultánea. De esta forma podemos ver cada clasificación como una visión parcial, y que, la combinación de todas ellas nos da como resultado una base más robusta para la toma de decisiones.

Conceptualmente la herramienta no trabaja con soluciones o valores cerrados, sino que operará mediante rangos de comportamiento y abanicos de soluciones. A partir de los rangos asociados a cada clasificación y las coherencias existentes entre estas, junto con las condiciones del proyecto, se propondrán una serie de métodos constructivos, particiones de sección, sistemas de sostenimiento y longitudes de avance que sean compatibles con las condiciones analizadas, descartando aquellas opciones que no cumplan con los criterios establecidos.

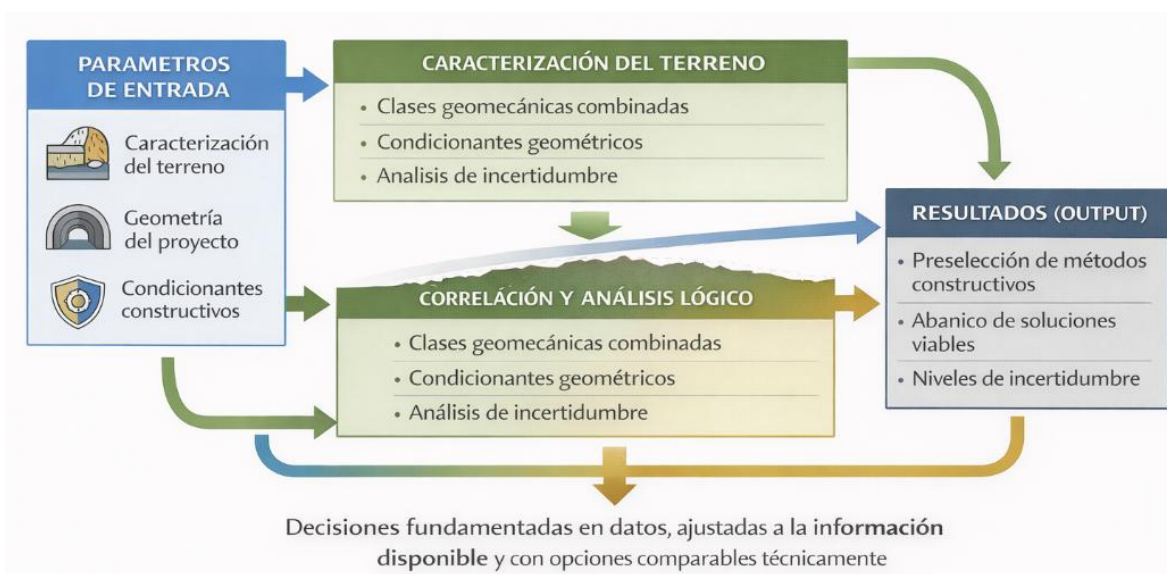


Figura 52. Esquema conceptual del funcionamiento de la herramienta. Fuente: Elaboración propia

El razonamiento interno se articulará mediante la aplicación de reglas condicionales y umbrales de decisión, que permiten relacionar los datos existentes de las clasificaciones y caracterización del terreno con criterios constructivos contrastados. Se trata por lo tanto de relaciones lógicas que reflejas las prácticas habituales de la ingeniería, pero sistematizadas para su uso en fases preliminares. De este modo, la herramienta reproduce de forma estructurada el proceso interpretativo que tradicionalmente realiza el técnico, permitiendo la trazabilidad de las decisiones y facilitando la comparación de alternativas.

Este tipo de proyectos cuentan con un grado de incertidumbre elevado, principalmente en fases iniciales y en fases de licitación de la obra, donde los niveles de información existente son limitados. Para ello, se diseñará para operar con distintos niveles de información, asumiendo que, en estas fases mencionadas, los datos disponibles serán limitados o estarán incompletos, presentando un alto nivel de variabilidad. En lugar de no valorar esta problemática, se incorpora, ampliando o restringiendo los abanicos de soluciones en función del grado de conocimiento del terreno. A medida que existe nueva información, procedente de ensayos, sondeos o estudios adicionales, los rangos se ajustan, permitiendo una evolución progresiva del planteamiento constructivo. En la tabla que se muestra a continuación se puede observar como a diferente nivel de información, la incertidumbre varia y la respuesta de la herramienta modifica el rango de respuestas.

<b>Nivel de información</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>Respuesta de la herramienta</b>
Baja	Alta	Abanico amplio de soluciones
Media	Moderada	Reducción progresiva de alternativas
Alta	Baja	Propuestas más acotadas

*Tabla 31. Relación entre nivel de información disponible, grado de incertidumbre y amplitud de respuestas. Fuente: Elaboración propia*

En cuanto a la relación existente entre el uso y las fases de proyecto, está pensada para un uso preferente en fases preliminares de proyecto y en fase de licitación de la obra, donde su capacidad para integrar información dispersa y generar alternativas comparables resulta especialmente valiosa.

No obstante, la forma en la que se plantea permite mantener su uso y coherencia a lo largo del desarrollo del proyecto constructivo, actuando como referencia conceptual que permita realizar la trazabilidad entre las decisiones iniciales y las soluciones finalmente adoptadas, permitiendo encontrar los puntos donde se producen los cambios de decisión.

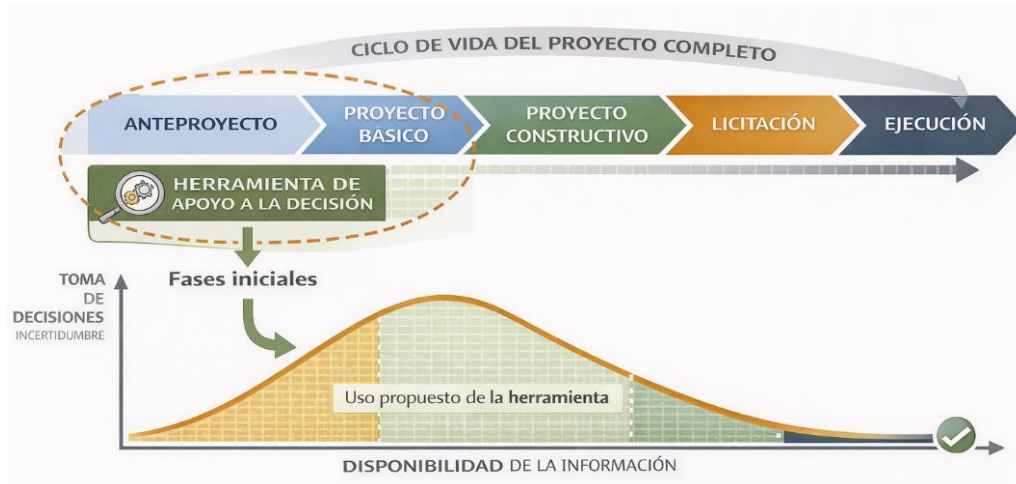


Figura 53. Posicionamiento de la herramienta dentro del ciclo de vida del proyecto completo. Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. Selección de parámetros de entrada

La definición de los parámetros de entrada constituye un elemento fundamental en la metodología propuesta, dado que la herramienta comenzará a trabajar a partir de ellos. De esta forma se condiciona de forma directa el alcance, coherencia y la utilidad de los resultados obtenidos. Dado que su aplicación se orienta a fases iniciales y a estudios técnicos de licitación, los parámetros seleccionados deben permitir trabajar con distintos niveles de detalle, admitiendo en el uso tanto valores concretos conocidos como rangos o estimaciones, en función de la información existente en cada caso.

La herramienta estructura los parámetros de entrada necesarios en cuatro grandes bloques de información:

- Parámetros geomecánicos del macizo rocoso
- Parámetros geotécnicos de los suelos
- Parámetros geométricos
- Parámetros de proyecto

De forma transversal el nivel de información existente y el grado de incertidumbre asociado a la información proporcionada, permitiendo esta estructura utilizada integrar la información de distinta naturaleza y fiabilidad dentro de un marco común de análisis de datos.

Con el fin de sintetizar los distintos tipos de información considerados como parámetros de entrada que se presentarán a lo largo de este apartado, y su influencia en el proceso de toma de decisiones, se presenta una tabla resumen que recoge la naturaleza de cada grupo de parámetros y el papel de estos dentro de la herramienta.

Grupo de parámetros	Tipo de información	Forma de introducción	Influencia en la decisión	Nivel de incertidumbre típico
Clasificaciones geomecánicas en roca (RMR, Q, GSI, Romana)	Geomecánica	Valores, rangos o categorías	Alta: condicionan métodos, sostenimientos y avances	Media
Parámetros geotécnicos de suelos	Geotécnica	Valores, rangos, clasificaciones	Media: orientan soluciones y medidas auxiliares	Alta
Zonas de transición roca-suelo	Geotécnica / geomecánica	Identificación cualitativa y rangos	Alta: amplían el abanico de soluciones	Alta
Geometría del túnel y del trazado	Geométrica	Valores definidos o preliminares	Alta: limitan métodos y secciones	Baja
Condiciones del entorno	Contextual	Categoría	Media: condicionan ejecución y fases	Media
Nivel freático y presencia de agua	Hidrogeológica	Cualitativa o cuantitativa	Alta: condiciona método y sostenimiento	Media-Alta
Información disponible	Metodológica	Baja / Media / Alta	Transversal: ajusta rangos de salida	Variable
Grado de incertidumbre	Metodológica	Implícito / explícito	Transversal: amplía o restringe alternativas	—

Tabla 32. Síntesis de los parámetros de entrada y su influencia. Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1. Parámetros geomecánicos del macizo rocoso

En los tramos del trazado que discurren por roca, la herramienta incorpora como referencia las principales clasificaciones geomecánicas de uso habitual:

- RMR de Bieniawski (1989)

- Sistema Q de Barton (1970)
- Índice GSI de Hoek y Brown (1994)
- Clasificación de Romana (2001)

No obstante, estos índices no se introducirán directamente como parámetros de entrada, salvo que se conozcan de antemano los valores, sino que se obtienen como resultado intermedio a partir de los parámetros básicos que conforman cada sistema de clasificación.

De este modo, la herramienta solicita como datos de entrada los valores necesarios para la evaluación de cada clasificación, tales como el RQD, resistencias de la roca, características de las discontinuidades, rugosidad, presencia de agua, así como otros factores específicos de cada sistema. A partir de estos parámetros, la herramienta calcula de forma interna los valores correspondientes de cada una de las clasificaciones, garantizando la coherencia del proceso e introduciendo los grados de incertidumbre existente en base a la información existente. De esta manera se evita introducir el valor de la clasificación de forma directa.

Este planteamiento permitirá trabajar con valores concretos conocidos, rangos estimados o categorías, en función del grado de información disponible. En fases iniciales, cuando los datos proceden de sondeos limitados, reconocimientos visuales o analogías con obras ya ejecutadas o próximas, los parámetros pueden introducirse como intervalos o estimaciones aproximadas a lo observado. Esto hace que la herramienta traslade esta variabilidad al cálculo de los índices, reflejando el grado de incertidumbre asociada a los resultados obtenidos.

A partir de los valores calculados de las distintas clasificaciones, la herramienta no busca un valor único o definitivo, sino la definición de unos intervalos de comportamiento del macizo rocoso en base a los resultados obtenidos, que sirve de base para la posterior correlación con las soluciones constructivas preliminares.

#### **4.2.2. Parámetros geomecánicos de los suelos**

La herramienta distinguirá explícitamente entre los tramos excavados en macizos rocosos y aquellos que discurren por suelos, incorporando a estos últimos un conjunto de parámetros geotécnicos que buscan caracterizar el comportamiento del terreno desde un punto de vista de uso constructivo. Dado que en suelos no existen clasificaciones como las empleadas en roca, el enfoque adoptado busca conocer el tipo de suelo existente, siendo de esta forma más orientativo y que prioriza la identificación de los parámetros que condicionarán los métodos constructivos.

Entre los parámetros que se han considerado como más representativos se incluyen la granulometría básica – porcentajes de arena y grava, diámetros característicos- los límites de Atterberg (LL, LP, IP), la resistencia o cohesión, nivel freático, densidades seca y húmeda, además de resultados in situ como el número de golpes de SPT, siendo posible incorporar información adicional cuando se disponga de ella, de forma que nos indique el tipo de suelo que tenemos.

Dado que los terrenos no cambian de forma directa, se permitirá identificar las zonas de transición entre roca y suelo, donde el comportamiento del terreno puede variar de forma significativa en distancias reducidas. En estos tramos, el grado de incertidumbre aumenta considerablemente, al igual que el abanico de soluciones que la herramienta propondrá, siendo puntos donde se reflejará la necesidad de adoptar medidas y planteamientos flexibles y conservadores hasta la fase de obra, donde se observará claramente como se encuentra el terreno y, por consiguiente, las soluciones que se adoptarán.

<b>Grupo de parámetros</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Descripción / finalidad dentro de la herramienta</b>
<b>Caracterización del macizo rocoso</b>	RQD	Indicador de la calidad del macizo y grado de fracturación
	Resistencia de la roca intacta	Evaluación del comportamiento resistente del material
	Espaciamiento de discontinuidades	Influencia en la estabilidad y en el tamaño de bloques
	Condición de discontinuidades	Rugosidad, relleno y alteración de juntas
	Orientación de discontinuidades	Condiciona la estabilidad del frente y la sección
	Presencia de agua	Influencia en estabilidad y sostenimiento
<b>Clasificaciones geomecánicas</b>	RMR (Bieniawski)	Evaluación global de la calidad del macizo rocoso
	Q de Barton	Relación entre calidad del macizo y comportamiento del túnel

<b>Grupo de parámetros</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Descripción / finalidad dentro de la herramienta</b>
	GSI (Hoek & Brown)	Representación estructural y resistencia del macizo
	Romana (Clasificación de túneles)	Clasificación específica para túneles
<b>Caracterización de suelos</b>	Granulometría (P200, %grava, %arena)	Identificación del tipo de suelo
	Densidad aparente	Grado de compactación del terreno
	Densidad saturada	Cálculo de tensiones efectivas y presiones
	Límites de Atterberg (LL, LP, IP)	Comportamiento plástico y consistencia
	Cohesión y ángulo de rozamiento	Resistencia al corte del suelo
	Ensayos in situ (N-SPT)	Estimación de resistencia y compacidad
	Contenido de agua y densidad	Estado tensional y deformabilidad
<b>Condiciones hidrogeológicas</b>	Nivel freático	Influencia en estabilidad y métodos constructivos
	Presión de agua	Necesidad de drenaje o tratamientos previos
<b>Parámetros geométricos asociados</b>	Cobertura	Relación terreno – estructura
	Tipo y geometría de la sección	Compatibilidad con métodos constructivos
	Longitud del túnel	Influencia en la selección del método
<b>Nivel de información</b>	Grado de conocimiento	Determina el rango de soluciones propuestas
	Incertidumbre asociada	Ajuste del abanico de alternativas

Tabla 33. Parámetros geotécnicos principales considerados. Fuente: Elaboración propia

### 4.2.3. Parámetros geométricos del proyecto

Además de la caracterización del terreno, se introducirán una serie de parámetros geométricos del proyecto para el desarrollo de este. Aunque en fases iniciales esta información puede ser cambiante en base a las condiciones de contorno existente, ya se conocerán una serie de datos que enmarquen el proyecto. Entre estos se encontrará el tipo de túnel y el uso de este, el entorno de la actuación, una aproximación de la sección o área de excavación, el diámetro o dimensiones equivalentes, la longitud entre otros valores.

Es importante destacar que, en fases preliminares del proyecto y no tanto en fases de licitación, donde ya están definidas las características geométricas del túnel, muchos de estos parámetros presentan un carácter aproximado o estimado, ya que el trazado definitivo, la geometría de la sección o las condiciones de contorno aún no han sido completamente definidas. La herramienta está diseñada para admitir este grado de indefinición inicial, permitiendo la introducción de valores orientativos o rangos que representen las hipótesis de partida del proyecto.

A medida que se avanza en el desarrollo del proyecto y se dispone de información más precisa sobre el trazado, la geometría del túnel o las condiciones del terreno, estos parámetros pueden actualizarse y optimizarse progresivamente dentro de la herramienta. Esta actualización permite que los resultados asociados —como la partición longitudinal del túnel, los métodos constructivos sugeridos o los rangos de avance— se ajusten de forma coherente a la nueva información, garantizando la consistencia del proceso de decisión a lo largo del tiempo.

Asimismo, la herramienta contempla parámetros relacionados con la organización del proyecto, como el número de tramos en que se divide el túnel, los criterios de partición longitudinal y la referencia documental de la información utilizada. Parte de esta información puede ser introducida directamente por el usuario o derivarse automáticamente a partir de los datos disponibles, reforzando el carácter dinámico y evolutivo del planteamiento metodológico.

### 4.2.4. Nivel de información disponible y grado de incertidumbre

De forma transversal a toda la información que la herramienta necesita para empezar a funcionar, se incorporará la evaluación de un nivel de información disponible, asociándolo directamente con el grado de incertidumbre existente y condiciona la amplitud y abanico de opciones.

Cuando la información con la que se trabaja es limitada y reducida, esta asumirá un mayor grado de incertidumbre y propone un conjunto de soluciones y valores más amplio, mientras que a medida

que se introduzca mayor información precisa y contrastada, los rangos se reducirán y las soluciones se acotan progresivamente.

Mediante este enfoque se busca que el usuario sea consciente en todo momento del grado de fiabilidad de los resultados obtenidos, evitando interpretaciones excesivamente deterministas.

### ***4.3. Criterios de clasificación del terreno***

La herramienta propuesta a lo largo de este trabajo no trata de entender la clasificación del terreno como un proceso único ni cerrado, sino como un proceso interpretativo y contextual, basado en la información geomecánica existente para cada tramo del proyecto. A lo largo de este apartado se definirán los criterios generales mediante los cuales la herramienta utilizará la información existente del terreno, sin imponer soluciones automáticas ni sustituir el criterio técnico de las personas responsables del proyecto.

Uno de los planteamientos fundamentales que se utilizará y por el cual se regirá es el uso conjunto de las distintas clasificaciones geomecánicas disponibles, sin exigir que todas ellas estén presentes ni que dispongan el mismo grado de conocimiento. En la práctica, es habitual que determinadas clasificaciones puedan evaluarse con mayor precisión que otras, o que algunas no puedan determinarse con la fiabilidad necesaria para ser usadas en fases preliminares. Por esto, se diseña para aceptar esta realidad, incorporando todas las clasificaciones disponibles y trabajando con ellas de forma simultánea, aun cuando presenten distintos niveles de detalle o rangos de incertidumbre.

Este enfoque permite que puedan coexistir resultados diferentes entre clasificaciones, sin que ello suponga una incoherencia del modelo. Por ejemplo, es posible que tres clasificaciones indiquen un comportamiento favorable del macizo, mientras que una cuarta refleje valores significativamente más desfavorables. Lejos de forzar una homogeneización de los resultados, la herramienta pone de manifiesto estas diferencias, permitiendo al usuario analizar las posibles causas de dicha discrepancia —ya sea por la naturaleza de los parámetros empleados, por la sensibilidad de cada clasificación a determinados factores o por la calidad de la información de partida— y valorar su impacto en la definición de la solución constructiva.

En este sentido, la herramienta no jerarquiza ni pondera de forma automática la importancia de una clasificación frente a otra. Todas ellas se considerarán fuentes válidas de información, y es el técnico quien, a partir del conjunto de resultados obtenidos, decide como interpretar el comportamiento del terreno. Este planteamiento refuerza el carácter de apoyo de la herramienta y evita la imposición de criterios rígidos, manteniendo el papel central del ingeniero en el proceso de análisis.

En el caso de los suelos, el proceso de clasificación se basa en la interpretación conjunta de los parámetros geotécnicos disponibles, con el objetivo de definir un tipo o grupo de suelo representativo del comportamiento esperado. Cuando la información es suficiente y consistente, la herramienta permite identificar un tipo de suelo concreto, caracterizado por unos parámetros definidos que condicionan de manera clara las soluciones constructivas viables.

Sin embargo, en fases preliminares de proyecto y en estudios de licitación es habitual que la información disponible sea incompleta o fragmentaria. En estos casos, la herramienta no fuerza una clasificación única, sino que identifica varios tipos de suelo posibles que resultan compatibles con los datos conocidos. Este enfoque permite trabajar con un conjunto de escenarios plausibles, reflejando de forma más realista la incertidumbre existente y evitando interpretaciones excesivamente precisas que no están respaldadas por la información disponible.

De este modo, la herramienta traslada la falta de información a un abanico de tipologías de suelo, ampliando las posibles soluciones constructivas asociadas y permitiendo al técnico valorar las implicaciones de cada escenario. A medida que se dispone de nuevos datos —por ejemplo, mediante ensayos adicionales o sondeos complementarios—, el número de tipologías compatibles se reduce progresivamente, hasta converger en una caracterización más precisa del terreno.

Especial atención merecen las zonas de transición entre roca y suelo, donde la clasificación del terreno resulta especialmente compleja. En estos casos, la herramienta reconoce explícitamente el aumento del grado de incertidumbre, evitando de esta forma asignaciones deterministas de manera que se amplía el rango de soluciones constructivas finales.

<b>Aspecto considerado</b>	<b>Terreno rocoso</b>	<b>Terreno de suelo</b>	<b>Zonas de transición roca-suelo</b>
Enfoque general	Clasificación geomecánica del macizo rocoso	Identificación de tipologías de suelo	Enfoque combinado y conservador
Tipo de parámetros principales	Estructura del macizo, discontinuidades, resistencia	Granulometría, plasticidad, resistencia al corte	Parámetros mixtos y gradientes
Clasificaciones aplicables	RMR, Q de Barton, GSI, Romana	Tipologías geotécnicas de suelo	Aplicación parcial de ambas

<b>Aspecto considerado</b>	<b>Terreno rocoso</b>	<b>Terreno de suelo</b>	<b>Zonas de transición roca-suelo</b>
Forma de introducir los datos	Valores, rangos o categorías	Valores representativos y rangos	Rangos amplios y escenarios
Resultado de la clasificación	Rango de comportamiento del macizo	Uno o varios tipos de suelo compatibles	Conjunto de escenarios posibles
Grado de incertidumbre	Variable, dependiente del número de datos	Generalmente elevado en fases iniciales	Elevado por heterogeneidad
Traducción a soluciones constructivas	Basada en recomendaciones empíricas y experiencia	Basada en compatibilidad con métodos	Abanico ampliado y medidas auxiliares
Estrategia de decisión	Integración de múltiples clasificaciones	Reducción progresiva de tipologías	Enfoque prudente y flexible
Evolución con nueva información	Convergencia hacia soluciones concretas	Reducción del número de suelos posibles	Convergencia gradual
Papel del técnico	Evaluar coherencia entre clasificaciones	Interpretar compatibilidades	Valorar escenarios y riesgos

Tabla 34. Enfoque de clasificación según el tipo de terreno: Roca, suelo, zonas de transición. Fuente: Elaboración propia

La clasificación del terreno se realizará siempre según las particiones del túnel previstas, que será en función de la información geológica, geotécnica y geométrica disponible, de modo que cada tramo dispondrá de su propia caracterización y, en consecuencia, de sus propios resultados.

Así, un túnel dividido en varios tramos puede presentar diferentes clasificaciones, y, por lo tanto, diferentes soluciones constructivas. Aun así, finalmente pueden adoptarse soluciones constructivas idénticas para diferentes clasificaciones, si los condicionantes existentes o los criterios técnicos así lo aconsejan. La herramienta no impondrá en ningún momento soluciones cerradas, sino que pone de manifiesto las diferencias existentes y ofrece al técnico la información necesaria para decidir si resulta conveniente unificar métodos o adaptar las soluciones al tramo correspondiente.



Figura 54. Esquema conceptual del terreno por tramos, soluciones constructivas, sostenimientos y trabajos auxiliares.  
Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista metodológico, los criterios de clasificación establecidos no tienen como finalidad definir directamente la solución constructiva, sino en base a esta información, proporcionar una base estructurada y comparable sobre la que apoyar los procesos de correlación que se desarrollan a continuación-

De este modo, se garantiza que las decisiones finales se fundamenten en una interpretación del terreno, manteniendo siempre la capacidad crítica y el criterio profesional del ingeniero.

#### **4.4. Correlación entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas**

La caracterización geomecánica del terreno constituye una etapa fundamental en el análisis de las obras subterráneas, ya que permiten conocer el comportamiento esperado del macizo rocoso o el suelo frente al proceso de excavación.

Sin embargo, estas clasificaciones no definen por sí mismas las soluciones constructivas, sino que definen el marco de referencia a partir del cual se deben adoptar las decisiones técnicas, basadas en criterios adicionales, recomendaciones de los autores y experiencia profesional.

En la práctica profesional, la correlación entre la caracterización del terreno y la definición de soluciones constructivas se realiza de forma manual, apoyándose en gráficos, recomendaciones de autores y experiencia profesional del equipo. Este proceso, aunque válido, presenta limitaciones evidentes cuando se dispone de información incompleta, cuando intervienen múltiples clasificaciones con resultados divergentes o cuando es necesario comparar alternativas de forma rápida y estructurada.

La metodología propuesta a lo largo del documento aborda esta problemática mediante un proceso sistemático de correlación, que actúa como nexo entre la caracterización geomecánica y la definición de soluciones constructivas preliminares, estructurando la toma de decisiones.

En primer lugar, a partir de los parámetros de entrada introducidos, la herramienta genera un estado intermedio de caracterización, donde se obtienen los valores o rangos correspondientes a las distintas clasificaciones geomecánicas aplicadas a cada sección longitudinal del túnel. Este estado intermedio permite visualizar de forma conjunta los resultados obtenidos, identificar posibles discrepancias entre clasificaciones y asociar un grado de incertidumbre a cada tramo, en base a la información disponible.

A partir de esta caracterización intermedia, la herramienta establece una correlación con las posibles soluciones constructivas propuestas mediante un conjunto de principios generales, basados en la literatura técnica, experiencia acumulada en obras similares y recomendaciones asociadas a las distintas clasificaciones.

Estas correlaciones no se realizan a partir de valores únicos, salvo en casos donde la información disponible sea exacta y permita una valoración exhaustiva. En el resto de casos, se realizará mediante rangos de comportamiento del terreno, lo que permitirá trabajar con varios escenarios alternativos, evitando decisiones excesivamente precisas en fases donde no están justificadas.

La correlación se llevará a cabo según el tipo de terreno o situación existente. Pueden darse las siguientes situaciones:

- Macizo rocoso: La herramienta utilizará de manera conjunta los resultados de las clasificaciones utilizadas, permitiendo al técnico una visión global de la situación para su valoración.
- Suelos: Se identificarán las tipologías de suelos compatibles con los parámetros geotécnicos disponibles, pudiendo resultar uno o varios tipos de suelo en función de la información existente.
- Zonas de transición macizo rocoso – suelos: En este caso, el proceso de correlación amplía el abanico de rangos de trabajo, mostrando las dos opciones planteadas anteriormente, de manera que el técnico pueda valorar la situación con todos los elementos conocidos.

Otro aspecto clave del proceso es que este se llevará a cabo por tramos, y no de forma global para el túnel. Cada tramo homogéneo dispone de su propia caracterización, y, por lo tanto, de su propio conjunto de rangos y soluciones constructivas preliminares.

Esto permite que diferentes tramos presenten soluciones adaptadas a sus necesidades y, en base a los tramos existentes, se adopten soluciones similares cuando los condicionantes globales del proyecto así lo aconsejen.

El resultado del proceso de correlación no es una solución única, sino un abanico de soluciones constructivas viables, que incluye métodos de excavación, posibles particiones de sección, rangos de avance y tipologías de sostenimiento compatibles con la caracterización del terreno y con la información geométrica y contextual del proyecto. Este enfoque resulta especialmente adecuado en fases preliminares y en estudios de licitación, donde el objetivo no es definir una solución cerrada, sino comparar alternativas y orientar la toma de decisiones.

#### **4.4.1. Principios generales de correlación y traducción técnica**

La correlación entre la caracterización geomecánica y la definición de las soluciones constructivas se fundamentará en una serie de principios generales que permiten traducir la información técnica disponible en criterios de decisión coherentes con el nivel de conocimiento del proyecto.

Esta serie de principios no se plantean como reglas rígidas o deterministas, sino una serie de directrices que estructuran el proceso de análisis y facilitan un conjunto de alternativas técnicamente viables.

El principio fundamental es la unicidad de la solución constructiva. El desarrollo y uso de la herramienta no está enfocado en concluir la única solución válida, sino un conjunto de alternativas técnicamente viables, que deben analizarse y calcularse a posteriori, eligiendo la más adecuada para el proyecto.

En lugar de eso, en fases iniciales lo que realiza con las clasificaciones geomecánicas y los datos introducidos es traducir dicha información en un abanico de soluciones en base a los rangos descritos por las clasificaciones.

Al hilo de lo descrito anteriormente, trabajara bajo rangos y categorías, evitando el uso de valores únicos. Tanto los parámetros de entrada como los resultados intermedios se consideran dentro de intervalos representativos del comportamiento del terreno. Esta aproximación permite incorporar de manera explícita la incertidumbre asociada a los datos, evitando de esta manera una sensación de falta precisión en etapas preliminares del proyecto. La traducción técnica es, por lo tanto, una serie de escenarios compatibles con los datos existentes.

El tercer principio es la integración simultánea de clasificaciones geomecánicas y sus parámetros, sin jerarquizar la importancia de cada una de ellas. Esto crea una visión global del comportamiento del terreno, y su utilización de forma conjunta permite obtener una interpretación más exacta. No se trata de forzar la convergencia de los resultados, sino poner de manifiesto posibles diferencias, dejando al técnico la capacidad de analizarlas y valorar su influencia.

El siguiente es la diferenciación por tipología de terreno. Esto se traduce en el estudio de forma distinta los macizos rocosos, suelos y zonas de transición. En roca, la correlación se apoya en las clasificaciones y recomendaciones empíricas asociadas a cada una de ellas. En suelo, a partir de identificar los posibles comportamientos, pueden coexistir varias opciones aun cuando la información es limitada. Por último, en zonas de transición, la herramienta adopta un enfoque conservador, ampliando el abanico de soluciones y considerando posibles medidas.

El quinto es la aplicación por tramos homogéneos, y no de forma global. Esto se traduce en un estudio técnico por secciones longitudinales en función de la información geológica, geotécnica y geométrica disponible. Esto permite adaptar las soluciones constructivas a las condiciones de contorno conocidas y evita generalizaciones que pueden resultar inadecuadas.

Asimismo, la correlación incorpora el principio de coherencia constructiva, entendida desde el punto de vista de la compatibilidad entre las soluciones propuestas y las condiciones de contorno del proyecto. Esto se traduce en que únicamente no tiene en cuenta la clasificación geomecánica del terreno, sino que valora aspectos como la sección, longitud, entorno o restricciones operativas.

Por último, la herramienta asume que debe ser revisable y evolutiva. A medida que se incorporan nuevos datos – procedentes de campañas geotécnicas, ajustes del trazado o nueva información – el proceso puede actualizarse, afinando los rangos de trabajo y, por lo tanto, afinando las soluciones propuestas.

Enfocado en los departamentos de estudios, la herramienta asume que la información viene condicionada por lo incluido en el proyecto, que en muchos casos es información limitada o incompleta y que no existe la posibilidad de realizar análisis detallados del terreno ni modificaciones sustanciales de los parámetros de entrada.

A partir de los datos definidos y existentes, permite plantear alternativas técnicamente viables, ya sean coincidentes con la solución proyectada o diferente, siempre dentro del marco normativo y las exigencias de la administración pública estimadas en los pliegos. Este enfoque facilita a los

departamentos de estudios la exploración de distintas opciones constructivas, mejorando la calidad de las memorias y permitiendo justificar de forma estructurada la decisión adoptada.

El conocimiento de los datos del proyecto permite derivar magnitudes constructivas preliminares, como volúmenes de excavación, longitudes de avance, superficies de sostenimiento, jornadas de trabajo de maquinarias, etc. Estas magnitudes no tienen por objeto definir el presupuesto cerrado, sino realizar una estimación económica aproximada, en la que los costes unitarios son introducidos y ajustados por los técnicos.

Este principio permite que la herramienta no solo actúe como apoyo a la decisión técnica, sino también como un instrumento auxiliar para el análisis económico preliminar de alternativas, especialmente valioso en licitaciones donde los plazos son reducidos y la capacidad de análisis está limitada. En todo caso, el proceso mantiene el criterio de que la valoración económica obtenida es orientativa y dependiente de los costes introducidos por el usuario, reforzando el papel del técnico como responsable último de la decisión.

#### **4.4.2. Estado intermedio de caracterización y coherencia del modelo**

Dentro de la metodología propuesta, la correlación entre la caracterización geomecánica del terreno y la definición de las posibles soluciones no se realiza de forma directa, sino a través de un estado intermedio, que constituye una etapa clave para garantizar la coherencia, trazabilidad y transparencia del modelo.

Este estado intermedio recoge y organiza los resultados introducidos a partir de los parámetros de entrada. De este modo, la herramienta genera una imagen técnica del comportamiento esperado del terreno, previa a cualquier propuesta.

El objetivo principal de este estado intermedio es permitir al técnico visualizar, analizar y validar la interpretación que la herramienta realiza de los datos disponibles. Antes de avanzar hacia la definición de métodos constructivos, ritmos de avance o sostenimientos, el usuario dispone de una síntesis estructurada de la caracterización del terreno en base a los datos introducidos, pudiendo comprobar la coherencia de los resultados, identificar posibles inconsistencias y, en su caso, revisar o ajustar los parámetros de entrada.

En este punto, la herramienta pone de manifiesto las posibles divergencias entre las clasificaciones, evitando forzar una armonía artificial entre los resultados. La coexistencia de diferentes valores para un mismo tramo no se debe interpretar como un error del modelo, salvo en casos donde se conozca

el resultado esperado, sino como una representación fiel de la realidad geotécnica y del grado de incertidumbre existente.

Esta información resulta especialmente valiosa en casos de fases preliminares o estudios de licitación donde existe una clara limitación de datos disponibles.

Asimismo, este estado intermedio se puede utilizar para valorar la coherencia interna del modelo, verificando que los resultados disponibles sean compatibles entre sí con las condiciones de contorno existentes.

Por ejemplo, se puede comprobar que, con un nivel freático por encima de la cota del túnel, las soluciones deberían ser mecanizadas e incluso incluir una serie de medidas auxiliares, como inyecciones, para paliar esta problemática a lo largo de la traza.

La existencia de este punto intermedio refuerza su necesidad, además de evaluar el carácter evolutivo con el que se plantea, de forma que los resultados obtenidos en este paso puedan verse actualizados a medida que se dispone de nueva información. De esta forma se reflejarán de forma inmediata, permitiendo evaluar su impacto antes de modificar las soluciones constructivas.

#### ***4.5. Definición de variables de salida de la herramienta:***

Una vez realizada la caracterización del terreno y establecida la correlación entre los parámetros geomecánicos, geotécnicos y geométricos del proyecto, la herramienta genera un conjunto de variables destinadas a apoyar la toma de decisiones en fases preliminares de proyecto y en estudio técnicos de licitación. Estas variables no constituyen un diseño definitivo, sino una propuesta estructurada de soluciones constructivas viables, coherente con el nivel de información disponible.

El planteamiento de las salidas se basa en el principio de que, en etapas tempranas de proyecto, el objetivo no es obtener una solución cerrada, sino orientar el proceso de decisión, comparar alternativas y reducir la incertidumbre asociada a las primeras elecciones técnicas. Por este motivo, las variables de salida presentarán rangos, categorías o conjuntos de opciones y no valores o soluciones únicas y deterministas.

Las soluciones obtenidas se definen para cada tramo homogéneo del túnel, de acuerdo con la partición establecida a partir de la información definida, siendo criterio del técnico mantener distintas soluciones, o si es viable, adoptar soluciones comunes cuando los condicionantes estimados lo aconsejen.

<b>Variable de salida</b>	<b>Aplicación en fases de proyecto</b>	<b>Aplicación en estudios de licitación</b>
Partición de la sección longitudinal	Definición preliminar de tramos homogéneos y adaptación del diseño a la variabilidad del terreno	Identificación de tramos críticos y planificación de fases constructivas
Método constructivo sugerido	Orientación sobre métodos viables para el desarrollo del proyecto	Evaluación y comparación de alternativas técnicas frente a la solución de proyecto
Longitud de pase o avance	Estimación preliminar de ritmos de excavación y plazos de ejecución	Análisis de rendimientos y planificación de la obra
Sistema de sostenimiento	Base para la definición posterior del sostenimiento de proyecto	Estimación de cantidades y costes asociados a los sistemas de sostenimiento
Magnitudes constructivas preliminares	Apoyo a la planificación y estimación inicial de medios	Base para mediciones y estudios económicos orientativos
Abanico de soluciones viables	Comparación técnica entre distintas alternativas en fases tempranas	Selección de la propuesta más competitiva y ajustada a los medios de la empresa
Nivel de incertidumbre asociado	Identificación de tramos que requieren mayor detalle geotécnico	Evaluación del riesgo técnico y económico de la oferta

*Tabla 35. Relación entre las variables de salida y su aplicación en fase de proyecto y licitación. Fuente: Elaboración propia*

En conjunto, las variables de salida definidas por la herramienta proporcionan un marco estructurado de apoyo a la decisión, que permite al técnico disponer de una visión global y coherente de las posibles soluciones constructivas desde las primeras fases del proyecto. Este planteamiento facilita la comparación de alternativas, mejora la trazabilidad de las decisiones adoptadas y reduce la probabilidad de revisiones tardías derivadas de elecciones iniciales poco fundamentadas.

#### **4.5.1. Partición de la sección longitudinal**

Como primera variable de salida, la herramienta propone una partición preliminar del túnel en tramos homogéneos, en función de la caracterización del terreno, geometría del trazado.

#### **4.5.2. Métodos constructivos sugerido**

Para cada tramo definido, la herramienta proporciona una propuesta de métodos constructivos compatibles con el rango del terreno, como excavación en mina, excavación mecanizada, cut and cover, métodos tradicionales, tuneladoras, etc. En función de las condiciones de contorno establecidas.

El resultado no está previsto a un único método, sino que aportará un abanico de opciones viables, que permite al técnico comparar las alternativas y valorar su adecuación en función de factores externos a la herramienta, como disponibilidad de maquinaria, necesidades del clientes o plazos de ejecución.

#### **4.5.3. Longitud de pase o avance recomendado**

La herramienta propone rangos orientativos de longitud de pase o ritmo de avance para cada tramo, coherentes con el comportamiento esperado del terreno y con el método constructivo sugerido. Estos valores se basan en recomendaciones empíricas y experiencias previas, y tienen como finalidad orientar la planificación preliminar de la obra.

En ningún caso estos avances deben interpretarse como valores de proyecto, sino como referencias iniciales que permiten comparar alternativas y estimar de forma aproximada los plazos de ejecución.

#### **4.5.4. Sistema de sostenimiento**

Otra variable de salida fundamental es la tipología de sostenimiento preliminar, definida en términos de soluciones compatibles con la caracterización del terreno y el método constructivo. La herramienta propone tipos de sostenimiento (hormigón proyectado, bulones, cerchas, dovelas, medidas auxiliares, etc.) y rangos de aplicación, sin entrar en el dimensionamiento detallado de los elementos.

Este enfoque permite disponer de una base técnica coherente para la definición posterior del sostenimiento, así como para la comparación entre distintas alternativas constructivas en fases tempranas.

#### **4.5.5. Indicadores técnicos y económicos preliminares**

Como complemento a las variables anteriores, la herramienta permite derivar magnitudes constructivas preliminares, tales como volúmenes de excavación, superficies de sostenimiento, longitudes de avance o número de ciclos constructivos. Estas magnitudes pueden utilizarse como base para estimaciones económicas orientativas, introduciendo los costes unitarios correspondientes por parte del técnico responsable.

Este enfoque resulta especialmente útil en estudios de licitación, donde es necesario comparar alternativas técnicas y económicas con información limitada y en plazos reducidos, manteniendo siempre el criterio de que los costes y su interpretación dependen del usuario.

#### **4.6. Estructura lógica de la herramienta**

La herramienta propuesta se apoya en una estructura lógica de decisión jerarquizada, que está diseñada para transformar la información de entrada en un conjunto coherente de soluciones. Esta estructura no responde a un modelo de cálculo numérico de cerrado, sino a un proceso de filtrado y organización de información, alineado con la forma en la que se toman las decisiones en las fases preliminares de proyecto.

EL esquema de decisión seleccionado se trata de una cadena de etapas diferenciadas en las que en cada bloque de decisión se utiliza los resultados obtenidos en el anterior como punto de partida. De este modo, se evitan los saltos directos entre información, garantizando la trazabilidad del proceso.

En una primera etapa, la estructura lógica organiza y valida los datos de entrada del proyecto – geomecánicos, geométricos y contextuales – identificando el tipo de terreno, el grado de información disponible y los tramos en los que se realizará la partición longitudinal. Esta primera fase no tiene poder de decisión, sino más bien un valor descriptivo que permita establecer el marco técnico sobre el que se desarrollan las etapas posteriores.

A continuación, se incorporan los resultados de la caracterización geomecánica, ese estado intermedio el cual se ha descrito anteriormente, integrando los valores y rangos obtenidos para las distintas clasificaciones y tipologías de terreno. En este punto, la herramienta no selecciona, sino que delimita el espacio de posibilidades técnicas, identificando cuales resultan compatibles y cuales pueden descartarse.

Sobre esta base, la estructura actúa como un sistema de reducción progresiva de alternativas, en las que las soluciones constructivas se van acotando a medida que se consideran nuevos criterios. Este enfoque permite, en las primeras fases, disponer de un amplio abanico de opciones, que se ven reducidas gradualmente conforme aumenta el nivel de información.

Este esquema lógico está pensado para operar por tramos, de manera que cada segmento identificado, cuente con su proceso, aun cuando los resultados finales puedan dar lugar a soluciones similares por razones constructivas, organizativas o económicas. Esta independencia es fundamental en obras subterráneas de gran longitud o con elevada variabilidad geológica.

Desde el punto de vista metodológico, la estructura lógica no asigna pesos ni jerarquías fijas a los distintos criterios, estableciendo un marco común donde cada clasificación tenga el mismo valor, para que el técnico pueda ejercer su criterio profesional y no se encuentre sesgado por los pesos o valores que la herramienta pueda tomar.



Figura 55. Esquema conceptual de la estrategia de decisión de la herramienta. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se cuenta con un enfoque evolutivo, de modo que a medida que exista nueva información, se permite reactivar el proceso lógico y actualizar los resultados obtenidos.

#### 4.6.1. Lógica condicional y umbrales de decisión

Se entiende como umbral de decisión, en este contexto, como la delimitación de rangos de comportamiento geotécnico equivalente, dentro de los cuales distintas clasificaciones pueden considerarse representativas de un mismo terreno. Así, para un conjunto de valores obtenidos a partir de dichas clasificaciones – por ejemplo, RMR, Q y GSI – puede situarse dentro de un intervalo común que describa un comportamiento global similar del macizo, aun cuando los valores individuales no coinciden.

De este modo, los umbrales no actúan como valores absolutos entre clasificaciones, sino que identifican zonas de solapamiento conceptual entre ellas. Por ejemplo, un tramo de túnel puede presentar valores de RMR, Q y GSI que, aun siendo distintos entre sí, correspondan todos a un

terreno de calidad baja o media-baja. En estos casos, la herramienta interpreta que existe coherencia en la caracterización y activa un conjunto de soluciones constructivas compatibles con ese rango de comportamiento.

Por el contrario, pueden darse situaciones en las que una clasificación indique un comportamiento significativamente distinto del resto. En estos casos, la lógica condicional no fuerza la convergencia, sino que amplía el abanico de soluciones consideradas, reflejando explícitamente la incertidumbre existente. Este enfoque permite al técnico identificar tramos con mayor riesgo o ambigüedad, que requieren un análisis más detallado o una toma de decisiones más conservadora.

En el caso de los suelos, la lógica condicional se basa en la identificación de tipologías de terreno compatibles con los parámetros disponibles. A partir de los valores introducidos —como índices granulométricos, límites de Atterberg, resistencia o resultados de ensayos in situ— la herramienta determina uno o varios tipos de suelo posibles. Cuando la información es incompleta, pueden coexistir varias tipologías compatibles, mientras que, a medida que se incorporan nuevos datos, el rango de suelos posibles se reduce, permitiendo una traducción técnica más precisa.

Un principio fundamental de la lógica condicional es la relación directa entre el grado de información disponible y la amplitud del abanico de soluciones. Cuando el nivel de conocimiento del terreno es bajo, la herramienta adopta un enfoque abierto, proponiendo un mayor número de soluciones constructivas viables y evitando descartar opciones de forma prematura. A medida que la información se incrementa —ya sea por nuevas campañas geotécnicas, ajustes del trazado o datos obtenidos durante la ejecución— los rangos de comportamiento se acotan y la lógica condicional reduce progresivamente el conjunto de soluciones propuestas.

Este funcionamiento puede ilustrarse de forma conceptual mediante el siguiente ejemplo: para un tramo con información limitada y resultados geomecánicos dispersos, la herramienta puede proponer varios métodos constructivos compatibles, junto con diferentes tipologías de sostenimiento. En cambio, para un tramo con información abundante y clasificaciones coherentes entre sí, el proceso lógico converge hacia un número reducido de soluciones, aumentando la confianza en la decisión adoptada.

#### **4.6.2. Integración entre criterios geomecánicos y constructivos**

La definición de soluciones constructivas en obras subterráneas no puede basarse exclusivamente en la caracterización geomecánica del terreno, sino que debe integrar de forma coherente los criterios constructivos, geométricos, funcionales y contextuales propios de cada proyecto. En este

sentido, la herramienta propuesta adopta un enfoque integrador, en el que el comportamiento del terreno actúa como condición necesaria, mientras que los condicionantes constructivos y de proyecto actúan como factores limitantes y moduladores de las soluciones posibles.

Desde el punto de vista metodológico, la integración entre criterios geomecánicos y constructivos se concibe como un proceso de compatibilidad técnica, en el que una solución solo se considera viable si satisface simultáneamente ambos conjuntos de criterios. De este modo, un método constructivo puede resultar adecuado desde el punto de vista del terreno, pero quedar descartado o relegado si no es compatible con la geometría del túnel, el entorno de actuación, la longitud del trazado o las restricciones operativas del proyecto.

Entre los criterios constructivos integrados en el proceso de decisión se incluyen, de forma conceptual, la tipología de túnel, la geometría de la sección, la longitud total del trazado, la cobertura, la pendiente longitudinal, el entorno urbano o no urbano, así como la posible disponibilidad de maquinaria especializada. Estos criterios no se emplean para imponer soluciones, sino para acotar y priorizar las alternativas que resultan coherentes en cada caso.

Este planteamiento puede ilustrarse mediante ejemplos de razonamiento técnico habituales en la práctica profesional. Así, un determinado macizo rocoso puede admitir, desde el punto de vista geomecánico, tanto una excavación en mina como un método mecanizado. Sin embargo, una sección variable, la presencia de radios de curvatura reducidos o una longitud limitada del túnel pueden hacer que la opción mecanizada pierda interés constructivo, aun siendo técnicamente viable. En estos casos, la herramienta mantiene ambas soluciones como posibles, pero refleja su distinta adecuación al conjunto de condicionantes del proyecto.

De forma análoga, pueden darse situaciones en las que un método constructivo resulte especialmente adecuado desde el punto de vista de la geometría y de los rendimientos esperados, pero presente una compatibilidad limitada con el comportamiento del terreno. En estos casos, la herramienta no descarta automáticamente la solución, sino que la asocia a la necesidad de medidas adicionales, fases especiales de excavación o sostenimientos reforzados, trasladando al técnico la información necesaria para valorar el compromiso entre riesgo, coste y viabilidad.

En el ámbito de los estudios de licitación, esta integración cobra una relevancia especial. En muchos casos, el método constructivo viene condicionado por lo indicado en el proyecto licitado; no obstante, la herramienta permite analizar dicha solución a la luz de la caracterización del terreno y, en su caso, plantear alternativas técnicas viables basadas en los datos disponibles. Este enfoque no

persigue contradecir la solución de proyecto, sino enriquecer el análisis técnico, permitiendo a los departamentos de estudios valorar otras opciones que puedan resultar más competitivas, eficientes o ajustadas a los medios disponibles de la empresa.

Asimismo, la integración entre criterios geomecánicos y constructivos permite identificar situaciones en las que diferentes tramos del túnel, aun presentando comportamientos del terreno similares, pueden requerir soluciones distintas debido a condicionantes geométricos o de entorno. Del mismo modo, tramos con caracterizaciones geomecánicas diferentes pueden converger hacia soluciones constructivas comunes cuando así lo aconsejan factores organizativos, económicos o de planificación.

#### ***4.7. Validación teórica y ajuste de la metodología***

La metodología propuesta en este trabajo ha sido objeto de un proceso de validación teórica y ajuste conceptual, orientado a garantizar la coherencia interna del modelo y su adecuación a las necesidades reales de las fases preliminares de proyecto y de los estudios técnicos de licitación. Dado que la herramienta se concibe como un sistema de apoyo a la decisión y no como un modelo de cálculo determinista, la validación se ha centrado en la consistencia del razonamiento técnico, la trazabilidad del proceso y la robustez frente a distintos escenarios de información.

En primer lugar, la validación teórica se ha basado en la alineación de la metodología con los principios establecidos en la literatura técnica y en las prácticas habituales de la ingeniería de obras subterráneas. La estructura del modelo reproduce de forma sistemática el proceso que sigue un técnico experto al analizar un trazado subterráneo: caracterización del terreno, interpretación de las clasificaciones geomecánicas, evaluación de condicionantes constructivos y definición de soluciones preliminares. Este paralelismo garantiza que la herramienta no introduce criterios ajenos a la práctica profesional, sino que formaliza y ordena razonamientos ya existentes.

Un segundo aspecto fundamental del proceso de validación ha sido la verificación de la coherencia interna entre las distintas etapas de la metodología. Se ha comprobado que los parámetros de entrada, el estado intermedio de caracterización, la lógica condicional y las variables de salida mantienen una relación consistente y no generan contradicciones entre sí. En particular, se ha prestado especial atención a la correcta gestión de situaciones con resultados divergentes entre clasificaciones, asegurando que estas se reflejen como incrementos de incertidumbre y no como errores del modelo.

Asimismo, la metodología ha sido ajustada para garantizar su robustez frente a distintos niveles de información. Se han analizado escenarios conceptuales que abarcan desde situaciones con información geotécnica muy limitada hasta casos con un elevado grado de conocimiento del terreno. En todos ellos, la herramienta mantiene un comportamiento coherente, ampliando o reduciendo el abanico de soluciones propuestas en función del nivel de incertidumbre, sin perder consistencia ni forzar decisiones prematuras.

Otro criterio de validación ha sido la compatibilidad de la metodología con los distintos contextos de aplicación, tanto en fases de proyecto como en estudios de licitación. Se ha verificado que el modelo permite trabajar con datos impuestos por un proyecto licitado, analizar soluciones ya definidas y, al mismo tiempo, plantear alternativas técnicas viables cuando la información lo permite. Este ajuste refuerza la versatilidad de la herramienta y su utilidad práctica en entornos profesionales reales.

El proceso de ajuste de la metodología ha incluido también la revisión del nivel de detalle de las salidas, asegurando que estas se mantengan en un plano de predimensionamiento y orientación técnica, sin invadir ámbitos propios del diseño detallado o del cálculo estructural. Este equilibrio resulta esencial para evitar un uso inadecuado de la herramienta y para preservar su papel como apoyo a la decisión en fases tempranas.

En conjunto, la validación teórica y el ajuste realizados permiten afirmar que la metodología propuesta constituye un marco sólido, coherente y adaptable, capaz de integrar información geomecánica y constructiva de forma estructurada y alineada con la práctica profesional. Esta base metodológica justifica el desarrollo de la herramienta en un entorno digital, que se aborda en el capítulo siguiente, y garantiza que su implementación se sustente en criterios técnicos consistentes y bien fundamentados.

## 5. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

### **5.1. Diseño estructural del algoritmo o matriz de decisión**

La implementación de la herramienta desarrollada en el presente trabajo se ha materializado en un entorno Excel, estructurado en diferentes hojas interrelacionadas, concebidas como módulos funcionales que reproducen de forma ordenada el proceso técnico de toma de decisiones en fases preliminares de proyecto y en estudios de licitación. Lejos de constituir una simple hoja de cálculo, el modelo responde a una arquitectura lógica definida, en la que los datos introducidos por el usuario son progresivamente transformados en resultados constructivos y económicos mediante un sistema de reglas, rangos de validez y filtros de compatibilidad.

La estructura de la herramienta se basa en seis módulos correctamente interrelacionados:

1. Bloque A: Estructura general
2. Bloque B: Datos de entrada y estructura de la obra subterránea de desarrollo lineal
3. Bloque C: Clasificaciones (Rocas y suelos)
4. Bloque D: Resumen y soluciones constructivas
5. Bloque E: Módulo económico
6. Bloque F: Resultados

El diseño estructural parte de la introducción de los datos generales del proyecto, incluyendo los parámetros geométricos del trazado, la longitud total de la obra, las características de la sección tipo, la cobertura media, mínima y máxima, así como condicionantes relevantes como el entorno, la presencia de nivel freático o la profundidad prevista. En coherencia con el carácter preliminar de la herramienta, no se exige una definición exacta de los puntos kilométricos, permitiéndose trabajar con aproximaciones razonables. La partición longitudinal del túnel es definida por la herramienta en función de la información geológica y geotécnica disponible, constituyendo cada tramo una unidad independiente de análisis.

Una vez definidos los tramos, el modelo activa el bloque de caracterización geomecánica. Para cada partición longitudinal, la herramienta permite introducir directamente el valor de las clasificaciones consideradas para rocas y suelos, o bien introducir los parámetros constitutivos de cada sistema para que el propio modelo calcule el índice correspondiente. Esta doble posibilidad responde a la diversidad de situaciones reales en las que, en ocasiones, se dispone únicamente del valor global de la clasificación, mientras que en otros casos se cuenta con el desglose completo de los parámetros.

Un aspecto esencial del diseño del algoritmo es la no jerarquización de las clasificaciones. Todas ellas se procesan en paralelo y se consideran igualmente válidas, siempre que su índice de completitud y trazabilidad lo permita. Para cada clasificación introducida, el sistema genera un valor central y un intervalo asociado definido por un delta de dispersión. Este delta no es arbitrario, sino que se obtiene en función de tres variables: el grado de completitud de los datos, la trazabilidad de la información y un factor de dispersión  $K$  ajustable por el técnico. De este modo, el índice final no se interpreta como un valor único rígido, sino como un rango dinámico cuya amplitud disminuye a medida que aumenta el conocimiento del terreno. Paralelamente, la herramienta calcula un índice de validez o confianza, expresado como el porcentaje de datos conocidos respecto al total requerido por cada clasificación.

El resultado de este proceso constituye un estado intermedio de caracterización del terreno, en el que para cada tramo se muestran los valores centrales de las distintas clasificaciones, sus rangos mínimos y máximos y el nivel de confianza asociado. Este estado no incorpora todavía soluciones constructivas, sino que representa una fotografía técnica de la calidad geomecánica del macizo o suelo en cada partición longitudinal.

A partir de este estado intermedio, se activa la matriz de decisión. Para cada clasificación válida y para cada tramo, el algoritmo identifica el rango de terreno correspondiente y asocia a dicho rango un conjunto de soluciones constructivas compatibles, que incluyen el método de excavación, la longitud de avance, el sistema de sostenimiento y la configuración de sección tipo. El paso determinante del modelo consiste en la aplicación de un filtro de intersección entre clasificaciones. En lugar de promediar resultados o priorizar un sistema sobre otro, la herramienta elimina aquellas soluciones que no sean compatibles con todos los rangos válidos simultáneamente. De esta forma, las soluciones finales mostradas por tramo son aquellas que satisfacen las condiciones establecidas por todas las clasificaciones consideradas y suficientemente respaldadas por datos.

Además del filtro geomecánico, el modelo incorpora reglas técnicas adicionales independientes del índice de clasificación. Estas reglas tienen en cuenta condicionantes propios del proyecto, como la presencia de nivel freático elevado, la localización en entorno urbano, la profundidad, la longitud total del túnel o limitaciones geométricas. En consecuencia, una solución que pudiera resultar compatible desde el punto de vista geomecánico puede quedar descartada si no cumple con los condicionantes constructivos o funcionales del trazado.

Una vez definidas las soluciones viables por tramo, la herramienta activa el módulo económico. En esta fase, el técnico introduce los costes unitarios y rendimientos disponibles para las principales

unidades de obra. A partir de las dimensiones geométricas del túnel, las longitudes de avance y los sistemas de sostenimiento asociados a cada alternativa, el modelo calcula mediciones aproximadas por tramo, estima plazos en función de los rendimientos introducidos y obtiene una estimación económica global. Este módulo no realiza optimización automática, sino que permite comparar alternativas sobre la base de datos conocidos, manteniendo siempre el control técnico en manos del usuario.

El proceso culmina con la generación de fichas resumen por tramo y un resumen global de la obra de desarrollo lineal, donde se integran la caracterización geomecánica, las soluciones constructivas compatibles y las estimaciones económicas. La estructura modular del algoritmo permite que cualquier modificación en los datos de entrada —ya sea por incorporación de nuevos sondeos, actualización de parámetros o mejora en la definición geométrica— recalibre automáticamente los rangos de clasificación, las soluciones asociadas y las estimaciones económicas, garantizando coherencia interna en todo el sistema.

Con el fin de sintetizar el funcionamiento estructural del algoritmo, se incorpora a continuación una representación gráfica del flujo lógico del modelo, desde la introducción de datos hasta la obtención de soluciones técnicas y económicas preliminares.



Figura 56. Estructura lógica del funcionamiento de la herramienta. Fuente: Elaboración propia

La figura muestra la secuencia completa del proceso: entrada de datos del proyecto y particiones longitudinales, cálculo de clasificaciones geomecánicas, aplicación del ajuste por incertidumbre y generación de rangos, estado intermedio de caracterización, aplicación de la matriz de decisión

mediante filtro de compatibilidad, incorporación de reglas técnicas adicionales y, finalmente, activación del módulo económico y generación de fichas resumen.

Desde el punto de vista metodológico, es importante señalar que el modelo no establece una jerarquización entre clasificaciones ni asigna ponderaciones que prioricen automáticamente una solución sobre otra. La herramienta no busca determinar cuál es “la mejor” alternativa, sino identificar aquellas soluciones que resultan técnicamente coherentes con el conjunto de clasificaciones válidas y con los condicionantes del proyecto. Este planteamiento evita introducir sesgos automáticos en la toma de decisiones y mantiene el criterio técnico como elemento central del proceso.

De este modo, el sistema actúa como un marco estructurado de análisis y depuración de alternativas, pero no sustituye el juicio profesional del ingeniero, quien continúa siendo responsable de la elección final en función de consideraciones técnicas, económicas, estratégicas o contractuales que pueden exceder el alcance del modelo.

### ***5.2. Desarrollo en entorno digital***

Durante la fase de diseño de la herramienta se evaluaron distintas alternativas tecnológicas para su implementación digital. En un primer momento se consideró el desarrollo de una aplicación específica mediante lenguajes de programación o plataformas de desarrollo de aplicaciones, con el objetivo de dotar al sistema de una estructura similar a una aplicación profesional. Entre las opciones analizadas se incluyeron entornos de programación como Python, ampliamente utilizado en ingeniería por su versatilidad en el tratamiento de datos y desarrollo de modelos numéricos; frameworks de desarrollo de aplicaciones web como FastAPI o Django, que permiten construir interfaces interactivas conectadas a motores de cálculo o plataformas de desarrollo de aplicaciones visuales como MATLAB, PowerApps o entornos de modelización computacional capaces de integrar bases de datos, interfaces gráficas y módulos de cálculo.

Estas herramientas permiten construir aplicaciones completas con interfaz gráfica, bases de datos estructuradas y motores de cálculo avanzados, facilitando la creación de sistemas de apoyo a la decisión o herramientas de cálculo complejas.

No obstante, tras analizar las ventajas y limitaciones de estas soluciones, se identificaron varios condicionantes relevantes. Por un lado, el desarrollo mediante programación requiere un conocimiento profundo de los lenguajes utilizados, así como un tiempo de desarrollo significativamente mayor. Por otro, muchas de estas plataformas requieren entornos de ejecución

específicos, licencias de software o infraestructuras adicionales para su distribución y mantenimiento. Teniendo en cuenta estos aspectos, y considerando que el objetivo principal de la herramienta es proporcionar un sistema de apoyo a la toma de decisiones en fases preliminares de proyecto, se optó finalmente por implementar la herramienta en Microsoft Excel, aprovechando sus capacidades como entorno de cálculo, organización de datos y construcción de modelos estructurados.

Excel constituye una plataforma ampliamente extendida en el ámbito técnico e ingenieril, que permite integrar en un mismo entorno funciones de cálculo, gestión de bases de datos y construcción de interfaces de usuario relativamente intuitivas. Mediante el uso combinado de fórmulas matriciales, tablas estructuradas, validación de datos, listas desplegables, funciones lógicas anidadas, referencias dinámicas, filtros automáticos y vínculos entre hojas, es posible desarrollar modelos complejos de cálculo con un alto grado de trazabilidad y control de la información. Además, la utilización de tablas estructuradas de Excel, junto con funciones como BUSCARX, ÍNDICE, COINCIDIR, FILTRAR, SI, SI.ERROR o SUMAPRODUCTO, permite construir sistemas de decisión basados en criterios múltiples y matrices de compatibilidad. Asimismo, el empleo de formatos condicionales, protección de celdas, validación de entradas y control de errores facilita la creación de una interfaz que guía al usuario durante el proceso de introducción de datos y reduce la probabilidad de errores.

El diseño final de la herramienta se ha estructurado mediante una serie de hojas de cálculo independientes pero interconectadas, donde la información relevante se va estructurando progresivamente a lo largo de la aplicación. De esta forma, cada bloque funcional del modelo se corresponde con un conjunto de hojas especializadas que reciben información de etapas anteriores y generan nuevos resultados que se utilizarán en fases posteriores del proceso. Este enfoque modular permite organizar la herramienta de forma clara y facilita tanto su comprensión como su eventual ampliación.

A lo largo de este capítulo se describe el funcionamiento general de la herramienta mediante una redacción continua que explica la lógica del modelo y la interacción entre los diferentes bloques funcionales. Las limitaciones asociadas tanto al uso de Excel como a las alternativas tecnológicas inicialmente consideradas se analizarán de forma específica en el apartado 5.6.

En este sentido, además de las hojas visibles para el técnico, donde se introducirá la información y se realizarán los cálculos correspondientes, la herramienta cuenta con una serie de hojas auxiliares

donde se encuentra la información necesaria para el correcto funcionamiento de la herramienta, a modo de base de datos.

La estructura de la herramienta se organiza en varios bloques funcionales definidos en el capítulo anterior. El primero de ellos corresponde al Bloque A: estructura general, que constituye el punto de partida del modelo.



Figura 57. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque A. Fuente: Elaboración propia

En este bloque se configuran los parámetros globales de funcionamiento de la herramienta, incluyendo los criterios de selección utilizados posteriormente en el cálculo de las clasificaciones geomecánicas y en la consolidación de resultados. La última hoja de este bloque corresponde a una hoja de configuración, en la que el usuario puede definir los valores asociados a determinados umbrales y criterios de decisión que gobiernan el comportamiento del modelo. Entre ellos se incluyen, por ejemplo, los criterios utilizados para seleccionar el valor representativo dentro de los rangos de determinadas clasificaciones geomecánicas, así como los factores de dispersión utilizados para modelizar la incertidumbre asociada a la información disponible. Estos parámetros se explicarán con mayor detalle en el apartado siguiente.

BLOQUE	NOMBRE HOJA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE A	00_PORTADA INSTITUCIONAL	Datos del TFM
	00_PORTADA CONTROL	Portada de control para datos de proyecto
	02_CONFIG_LISTAS_GENERALES	Lista con valores asociados y definidos por el técnico

Tabla 36. Hojas e información del BLOQUE A. Fuente: Elaboración propia

El Bloque B de la herramienta está destinado a la introducción, organización y validación de los datos de entrada del proyecto, constituyendo la base sobre la que se desarrollarán los cálculos posteriores. Este bloque se estructura en dos hojas principales que permiten, por un lado, introducir la información técnica relevante del trazado y, por otro, generar la partición longitudinal de la obra en función del tipo de terreno.

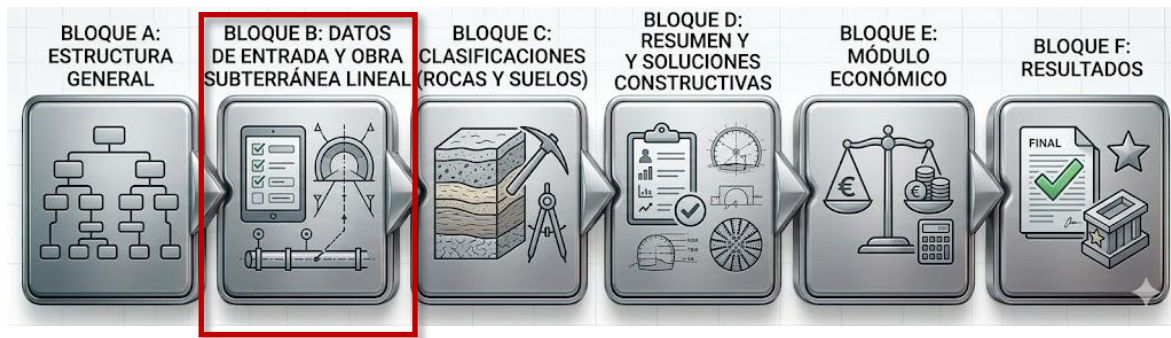


Figura 58. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque B. Fuente: Elaboración propia

En la primera hoja del bloque B se introducen los datos fundamentales del proyecto, organizados en diferentes categorías que permiten caracterizar de forma integral cada tramo del trazado subterráneo. Entre los datos incluidos se encuentran, en primer lugar, los datos de identificación de los tramos, tales como el identificador del tramo, el PK inicial y final, que permiten establecer la posición longitudinal de cada unidad de análisis dentro del trazado. A continuación, se incorporan los datos relativos al contexto geológico, incluyendo la litología, la unidad geológica o cualquier información relevante que permita interpretar el comportamiento del terreno.

Asimismo, se incluyen variables relacionadas con la hidrogeología, como la presencia o ausencia de nivel freático, su posición relativa respecto al eje del túnel u otras condiciones hidrogeológicas relevantes que puedan condicionar tanto el comportamiento del terreno como la selección del método constructivo. Paralelamente, se introducen los datos correspondientes a la geometría del túnel y del trazado, entre los que se encuentran la sección del túnel, el radio de curvatura en planta o la pendiente longitudinal, parámetros que influyen tanto en la viabilidad de determinados métodos de excavación como en el diseño del sostenimiento.

La hoja también contempla variables asociadas al entorno del proyecto, tales como el carácter urbano o natural del entorno, la presencia de infraestructuras próximas, edificaciones o servicios que puedan condicionar la ejecución de la obra. Finalmente, se incorporan parámetros asociados a la calidad del dato, con el objetivo de reflejar el grado de conocimiento o fiabilidad de la información disponible en las fases iniciales del estudio.

Además de estas variables, esta hoja incorpora una columna de control de datos, cuyo objetivo es verificar la coherencia de la información introducida por el usuario. Mediante el uso de fórmulas lógicas y comparaciones entre filas consecutivas, la herramienta es capaz de detectar automáticamente posibles inconsistencias en la definición de los tramos. En particular, el sistema identifica situaciones como la existencia de PK repetidos, solapes entre tramos consecutivos, huecos

entre tramos definidos o incoherencias en las longitudes indicadas. Cuando se detecta alguno de estos casos, la herramienta genera un aviso automático que alerta al técnico de la posible inconsistencia, permitiendo su corrección antes de continuar con el proceso de análisis. Los criterios específicos que utiliza la herramienta para generar estos avisos se describirán con mayor detalle en el apartado siguiente.

Una vez introducida y validada la información inicial del proyecto, la segunda hoja del Bloque B se encarga de realizar la partición longitudinal del trazado, estructurando los diferentes tramos en función del tipo de terreno identificado. A partir de los datos introducidos en la hoja anterior, la herramienta distingue entre tramos correspondientes a roca, suelo y tramos mixtos, introduciendo en este último caso una zona de transición entre ambos dominios. Esta zona intermedia se calcula a partir del parámetro  $L_{Trans}$ , definido por el técnico, que representa la longitud de transición considerada entre un dominio geológico y otro. Este enfoque permite representar de forma más realista el paso progresivo entre distintos tipos de terreno, reconociendo que en la práctica las transiciones entre suelo y roca rara vez se producen de forma abrupta.



Figura 59. Representación de longitud de transición. Fuente: Elaboración propia



Figura 60. Representación de cambio de tipo de litología sin longitud de transición. Fuente: Elaboración propia

La hoja devuelve finalmente la información de la hoja anterior ya preparada para su utilización en las etapas posteriores del modelo, incorporando las particiones longitudinales definitivas del trazado. En este proceso se ha tenido en cuenta que pueden producirse cambios en la litología o en la unidad geológica, generando nuevos tramos, pero esta vez sin longitud de transición entre los materiales. De esta manera, el bloque B establece una base estructurada y coherente de la información del proyecto, que será utilizada posteriormente en el cálculo de las clasificaciones geomecánicas y en la consolidación de resultados.

BLOQUE	NOMBRE HOJA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE B	03_DATOS_TRAZADO	Información relevante del proyecto
	04_PARTICION_TRAMOS	Estructuración de la información del proyecto para su uso

Tabla 37. Hojas e información del BLOQUE B. Fuente: Elaboración propia

El Bloque C corresponde al módulo de cálculo de las clasificaciones geomecánicas y de suelos. En función del tipo de terreno identificado en el bloque anterior, la herramienta determina automáticamente qué clasificaciones deben aplicarse en cada tramo. De esta forma, las clasificaciones específicas de macizos rocosos —RMR, Q de Barton, GSI y Romana— se aplican exclusivamente en los tramos clasificados como roca, mientras que las clasificaciones de suelos se aplican únicamente en los tramos correspondientes. En el caso de los tramos mixtos, ambas tipologías de clasificación se analizan simultáneamente, permitiendo que el técnico evalúe posteriormente cuál de las soluciones constructivas resultantes es más adecuada.

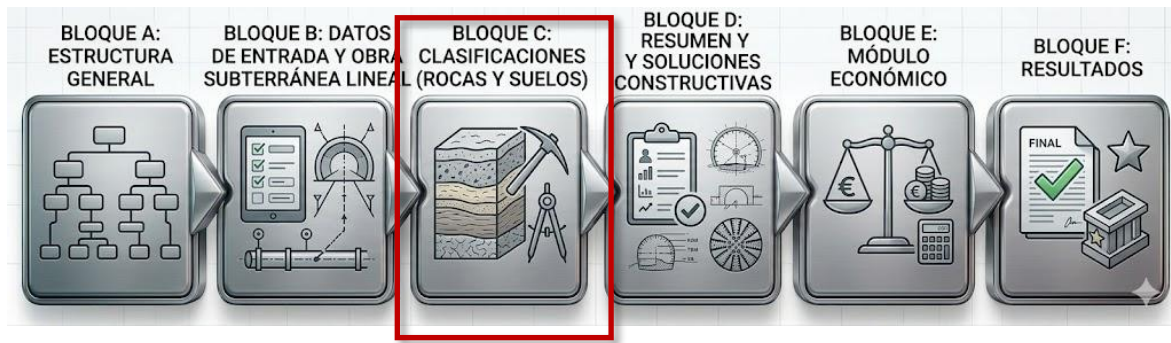


Figura 61. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque C. Fuente: Elaboración propia

Cada clasificación geomecánica dispone de una tabla independiente dentro de la hoja de las clasificaciones. En ellas se importan automáticamente los datos identificativos del tramo —ID, PK inicial, PK final y tipo de terreno— y el usuario introduce los parámetros necesarios para el cálculo de la clasificación correspondiente. En algunos casos estos parámetros se introducen como valores numéricos, mientras que en otros se utilizan listas desplegadas de selección, lo que permite estandarizar las opciones disponibles y evitar inconsistencias derivadas de la introducción de texto libre.

Cuando un mismo parámetro puede introducirse por diferentes vías, la herramienta incorpora avisos automáticos que alertan al usuario en caso de introducir información redundante o incompatible. Este mecanismo se ha implementado principalmente en las clasificaciones RMR y Romana, donde determinados valores pueden introducirse de forma directa o calcularse a partir de parámetros intermedios.

El cálculo de las clasificaciones sigue la lógica establecida por cada autor. En el caso del índice Q de Barton, el valor se obtiene directamente mediante la expresión matemática definida por el sistema. En el caso del GSI, el valor se determina a partir de dos listas desplegadas que representan la estructura del macizo y el estado de las discontinuidades. La combinación de ambas variables permite obtener un rango de valores mínimo y máximo del GSI, que posteriormente se transforma en un valor de cálculo según el criterio seleccionado por el técnico (desfavorable, medio o favorable), definido previamente en el bloque de configuración.

En el caso de las clasificaciones RMR y Romana, el modelo incorpora un tratamiento específico de la incertidumbre de los datos. Cuando el técnico dispone de todos los parámetros necesarios, la herramienta calcula directamente el valor de la clasificación. Sin embargo, cuando algunos parámetros no están disponibles, el cálculo puede realizarse con la información parcial disponible, introduciendo un índice de completitud, que representa el porcentaje de información utilizada en

el cálculo. Este índice permite evaluar la calidad del resultado obtenido y se desarrolla con mayor detalle en el apartado 5.3.

Asimismo, cuando el valor del RMR se introduce directamente —por ejemplo, porque se dispone de información previa o de estudios anteriores— la herramienta incorpora un índice de trazabilidad, que refleja la capacidad de identificar la procedencia de la información utilizada. En estos casos se aplica una penalización respecto al cálculo directo realizado por la herramienta, con el objetivo de reflejar la mayor incertidumbre asociada a este tipo de datos.

Ambos parámetros se combinan para generar un índice de validez-confianza, que representa el grado de fiabilidad de la clasificación obtenida. Este índice se utiliza posteriormente para calcular la amplitud del intervalo asociado al valor de cálculo mediante la introducción de un factor de dispersión configurable por el técnico, denominado  $K_{RMR}$ . La aplicación de este factor permite obtener un intervalo mínimo y máximo alrededor del valor de cálculo, denominado  $\Delta_{RMR}$ , que refleja la incertidumbre asociada a la información disponible. Ambos se desarrollarán con mayor amplitud en el apartado siguiente.

En el caso de los suelos, la caracterización se realiza mediante parámetros granulométricos y de plasticidad, incluyendo el porcentaje de material que pasa por el tamiz nº200, el porcentaje de arena o grava que pasa por el tamiz nº4, el límite líquido, la proporción de finos y la identificación del carácter orgánico o inorgánico del terreno.

BLOQUE	NOMBRE HOJA		INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE C	HOJA CÁLCULO	10_CLASIFICACIONES	Hoja con todas las tablas de las clasificaciones
	HOJAS AUXILIARES	10_RMR	Cálculo del valor de RMR
		11_Q	Cálculo del valor de Q-Barton
		12_GSI	Cálculo del valor del GSI
		13_ROMANA	Cálculo del valor de Romana
		20_USCS	Identificación del suelo

Tabla 38. Hojas e información del BLOQUE B. Fuente: Elaboración propia

Una vez calculadas todas las clasificaciones correspondientes a cada tramo, la herramienta pasa al Bloque D: consolidación de resultados. En este bloque se presenta inicialmente una tabla resumen en la que se recopilan los valores obtenidos en todas las clasificaciones aplicadas a cada tramo,

junto con sus respectivas categorías cualitativas. Esta visión global permite disponer de un mapa completo de la información geomecánica obtenida a lo largo del proceso de análisis.

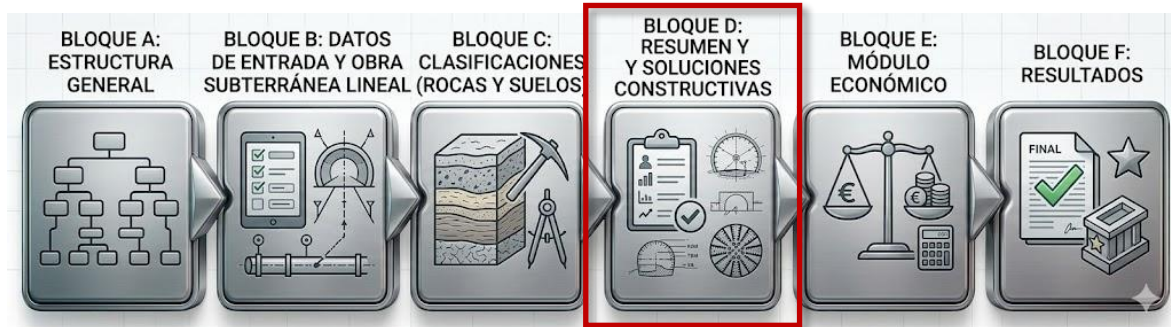


Figura 62. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque D. Fuente: Elaboración propia

A continuación, el modelo utiliza una matriz de compatibilidad que relaciona las recomendaciones de los distintos autores con los métodos constructivos, longitudes de avance y sistemas de sostenimiento asociados a cada rango de clasificación. Mediante un sistema de filtros lógicos, la herramienta identifica las soluciones constructivas que son simultáneamente compatibles con todas las clasificaciones consideradas. Este procedimiento permite obtener un conjunto de soluciones técnicamente coherentes con el comportamiento esperado del terreno.

En este punto del proceso, el técnico dispone ya de una lista de posibles soluciones constructivas compatibles con las diferentes clasificaciones geomecánicas, pudiendo seleccionar aquella que mejor se adapte a las condiciones del proyecto. Posteriormente, en el apartado 5.3 se introducen criterios técnicos adicionales que permiten descartar determinadas opciones cuando no resultan aconsejables en función de factores externos, como la longitud del túnel, la presencia de nivel freático o los condicionantes económicos asociados a determinados métodos mecanizados.

BLOQUE	NOMBRE HOJA		INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE D	HOJA CÁLCULO	20_RESUMEN_CLASIF	Comparativa de las diferentes soluciones de las clasificaciones por tramos longitudinales
	HOJA AUXILIAR	21_TABLAS_CLASIFICACIONES	Hoja que dispone de las clases de cada una de las clasificaciones (Muy buena, buena, media, etc.)
		25_REGLAS_TECNICAS	Se incluirán las reglas de descarte técnico de las soluciones constructivas en base a

BLOQUE	NOMBRE HOJA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
		los criterios del entorno, geometría, geológicos, etc.

Tabla 39. Hojas e información del BLOQUE D. Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionada la solución constructiva —incluyendo método de excavación, longitud de avance y sostenimiento— la herramienta pasa al Bloque E: módulo económico. En este módulo, y a partir de los datos previamente definidos (sección del túnel, longitud del tramo, longitud de avance, tipo de sostenimiento, etc.), se estiman una serie de magnitudes relevantes del proyecto, tales como el volumen de excavación, la cantidad de hormigón proyectado, el número de bulones necesarios, la duración aproximada de los trabajos o los costes asociados a determinados equipos como tuneladoras, retroexcavadoras y otra maquinaria.

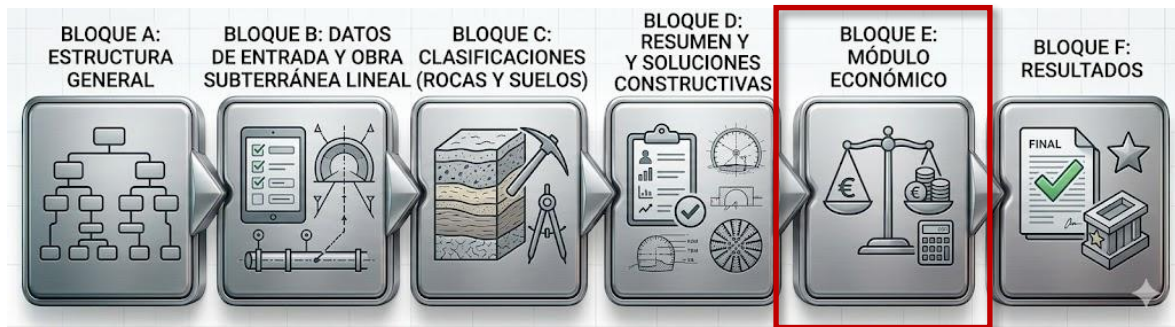


Figura 63. Esquema metodológico de la herramienta en el Bloque E. Fuente: Elaboración propia

Mediante la introducción de costes unitarios por parte del técnico, es posible obtener una estimación preliminar de los costes asociados a diferentes aspectos de la obra.

BLOQUE	NOMBRE HOJA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE E	30_ESTUDIO_ECO_REND	Estudio preliminar económico de la solución obtenida

Tabla 40. Hojas e información del BLOQUE E. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la herramienta incorpora una hoja de resultados globales, donde se recopila toda la información generada a lo largo del proceso, permitiendo visualizar de forma sintética la caracterización geotécnica del trazado, las clasificaciones obtenidas, las soluciones constructivas compatibles y las estimaciones económicas asociadas.

BLOQUE	NOMBRE HOJA	INFORMACIÓN DISPONIBLE
BLOQUE E	40_FICHA_IMPRIMIBLE	Hojas para imprimir con los resultados
	50_RESUMEN_EXPORTABLE	Resumen del proyecto

Tabla 41. Hojas e información del BLOQUE F. Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Formalización de reglas de decisión, criterios técnicos y control de incertidumbre

Una vez descrita en el apartado anterior la arquitectura general de la herramienta y el funcionamiento operativo de sus diferentes bloques, resulta necesario formalizar el conjunto de reglas de decisión, criterios técnicos y mecanismos de control de la incertidumbre que gobiernan el comportamiento interno del modelo. Este apartado describe el sistema lógico que permite transformar la información geotécnica introducida por el técnico en un conjunto estructurado de resultados coherentes, integrando las diferentes clasificaciones geomecánicas consideradas, las recomendaciones constructivas derivadas de estas y los criterios técnicos que condicionan la selección final de soluciones.

El desarrollo de este sistema de reglas constituye uno de los elementos fundamentales de la herramienta, ya que permite establecer una metodología sistemática de análisis que facilite la toma de decisiones en fases preliminares de proyecto. En este sentido, el objetivo del modelo no es sustituir el criterio del técnico, sino proporcionar un marco estructurado que permita ordenar la información disponible, evaluar su calidad, integrar diferentes clasificaciones geomecánicas y comparar alternativas constructivas de forma coherente y reproducible.

La lógica del modelo se basa en una jerarquización progresiva de decisiones, en la que cada etapa del proceso utiliza la información generada en las fases anteriores para restringir el conjunto de soluciones posibles. Este enfoque reproduce en cierta medida el proceso de razonamiento habitual en el diseño de obras subterráneas, donde la caracterización geotécnica del terreno condiciona el método de excavación, este a su vez influye en el tipo de sostenimiento requerido y, finalmente, las condiciones técnicas, económicas y ambientales del proyecto determinan la solución constructiva más adecuada.

En términos generales, las reglas de decisión implementadas dentro de la herramienta se estructuran en cuatro niveles principales. En primer lugar, se definen los criterios relacionados con la estructuración del trazado y la coherencia de los datos de entrada, que permiten garantizar que la información utilizada por el modelo sea consistente desde el punto de vista geométrico y geológico. En segundo lugar, se establecen las reglas que gobiernan la interpretación de las clasificaciones geomecánicas, incluyendo los criterios de selección dentro de rangos de valores y los

mecanismos de evaluación de la calidad del dato. En tercer lugar, el modelo integra los resultados de las diferentes clasificaciones mediante una matriz de compatibilidad de soluciones, que permite identificar las alternativas constructivas coherentes con todas las clasificaciones consideradas. Finalmente, se incorporan criterios técnicos adicionales que permiten aplicar restricciones específicas del proyecto, descartando soluciones que, aun siendo válidas desde el punto de vista geomecánico, no resultan viables en términos constructivos, económicos o ambientales.

Uno de los primeros criterios que interviene en el funcionamiento del modelo corresponde a la definición de la longitud de transición entre dominios geotécnicos, representada mediante el parámetro  $L_{Trans}$ . Este parámetro se utiliza durante el proceso de partición longitudinal del trazado para representar la zona de transición entre terrenos de distinta naturaleza, fundamentalmente entre dominios de roca y suelo.

Desde el punto de vista geológico y geotécnico, los contactos entre materiales de distinta naturaleza raramente se producen de forma abrupta. En la mayoría de los casos existen zonas intermedias donde el comportamiento del terreno presenta características mixtas, resultado de procesos de alteración, fracturación progresiva o variaciones en la estructura geológica. Ignorar estas zonas de transición podría conducir a una simplificación excesiva del modelo y a una representación poco realista del comportamiento del terreno.

Para tener en cuenta este fenómeno, la herramienta introduce un tramo mixto alrededor del punto donde se produce el cambio de terreno. El cálculo de este tramo mixto se realiza tomando como referencia el PK donde se produce el contacto entre ambos terrenos y aplicando la longitud de transición definida por el técnico hacia ambos lados del punto de contacto. De esta forma, la longitud total del tramo mixto queda definida mediante la expresión:

$$L_{MIXTO} = 2 \times L_{trans}$$

*Ecuación 12. Ecuación para la longitud de tramo mixto entre suelo y roca. Fuente: Elaboración propia*

El valor de  $L_{Trans}$  es configurable por el técnico dentro de la hoja de configuración general de la herramienta. No obstante, este parámetro se mantiene constante para todo el trazado analizado, evitando así la posibilidad de modificar la longitud de transición de forma específica para determinados tramos con el objetivo de influir en los resultados obtenidos. Esta decisión contribuye a mantener la coherencia global del modelo y garantiza que la representación de las zonas de transición geológica sea homogénea a lo largo de todo el análisis.

Cabe señalar que el tramo mixto únicamente se introduce cuando se produce un cambio en el tipo de terreno considerado por la herramienta, es decir, en las transiciones entre suelo y roca o viceversa. En aquellos casos en los que exista un cambio de litología o de unidad geológica pero el tipo de terreno se mantenga constante dentro de una misma categoría – entre diferentes litologías rocosas o distintos tipos de unidades geológicas – la herramienta genera igualmente un nuevo tramo en la partición longitudinal del trazado, pero sin incorporar un tramo mixto de transición. En estas situaciones, el cambio se produce directamente en el PK de contacto entre ambas unidades, dado que, desde el punto de vista del comportamiento geotécnico global, el modelo continúa operando dentro del mismo terreno.

Esta decisión responde a un criterio de equilibrio entre realismo geológico y eficiencia del modelo, evitando la generación de un número excesivo de tramos mixtos que no aportaría mejoras significativas en la interpretación del comportamiento del terreno, pero que si incrementaría la complejidad del análisis y el volumen de cálculos a realizar dentro de la herramienta.

Una vez definida la estructura general del trazado, el modelo incorpora un conjunto de reglas destinadas a verificar la coherencia de la información introducida en la hoja “Hoja03\_DATOS TRAZADO”, que constituye el punto de entrada de los datos del proyecto.

Dado que los PK de los tramos se introducen manualmente, existe la posibilidad de que se produzcan inconsistencias en la definición del trazado que puedan afectar al funcionamiento del modelo. Para evitar este tipo de errores, se ha implementado un sistema automático de validación que analiza diferentes parámetros de control.

El primero de estos mecanismos corresponde al control de coherencia de PK, mediante el cual se verifica que no existan valores negativos y que el PK final de cada tramo sea siempre mayor que su PK inicial. Este control permite asegurar que cada tramo representa un intervalo longitudinal válido dentro del trazado.

El segundo mecanismo corresponde a la detección de solapes entre tramos consecutivos, evitando que dos unidades de análisis ocupen simultáneamente la misma posición longitudinal. La presencia de solapes podría provocar duplicaciones de información dentro del modelo y afectar a la asignación correcta de clasificaciones geomecánicas.

El tercer mecanismo de control corresponde a la detección de huecos entre tramos consecutivos, lo que permite identificar discontinuidades en la definición del trazado que podrían generar errores en el cálculo de longitudes o en la asignación de parámetros geotécnicos.

Finalmente, se ha incorporado un control de longitud mínima de tramo, cuyo objetivo es evitar que existan tramos con una longitud inferior a la longitud de transición definida anteriormente. Esta restricción impide que se produzcan situaciones en las que un tramo completo quede contenido dentro de la zona de transición geológica, lo que generaría incoherencias en la clasificación del terreno.

PK INI	PK FIN	CONTROL PK	CONTROL SOLAPE	CONTROL HUECO	CONTROL LONG
-10	100	<b>PK NEGATIVO</b>	OK	OK	OK
100	50	<b>PK FIN&lt;PK INI</b>	OK	OK	OK
75	150	OK	<b>SOLAPE</b>	OK	OK
250	400	OK	OK	<b>HUECO</b>	OK
400	410	OK	OK	OK	<b>MUY CORTO</b>

Tabla 42. Ejemplos de control de datos. Fuente: Elaboración propia

Una vez garantizada la coherencia de los datos de entrada, el modelo procede al cálculo de las clasificaciones geomecánicas. En esta fase intervienen reglas de decisión relacionadas con la interpretación de los rangos de valores presentes en algunas clasificaciones.

En el caso del índice Q de Barton, el cálculo del valor final se realiza aplicando directamente la expresión matemática definida por el autor. No obstante, algunos de los parámetros que intervienen en dicha expresión se definen mediante rangos de valores. Para resolver esta ambigüedad, la herramienta permite al técnico seleccionar el criterio de interpretación del rango, pudiendo optar entre un enfoque desfavorable, medio o favorable. En función de la opción seleccionada, el modelo utiliza el valor mínimo, medio o máximo dentro del intervalo correspondiente.

Debe señalarse que, a diferencia de lo que ocurre en otras clasificaciones geomecánicas implementadas, el resultado obtenido para el índice Q es un valor único de cálculo. Es decir, el modelo no genera un rango de valores mínimos y máximos asociados al resultado final, sino que el valor de Q se obtiene directamente a partir de la aplicación de la fórmula original utilizando los valores seleccionados dentro de los rangos de cada parámetro.

De esta forma, la selección de criterio desfavorable, medio o favorable afecta únicamente al valor adoptado para los parámetros que intervienen en la fórmula, pero una vez fijados dichos valores, el resultado del índice Q queda completamente determinado. Por lo tanto, el valor obtenido

constituye el valor de referencia utilizado posteriormente en las fases de clasificación y recomendaciones constructivas asociadas a este sistema.

JN_SEL	JN_MIN	JN_MAX	RANGO	JN
Roca masiva	0,5	1	CONSERVADOR	JNMAX (1)
Roca masiva	0,5	1	MEDIO	PROM. (0,75)
Roca masiva	0,5	1	FAVORABLE	JNMIN (0,5)
JW_SEL	JW_MIN	JW_MAX	RANGO	JW
Afluencia excepcional inicial mantenida	0,05	0,1	CONSERVADOR	JWMIN (0,05)
Afluencia excepcional inicial mantenida	0,05	0,1	MEDIO	PROM. (0,075)
Afluencia excepcional inicial mantenida	0,05	0,1	FAVORABLE	JWMAX(0,1)

Tabla 43. Ejemplos de funcionamiento de criterios para la Q-Barton. Fuente: Elaboración propia

Un procedimiento similar se aplica en la clasificación GSI de Hoek y Marinos, donde la combinación entre la estructura del macizo y el estado de las discontinuidades genera un intervalo de valores posibles de GSI. A partir de este intervalo, el técnico selecciona nuevamente el criterio de interpretación del rango, obteniendo así un valor único de cálculo que será utilizado posteriormente en el análisis.

ESTRUC SEL	COND SEL	GSI_MIN	GSI_MAX	RANGO	GSI CALC
MASIVO	MUY BUENA	80	100	CONSERVADOR	80
MASIVO	MEDIA	60	80	MEDIO	70
MASIVO	BUENA	70	90	FAVORABLE	90

Tabla 44. Ejemplos de funcionamiento de criterios de rango para GSI. Fuente: Elaboración propia

Las reglas de decisión adquieren una mayor relevancia en el caso de las clasificaciones RMR y Romana, debido al número de parámetros implicados en su cálculo y a la posibilidad de disponer de información incompleta.

La herramienta permite introducir el valor del RMR de dos formas diferentes. La primera consiste en calcularlo directamente a partir de los seis parámetros que definen la clasificación. La segunda consiste en introducir directamente un valor conocido por el técnico, que se utilizará como valor de cálculo, previo al paso por los índices para obtener el valor definitivo.

Cuando el valor se introduce directamente, la herramienta no puede conocer el procedimiento mediante el cual se ha obtenido dicho valor, por lo que se introduce un Índice de Trazabilidad (IT) que representa la capacidad de identificar el origen de la información utilizada.

ORIGEN DEL DATO	ÍNDICE DE TRAZABILIDAD (IT)
DIRECTO (Dato conocido por el técnico)	0,8
CALCULO (Valor de RMR obtenido por la herramienta)	1

Tabla 45. Valores de Índice de Trazabilidad. Fuente: Elaboración propia

Además de este índice, el modelo incorpora un Índice de Completitud (IC) que evalúa el porcentaje de información disponible para realizar el cálculo. Este índice se calcula en función del número de parámetros conocidos dentro de los seis parámetros que intervienen en la clasificación RMR.

$$IC(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ Parámetros utilizados para el cálculo de RMR}}{N^{\circ} \text{ Parámetros totales del RMR (6)}} \times 100$$

Ecuación 13. Ecuación para el cálculo del Índice de Completitud. Fuente: Elaboración propia

La combinación de ambos índices permite calcular el Índice de Validez-Confianza (IVC):

$$IVC = IC \times IT$$

Ecuación 14. Fórmula para el cálculo del Índice de Validez-Confianza. Fuente: Elaboración propia

Este índice representa el grado de fiabilidad de la clasificación obtenida. En el caso de esta herramienta se ha establecido un umbral mínimo de 0,6, por debajo del cual el valor del RMR se considera insuficientemente fiable para su utilización en el proceso de toma de decisiones.

A partir de este punto interviene el factor de dispersión  $K_{RMR}$ , que representa el grado de incertidumbre que el técnico desea considerar en la interpretación de los resultados. Este factor permite modelizar la variabilidad inherente a la caracterización geomecánica del terreno.

La combinación entre el índice de validez-confianza y el factor de dispersión permite calcular el parámetro denominado  $\Delta_{RMR}$ , que representa la amplitud del intervalo de incertidumbre asociado al valor de cálculo.

$$\Delta RMR = K_{RMR} \times IVC_{RMR}$$

Ecuación 15. Fórmula para el cálculo del  $\Delta$  RMR. Fuente: Elaboración propia

$$RMR \text{ MIN} = RMR \text{ CALC} - \Delta RMR$$

$$RMR \text{ MAX} = RMR \text{ CALC} + \Delta RMR$$

Ecuación 16. Fórmulas para el cálculo del RMR mínimo y máximo. Fuente: Elaboración propia

El parámetro  $\Delta_{RMR}$  representa la amplitud del intervalo de incertidumbre asociado al valor de RMR de cálculo y se determina a partir de la combinación entre el índice de validez-confianza de la información disponible y el factor de dispersión  $K_{RMR}$  definido por el técnico. De este modo, cuando el número de parámetros conocidos es reducido y el factor de dispersión adoptado es elevado, el intervalo resultante aumenta, generando valores mínimo y máximo más alejados del RMR de cálculo y reflejando un mayor grado de incertidumbre en la caracterización del macizo rocoso. Por el contrario, cuando la clasificación se basa en un mayor número de parámetros conocidos y se adopta un factor de dispersión reducido, el intervalo disminuye y los valores mínimo y máximo se aproximan al valor de cálculo, indicando una mayor fiabilidad de la información disponible y una menor incertidumbre en la estimación de la calidad del macizo.

Una vez calculadas todas las clasificaciones, el modelo procede a consolidar los resultados mediante una matriz de compatibilidad entre clasificaciones geomecánicas y soluciones constructivas.

Cada una de las clasificaciones utilizadas incorpora recomendaciones sobre métodos de excavación, sostenimientos y longitudes de avance. Estas recomendaciones se han estructurado dentro de la herramienta en forma de tablas que relacionan los rangos de cada clasificación con las soluciones constructivas asociadas.

A este respecto, cada sistema de clasificación aporta distintos tipos de recomendaciones técnicas. En el caso de la clasificación RMR de Bieniawski, el autor establece recomendaciones principalmente orientadas al sostenimiento del macizo rocoso y a las longitudes de avance recomendadas en función de la calidad del macizo. Por su parte, la clasificación de Romana amplía este enfoque e incorpora recomendaciones no solo sobre sostenimientos, sino también sobre métodos constructivos y longitudes de avance, proporcionando un marco más completo para la selección de soluciones de excavación en obras subterráneas.

En el caso del sistema Q de Barton, las recomendaciones de sostenimiento no se presentan en forma de tablas discretas, sino mediante el conocido diagrama de soporte del sistema Q. En este gráfico, las soluciones de sostenimiento se determinan en función del valor del índice Q en el eje horizontal y del denominado "*Equivalent Dimension*" o dimensión equivalente de excavación ( $D_e$ ) en el eje vertical, definido como el cociente entre el diámetro o dimensión característica de la excavación y el *Excavation Support Ratio* (ESR). A partir de la posición del punto definido por ambos parámetros dentro del diagrama, se obtiene el tipo de sostenimiento recomendado.

Por último, en el caso del índice GSI, el sistema desarrollado por Hoek y Marinos no incorpora recomendaciones directas sobre métodos de excavación ni sostenimientos asociados a rangos específicos del índice. Su principal utilidad radica en la caracterización del macizo rocoso y en su aplicación dentro de modelos de resistencia del macizo, como el criterio de Hoek–Brown, por lo que dentro de la herramienta se emplea principalmente como indicador adicional de la calidad del macizo rocoso.

A partir de estas tablas, la herramienta identifica para cada tramo todas las soluciones compatibles con cada clasificación individual. Posteriormente se aplica un filtro de compatibilidad que selecciona únicamente aquellas soluciones que son simultáneamente válidas para todas las clasificaciones consideradas.

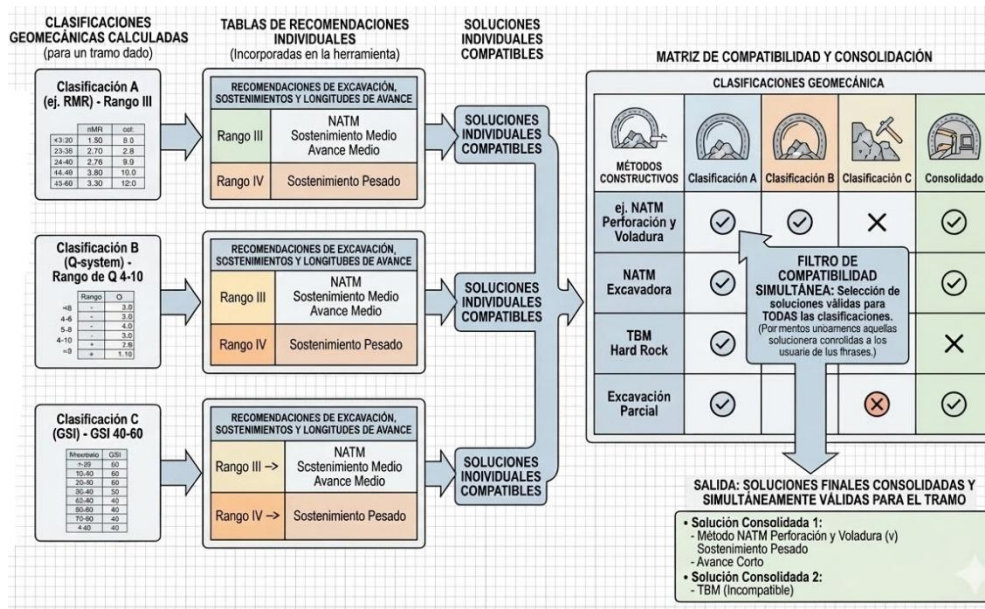


Figura 64. Ejemplo de funcionamiento de la matriz de compatibilidad. Fuente: Elaboración propia

Además del filtrado automático basado en las clasificaciones geomecánicas, la herramienta incorpora una capa adicional de criterios técnicos de descarte, que permiten eliminar determinadas soluciones cuando estas no resultan adecuadas desde el punto de vista constructivo, económico o ambiental. Por ejemplo, puede establecerse que una tuneladora no se considere cuando la longitud total del túnel sea demasiado reducida para justificar su coste de implantación, o que determinados métodos de excavación no se utilicen en entornos urbanos sensibles.

Estas reglas técnicas se han definido a partir de la combinación de dos fuentes principales de información. Por un lado, las recomendaciones originales proporcionadas por los autores de las clasificaciones geomecánicas que incorporan orientaciones constructivas, y por otro lado, la

información recopilada en el capítulo 2 correspondiente al estado del arte, donde se analizan los métodos constructivos utilizados habitualmente en obras subterráneas y su relación con la calidad del macizo rocoso o las características del suelo.

A partir de esta base se han establecido una serie de reglas que relacionan la calidad del macizo rocoso o las características del terreno con los métodos constructivos que habitualmente se emplean en la práctica. Por ejemplo, el método NATM suele aplicarse en macizos rocosos de calidad media o media-baja, donde el sostenimiento flexible y la observación del comportamiento del terreno permiten adaptar progresivamente la solución constructiva. En macizos rocosos de muy buena calidad, donde el sostenimiento requerido es mínimo, pueden resultar más adecuados métodos de excavación mediante perforación y voladura con sostenimientos reducidos o incluso excavaciones con frente completo. En consecuencia, dentro de la herramienta se establecen rangos de calidad del macizo rocoso dentro de los cuales determinados métodos constructivos se consideran recomendables o, por el contrario, poco adecuados.

De manera similar, se han incorporado reglas que relacionan los métodos constructivos con los métodos de excavación habitualmente asociados a cada uno de ellos. En el caso del NATM, el método de excavación puede realizarse mediante perforación y voladura, mediante excavación mecanizada con rozadoras o incluso mediante medios mecánicos convencionales como retroexcavadoras en terrenos más blandos. Sin embargo, en el caso de los métodos mecanizados con tuneladora, el método constructivo y el método de excavación coinciden, dado que la excavación se realiza directamente mediante la propia máquina.

Este mismo criterio se ha aplicado a la selección de sostenimientos y configuraciones de sección de excavación. De esta forma, se han evitado combinaciones que en la práctica resultan poco habituales o técnicamente incoherentes, como la utilización de tuneladoras asociadas a secciones de excavación partidas. Por el contrario, los métodos mecanizados se vinculan a excavaciones en sección completa, mientras que los métodos convencionales pueden asociarse a configuraciones como avance en sección completa, avance y destroza o excavación mediante calota y destroza.

En relación con las longitudes de avance o pase, la herramienta incorpora las recomendaciones disponibles en las clasificaciones de Bieniawski (RMR) y Romana, seleccionando únicamente aquellas longitudes que resultan compatibles con ambas clasificaciones cuando se dispone de información procedente de ambas. De esta forma se garantiza que los avances considerados sean coherentes con las recomendaciones geomecánicas disponibles.

Finalmente, también se han incorporado posibles medidas de presostenimiento que pueden resultar necesarias en determinadas condiciones del terreno, tanto en suelos como en macizos rocosos. Estas medidas incluyen técnicas como paraguas de micropilotes, bulones de avance, inyecciones de consolidación o tratamientos del terreno. Al igual que en los casos anteriores, estas soluciones se han asociado a los métodos constructivos con los que habitualmente se emplean en la práctica, evitando combinaciones poco realistas desde el punto de vista constructivo.




















TABLA DE REGLAS DE DESCARTE TÉCNICO APLICADAS A MÉTODOS CONSTRUCTIVOS					
TIPO	CRITERIO	CONDICIÓN / REGLA		SOLUCIÓN DESCARTADA	RACIONAL
 Económico	Longitud del Túnel 	< 750 m ( ilustrativo)		TBM (Tuneladora) 	El coste de movilización de la TBM y construcción del pozo es excesivamente alto.
 Medioambiental	Ubicación Urbana 	A menos de 100 m de un edificio sensible 		Perforación y Voladura 	Supera límites de coste.
 Construcción	Limitaciones de Superficie 	Sin espacio disponible para el pozo de lanzamiento de la TBM 		TBM con grandes requisitos de lanzamiento 	Construcción inviable.
 Medioambiental/Riesgo	Zona de Protección de Aguas 	Cruce de acuífero sensible 		Inyección de lechada a alta presión / Inyección química especializada 	Riesgo de contaminación del suelo.
 Construcción	Acceso 	TBM demasiado grande para las vías de acceso estándar 		Diámetro específico de TBM 	Logística inviable.

Figura 65. Ejemplo de reglas de descarte técnico aplicadas. Fuente: Elaboración propia

En los bloques finales de la herramienta no se aplican nuevas reglas de decisión, ya que estos módulos se limitan a estimar magnitudes y costes a partir de la solución constructiva seleccionada por el técnico. La jerarquización final del proceso de decisión puede resumirse en cuatro etapas:

1. caracterización geotécnica del trazado
2. cálculo de clasificaciones geomecánicas
3. consolidación mediante matriz de compatibilidad
4. aplicación de criterios técnicos y selección final de solución

Este enfoque permite estructurar la toma de decisiones de forma transparente, trazable y reproducible, manteniendo al mismo tiempo la flexibilidad necesaria para que el técnico pueda aplicar su criterio profesional en cada etapa del análisis.

#### 5.4. Limitaciones y consideraciones prácticas

La herramienta desarrollada en este trabajo constituye un sistema funcional de apoyo a la toma de decisiones para la selección preliminar de métodos constructivos y sostenimientos en obras subterráneas. No obstante, como ocurre en cualquier modelo aplicado, su implementación presenta una serie de limitaciones técnicas que deben ser reconocidas y contextualizadas. Estas limitaciones no invalidan el funcionamiento del modelo ni su utilidad como herramienta de análisis preliminar, pero sí condicionan su grado de automatización, su escalabilidad y la forma en que debe utilizarse en la práctica.

La mayor parte de estas limitaciones derivan del entorno de desarrollo seleccionado, Microsoft Excel, que, si bien ofrece una gran accesibilidad y facilidad de implementación, presenta restricciones cuando el volumen de información, el número de dependencias entre hojas y la complejidad de los cálculos aumentan progresivamente. Asimismo, algunas simplificaciones metodológicas han sido adoptadas de forma deliberada para garantizar la estabilidad del modelo y mantener su operatividad dentro de dicho entorno.

A continuación, se describen las principales limitaciones técnicas identificadas durante el desarrollo e implantación de la herramienta, junto con las consideraciones prácticas que deben tenerse en cuenta en su utilización.

- **Limitaciones asociadas al entorno de desarrollo**

La herramienta ha sido desarrollada íntegramente en Microsoft Excel, utilizando fórmulas de cálculo, tablas estructuradas, listas desplegadas, validación de datos y hojas auxiliares para gestionar la información necesaria para el análisis. Esta elección responde a la voluntad de utilizar una herramienta ampliamente disponible en entornos profesionales de ingeniería, que permita la trazabilidad de los cálculos y facilite la comprensión del funcionamiento interno del modelo.

Sin embargo, Excel presenta limitaciones evidentes cuando el volumen de datos y la complejidad de las relaciones entre variables aumentan. En el estado actual de desarrollo, el archivo alcanza aproximadamente 200 MB de tamaño, con cerca de veinte hojas de cálculo, incluyendo tanto las hojas visibles para el usuario como las hojas auxiliares destinadas a cálculos intermedios, tablas de referencia y estructuras de decisión.

El elevado número de referencias cruzadas entre hojas, fórmulas anidadas y procesos de filtrado provoca que el archivo pierda fluidez a medida que se incrementa la cantidad de información introducida. En determinadas operaciones, como la actualización simultánea de múltiples celdas o el recálculo completo del archivo, el tiempo de respuesta puede aumentar de forma perceptible.

Desde una perspectiva práctica, esta circunstancia obliga a utilizar la herramienta con un volumen de datos razonable y a evitar modificaciones masivas simultáneas que obliguen al sistema a recalcular todos los vínculos internos. En este sentido, la estabilidad del modelo se ha priorizado frente a la incorporación de funcionalidades adicionales que hubieran incrementado aún más la carga computacional del archivo.

- **Limitación en la partición longitudinal del trazado**

El modelo realiza la partición longitudinal del trazado principalmente en función del cambio de tipo general de terreno, distinguiendo entre tramos de roca, suelo y tramos mixtos definidos mediante la longitud de transición. Esta estrategia permite representar los principales cambios de comportamiento geotécnico del terreno manteniendo un número de tramos manejable dentro del modelo.

No obstante, la herramienta no incorpora de forma explícita la presencia de estructuras geológicas singulares o fenómenos geotécnicos localizados que puedan afectar de forma significativa al comportamiento del terreno. Entre estos elementos pueden encontrarse fallas geológicas, zonas de cizalla, contactos tectónicos, diques o filones, zonas intensamente fracturadas, cavidades kársticas, bolsas de materiales alterados o niveles muy meteorizados dentro de un macizo rocoso.

Asimismo, en el caso de suelos, pueden existir situaciones geotécnicas particulares que alteren significativamente el comportamiento del terreno, como niveles orgánicos, lentes de materiales muy blandos, niveles altamente permeables con presencia de agua a presión, o zonas con suelos colapsables o expansivos. Este tipo de condiciones locales pueden generar comportamientos significativamente distintos a los del terreno circundante y, en la práctica, suelen requerir soluciones constructivas específicas.

La consideración detallada de este tipo de fenómenos requeriría un modelo geológico más complejo, capaz de incorporar información estructural y geotécnica de mayor resolución espacial. La integración de estos elementos dentro del modelo implicaría un incremento considerable en el número de variables a considerar y en la complejidad del análisis.

Por este motivo, la herramienta se ha diseñado con un enfoque orientado al predimensionamiento preliminar, en el que se representan los dominios geotécnicos principales del trazado sin modelizar de forma específica este tipo de singularidades locales. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como una primera aproximación al comportamiento del terreno, siendo necesario complementar el análisis con estudios geológicos y geotécnicos detallados durante las fases posteriores de proyecto.

- **Limitaciones en la estructuración y visualización de la información**

La cantidad de variables manejadas por la herramienta —incluyendo datos geológicos, parámetros geotécnicos, clasificaciones geomecánicas, índices de calidad del dato, recomendaciones

constructivas y resultados económicos— dificulta la posibilidad de mostrar toda la información en una única tabla de consulta.

Si se hubiese optado por concentrar todos los datos en una única hoja, el resultado habría sido una tabla extremadamente ancha, difícil de interpretar y poco manejable dentro de Excel. Para evitar este problema, la información se ha distribuido en distintas hojas especializadas, cada una dedicada a una fase del proceso de cálculo o análisis.

Esta organización mejora la claridad de cada módulo, pero implica que el usuario debe navegar entre varias hojas para consultar el origen de ciertos resultados o verificar determinados datos. Desde el punto de vista práctico, esto introduce una limitación en la visualización integrada de la información, aunque permite mantener un nivel razonable de orden y legibilidad dentro del archivo.

- **Limitación en el desarrollo de reglas técnicas y criterios de descarte**

El desarrollo del modelo se ha centrado principalmente en la integración de las clasificaciones geomecánicas y en la construcción de la matriz de compatibilidad entre resultados y soluciones constructivas. Como consecuencia, el conjunto de reglas técnicas adicionales y criterios de descarte se ha mantenido deliberadamente limitado en esta versión de la herramienta.

En la práctica, el número de criterios técnicos que podrían incorporarse a este tipo de modelo es muy amplio. Factores como la longitud total del túnel, la presencia de nivel freático, las condiciones urbanas del entorno, la disponibilidad de maquinaria, la logística de obra o las restricciones ambientales podrían integrarse como filtros adicionales en la selección de soluciones.

Sin embargo, la incorporación de un gran número de reglas en Excel plantea dificultades relacionadas con la normalización de las variables utilizadas. Diferencias de redacción, uso de mayúsculas, espacios o pequeñas variaciones en los textos introducidos pueden dificultar el reconocimiento automático de las condiciones por parte del modelo. Esto obliga a definir catálogos de variables muy estrictos, lo que incrementa notablemente la complejidad de mantenimiento del archivo.

Por este motivo, las reglas técnicas implementadas en la versión actual deben entenderse como un primer nivel de filtrado, suficiente para orientar el análisis preliminar pero no como un catálogo exhaustivo de restricciones constructivas.

- **Limitación en la evaluación simultánea de múltiples alternativas**

Una funcionalidad potencialmente muy útil desde el punto de vista profesional sería la posibilidad de comparar simultáneamente varias soluciones constructivas completas para un mismo tramo, evaluando para cada una de ellas las principales magnitudes técnicas y económicas.

Durante el desarrollo del modelo se analizó la posibilidad de incorporar esta funcionalidad mediante la matriz de compatibilidad utilizada para la selección de soluciones. Sin embargo, el entorno Excel presenta una limitación relevante en la forma en que pueden mostrarse los resultados obtenidos a partir de dichas matrices. En concreto, Excel no permite que una misma celda devuelva de forma estructurada múltiples soluciones procedentes de una tabla de reglas técnicas, salvo mediante el uso de estructuras adicionales de cálculo.

Para representar todas las soluciones compatibles identificadas por la matriz de compatibilidad sería necesario ampliar la tabla de resultados de forma que cada posible solución apareciese en una columna independiente. De este modo, si para un determinado tramo se obtuvieran, por ejemplo, cinco soluciones constructivas compatibles con las clasificaciones geomecánicas y las reglas técnicas, la tabla debería disponer de cinco columnas diferenciadas, una para cada solución posible, en lugar de una única celda que contenga un desplegable con todas las alternativas.

Una posible solución técnica consistiría en generar tablas auxiliares de cálculo —posteriormente ocultas al usuario— desde las cuales extraer los resultados mediante fórmulas de búsqueda o matrices dinámicas. Sin embargo, este enfoque incrementa de forma significativa el número de operaciones que debe realizar el archivo, lo que repercute directamente en el rendimiento general del modelo.

Esta limitación afecta a diferentes grupos de soluciones incluidos en la herramienta, como los métodos constructivos aplicables en roca y en suelos, los métodos de excavación asociados, las longitudes de avance, las medidas de presostenimiento o mejora del terreno, los sostenimientos y las configuraciones de sección de excavación. En un escenario en el que cada uno de estos elementos presentase, por ejemplo, cuatro soluciones compatibles, el modelo debería gestionar hasta treinta y dos celdas adicionales únicamente para representar todas las combinaciones posibles.

Por este motivo, se ha optado por una solución más simplificada que permite mantener la estabilidad y fluidez del modelo dentro del entorno Excel. En lugar de mostrar todas las combinaciones posibles, la herramienta presenta un número limitado de soluciones compatibles

para cada uno de los elementos analizados. En concreto, se muestran hasta dos soluciones compatibles para los métodos constructivos, métodos de excavación, presostenimientos, sostenimientos y configuraciones de sección de excavación. En el caso de las longitudes de avance, únicamente se muestra una solución compatible, ya que este valor se obtiene a partir de la compatibilidad entre las recomendaciones de las clasificaciones geomecánicas que proporcionan este tipo de indicaciones.

- **Limitaciones en la interfaz de navegación**

La herramienta incorpora en su portada y hoja de control diversos elementos visuales que indican la estructura del modelo y facilitan la identificación de las distintas hojas de trabajo. Desde el punto de vista de usabilidad, lo ideal habría sido que estos elementos funcionaran como botones interactivos capaces de redirigir automáticamente al usuario a las secciones correspondientes del archivo.

Sin embargo, la implementación de este tipo de funcionalidades habría requerido el uso de macros o scripts adicionales, lo que incrementaría la complejidad del archivo y podría generar problemas de compatibilidad o seguridad en determinados entornos de uso. Por este motivo, se ha optado por mantener una navegación manual entre hojas, apoyada en una estructura clara y organizada del archivo.

Esta limitación afecta principalmente a la ergonomía de uso, pero no al funcionamiento interno del modelo.

- **Limitaciones en la personalización de criterios por tramo**

Algunos de los parámetros de configuración de la herramienta, como los criterios de selección de rangos o los factores de dispersión utilizados en determinadas clasificaciones, se aplican de forma global a todo el modelo. Desde un punto de vista teórico, sería posible definir estos parámetros de forma específica para cada tramo analizado.

Sin embargo, incorporar ese nivel de personalización habría multiplicado el número de variables de control y aumentado considerablemente la complejidad del sistema. Por ello, se ha optado por una configuración global que mantiene la coherencia del modelo y simplifica su manejo.

En consecuencia, la herramienta permite ajustar ciertos criterios generales de análisis, pero no contempla en esta versión una parametrización completamente independiente para cada tramo del trazado.

- **Limitaciones en los sistemas de control de datos**

Aunque la herramienta incorpora diferentes mecanismos de validación de datos, especialmente en la hoja de entrada de información del trazado, no todos los controles posibles han sido implementados. Existen zonas del modelo donde sería posible incorporar verificaciones adicionales para detectar inconsistencias entre hojas o posibles cruces de información.

La implementación de estos controles avanzados implicaría aumentar considerablemente el número de fórmulas y dependencias internas, lo que afectaría nuevamente al rendimiento general del archivo. Por esta razón, se han priorizado los controles más relevantes para garantizar la coherencia básica de la información introducida, manteniendo el resto bajo supervisión directa del usuario.

- **Consideración práctica sobre el uso de la herramienta**

Más allá de las limitaciones técnicas descritas, resulta relevante establecer una serie de consideraciones prácticas relacionadas con el uso de la herramienta y con el contexto en el que esta ha sido concebida. La herramienta desarrollada no pretende sustituir el análisis geotécnico detallado ni el proceso completo de diseño de una obra subterránea, sino proporcionar un marco estructurado de apoyo a la toma de decisiones en fases preliminares de proyecto, donde la información disponible suele ser limitada y la definición de alternativas constructivas requiere integrar múltiples criterios de forma coherente.

En este sentido, el principal valor del modelo reside en su capacidad para organizar y consolidar información geotécnica heterogénea dentro de un único sistema de análisis. La herramienta permite transformar datos geológicos, parámetros geotécnicos y clasificaciones geomecánicas en un conjunto estructurado de resultados que facilitan la identificación de métodos constructivos, sostenimientos y longitudes de avance compatibles con las condiciones del terreno. Este proceso, que en la práctica suele realizarse de forma fragmentada y apoyándose en diferentes documentos técnicos o recomendaciones bibliográficas, queda aquí sistematizado mediante una lógica de cálculo transparente y trazable.

Desde el punto de vista operativo, la herramienta está especialmente orientada a situaciones donde el técnico debe analizar rápidamente diferentes tramos de un trazado subterráneo y evaluar posibles soluciones constructivas compatibles con las características del terreno. En este contexto, la estructuración por bloques desarrollada en el capítulo anterior permite seguir un flujo de trabajo

claro: introducción de datos geotécnicos, cálculo de clasificaciones, consolidación de resultados, filtrado de soluciones y estimación preliminar de magnitudes económicas.

Otra consideración relevante es que el modelo incorpora explícitamente el concepto de incertidumbre en la información geotécnica, mediante índices de completitud, trazabilidad y validez de los datos, así como a través de factores de dispersión aplicados a determinadas clasificaciones. Este enfoque reconoce que la caracterización del terreno en fases iniciales rara vez es completa y que las decisiones deben tomarse, en muchas ocasiones, con información parcial. La herramienta permite reflejar esta situación mediante intervalos de valores y rangos de decisión que ayudan a contextualizar el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos.

Asimismo, la utilización de Excel como entorno de implementación presenta ventajas relevantes desde el punto de vista práctico. Se trata de una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito de la ingeniería, lo que facilita su comprensión, adaptación y posible modificación por parte de otros técnicos. La transparencia del cálculo y la posibilidad de acceder directamente a las fórmulas utilizadas favorecen además la trazabilidad del proceso de decisión, algo especialmente importante en contextos de análisis técnico donde la justificación de los criterios adoptados resulta fundamental.

No obstante, estas ventajas deben interpretarse teniendo en cuenta las limitaciones inherentes al entorno de implementación. La herramienta no ha sido concebida como un software especializado ni como una aplicación cerrada, sino como un modelo estructurado de análisis que integra diferentes criterios técnicos dentro de un marco operativo accesible. En consecuencia, su uso debe ir siempre acompañado de la interpretación crítica del técnico responsable, que deberá valorar los resultados obtenidos en función de la información geológica disponible, las condiciones específicas del proyecto y la experiencia profesional en el diseño de obras subterráneas.

En definitiva, la herramienta debe entenderse como un instrumento de apoyo que permite ordenar el proceso de análisis, mejorar la trazabilidad de las decisiones y facilitar la comparación estructurada de soluciones, pero no como un sustituto del criterio técnico ni del análisis geotécnico detallado que debe desarrollarse en fases posteriores del proyecto.

### ***5.5. Conclusiones de la metodología implantada para el desarrollo de la herramienta de predimensionamiento y estudio de obras de desarrollo lineal subterráneas***

El desarrollo presentado en este capítulo ha permitido materializar la implantación de la herramienta propuesta dentro de un entorno digital operativo, definiendo su estructura interna, los

bloques funcionales que la componen y las reglas de decisión que gobiernan su funcionamiento. A lo largo de este proceso se han establecido los mecanismos necesarios para integrar información geotécnica, clasificaciones geomecánicas, criterios técnicos y estimaciones económicas dentro de un sistema único de análisis orientado a la selección preliminar de soluciones constructivas en obras subterráneas.

La herramienta resultante constituye un modelo estructurado que permite sistematizar un proceso de decisión que, en la práctica profesional, suele realizarse mediante la consulta dispersa de diferentes clasificaciones, recomendaciones técnicas y criterios de experiencia. Mediante la organización de la información en bloques de cálculo interconectados, el modelo facilita la transformación de datos geotécnicos en alternativas constructivas compatibles con las condiciones del terreno, aportando además mecanismos para evaluar la calidad de la información disponible y gestionar la incertidumbre asociada a las fases iniciales de proyecto.

Si bien el sistema presenta determinadas limitaciones derivadas principalmente del entorno de implementación y de las simplificaciones necesarias para mantener su operatividad, el modelo demuestra la viabilidad de integrar diferentes enfoques de clasificación geomecánica dentro de un marco de análisis común. Esta aproximación permite estructurar la toma de decisiones de forma más transparente y reproducible, contribuyendo a mejorar la trazabilidad del proceso de selección de métodos constructivos y sostenimientos.

Con la implantación del modelo y la definición de sus reglas de funcionamiento queda completada la fase de desarrollo de la herramienta. A partir de este punto, el trabajo se centra en la valoración global de los resultados obtenidos y en el análisis crítico del modelo propuesto. En el capítulo siguiente se presentan las conclusiones generales del estudio, así como las principales limitaciones identificadas y las posibles líneas de desarrollo futuro de la herramienta.

## 6. APLICACIÓN PRÁCTICA

Una vez presentada la metodología de desarrollo de la herramienta y descrito su funcionamiento interno, resulta necesario evaluar su aplicación en situaciones reales que permitan comprobar su utilidad como herramienta de apoyo al predimensionamiento de obras subterráneas de desarrollo lineal. Con este objetivo, el presente capítulo analizará un caso de estudio correspondiente a proyectos reales de túneles.

Este caso permite aplicar la herramienta desarrollada a escenarios representativos, utilizando datos reales de trazado, condiciones de terreno y estudios geotécnicos, simulando la práctica real de un proyecto. De esta forma, se pretende verificar y comparar la capacidad del modelo para procesar información disponible, generar las clasificaciones y proponer las soluciones constructivas compatibles, llegando a una situación final de discusión entre los datos presentados por el proyecto y los obtenidos con la herramienta.

Por motivos de confidencialidad asociados al proyecto utilizado como referencia, no se incluye en el presente documento datos que permitan identificar de forma directa a las empresas participantes ni la localización exacta de las infraestructuras analizadas. No obstante, se presentan todos los parámetros técnicos necesarios para reproducir el caso de análisis.

Debido al volumen de información necesario para el desarrollo del análisis y al tamaño de las tablas generadas durante el proceso de cálculo, las tablas completas se incluyen al final de documento en los anexos. A lo largo de cada apartado del capítulo se mostrará la información relevante de cada una de las fases de aplicación de la herramienta.

De esta forma, se presenta en cada apartado la información necesaria para comprender el proceso de cálculo y la obtención de resultados, sin entorpecer la lectura del documento con tablas con información repetida o de gran tamaño.

De este modo, el caso de estudio va a permitir ilustrar el procedimiento completo de utilización de la herramienta, desde la introducción de los datos iniciales hasta la obtención de las soluciones constructivas compatibles con las distintas clasificaciones analizadas. Asimismo, el análisis de estos ejemplos permitirá valorar la coherencia de los resultados obtenidos con los realmente proyectados.

En los siguientes apartados se describirá el caso de estudio y se realizará el camino completo de la herramienta, permitiendo evaluar su utilidad como instrumento de apoyo.

### **6.1. Descripción de los casos de estudio**

El primer caso de estudio analizado corresponde a un túnel perteneciente a una infraestructura ferroviaria de nueva construcción, integrada en la red ferroviaria nacional. El túnel se desarrolla en un entorno interurbano, en una zona predominantemente rural, sin afecciones urbanas directamente en superficie. Como se ha mencionado anteriormente, no se incluirán referencias directas a la ubicación que permitan conocer la ubicación exacta de la infraestructura. No obstante, se presentan todos los datos técnicos necesarios para caracterizar adecuadamente el terreno y demostrar el uso de la herramienta.

El túnel se ejecuta mediante excavación en mina utilizando un método convencional de excavación secuencial, asociado habitualmente al método NATM (New Austrian Tunnelling Method). El proceso constructivo se basa en una excavación mediante avance y destroza, con sostenimiento inicial compuesto principalmente por hormigón proyectado (gunita), bulones de anclaje y cerchas metálicas en las zonas donde la calidad del macizo lo requiere. En determinados sectores del túnel, especialmente en zonas próximas a los emboquilles o en áreas de menor calidad geomecánica, se prevé la utilización de sistemas de presostenimiento mediante paraguas de micropilotes.

El túnel presenta una longitud total aproximada de 737 m entre sus emboquilles. No obstante, el análisis desarrollado en este trabajo se centra únicamente en el tramo excavado completamente en mina, comprendido entre el PK 0+563 y el PK 1+277, lo que corresponde a una longitud aproximada de 714 m de excavación subterránea.

Desde el punto de vista geológico, el terreno atravesado por el túnel está constituido principalmente por granitos hercínicos de dos micas, característicos del macizo granítico presente en la zona. Estos materiales presentan distintos grados de meteorización y fracturación, lo que da lugar a una variabilidad significativa en las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. A lo largo del trazado se identifican diferentes grados de alteración del granito, que van desde materiales poco alterados hasta zonas fuertemente meteorizadas o alteradas.

Los estudios geológicos y geotécnicos realizados durante la fase de proyecto permiten identificar diferentes estados del macizo rocoso, entre los que se incluyen granitos poco alterados (grado II), granitos moderadamente alterados (grado III), zonas de roca muy fracturada (grado IV) y sectores donde el granito aparece intensamente alterado o descompuesto, generando materiales de tipo jabre (grado VI).

Las condiciones geotécnicas del macizo rocoso han sido caracterizadas mediante la aplicación de clasificaciones geomecánicas obtenidas a partir de la campaña de investigación geotécnica desarrollada para el proyecto. En el perfil longitudinal del túnel se identifican valores de RMR corregido comprendidos aproximadamente entre 62 y 30, lo que corresponde a macizos rocosos de calidad buena (clase II), media (clase III) y pobre (clase IV) según la clasificación de Bieniawski. Estas condiciones reflejan un macizo rocoso generalmente fracturado, con múltiples familias de discontinuidades y presencia local de material alterado o triturado.

En relación con las condiciones hidrogeológicas, la campaña geotécnica no identifica la presencia de acuíferos relevantes a lo largo del trazado del túnel. No obstante, se prevé la posible aparición de infiltraciones localizadas de agua asociadas principalmente a discontinuidades o fracturas abiertas dentro del macizo rocoso.

Desde el punto de vista geométrico, el túnel presenta una sección tipo correspondiente a una infraestructura ferroviaria, excavada mediante avance y destroza. El recubrimiento sobre la clave del túnel varía a lo largo del trazado, alcanzando valores aproximados comprendidos entre 5 m y 20 m según la posición dentro del perfil longitudinal.

La caracterización geológica y geotécnica del macizo se ha realizado a partir de una campaña de investigación que incluye sondeos mecánicos, calicatas, estaciones geomecánicas en afloramientos y métodos geofísicos complementarios. La información obtenida mediante estas investigaciones ha permitido definir las unidades geológicas presentes, caracterizar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y establecer los parámetros necesarios para la aplicación de las clasificaciones geomecánicas utilizadas en este estudio.

A partir de esta información de partida, el caso de estudio se emplea para aplicar la herramienta desarrollada en este trabajo, permitiendo evaluar su capacidad para procesar datos geológicos y geotécnicos reales y generar soluciones constructivas compatibles con las condiciones del terreno.

A partir de la información descrita anteriormente, se procederá a estructurar en los siguientes apartados los datos necesarios para aplicar la herramienta y trabajar bajo unas mismas condiciones de contorno. A partir de esta estructuración se iniciará la explicación de cada una de las fases de aplicación de la herramienta, desde la introducción de los datos hasta la obtención de las soluciones compatibles.

## **6.2. Aplicación paso a paso de la herramienta**

### **6.2.1. Datos de partida geológicos, geotécnicos y geométricos de la traza**

El primer paso para la aplicación de la herramienta consiste en la definición de los datos de partida que describen las condiciones geológicas, geotécnicas y geométricas del trazado analizado. Estos datos constituyen las condiciones de contorno necesarias para el funcionamiento del modelo, ya que permiten caracterizar el terreno atravesado por la infraestructura y establecer los parámetros iniciales sobre los que se aplicarán las clasificaciones geomecánicas y los criterios de selección de soluciones constructivas.

Los datos presentados en este apartado recogen las principales variables geológicas, geotécnicas y geométricas necesarias para la aplicación del modelo, incluyendo la identificación de los tramos del trazado, las características del terreno atravesado, las condiciones hidrogeológicas y los parámetros geométricos del túnel. A partir de esta información se realizará posteriormente la partición longitudinal del trazado y el cálculo de las diferentes clasificaciones geomecánicas incorporadas en la herramienta.

Para la obtención de esta información se han utilizado los documentos técnicos incluidos en el proyecto de referencia, principalmente los anejos geológicos y geotécnicos, los registros de sondeos, las estaciones geomecánicas y los planos de trazado y sección del túnel. A partir de esta documentación se han recopilado los datos necesarios para caracterizar el macizo rocoso atravesado por la infraestructura y las condiciones geométricas del trazado.

En este sentido, es importante diferenciar entre dos tipos de información empleada en el análisis. Por un lado, se han utilizado datos obtenidos directamente del proyecto, procedentes de los estudios geológicos y geotécnicos realizados durante la fase de investigación del terreno. Por otro lado, se han incorporado datos interpretados o estimados a partir de la información disponible, necesarios para poder aplicar de forma completa las diferentes clasificaciones geomecánicas consideradas en la herramienta.

Los datos obtenidos directamente del proyecto proceden principalmente de la documentación geológica y geotécnica asociada a la infraestructura. Entre ellos se incluyen la litología dominante del macizo rocoso, el grado de meteorización de los materiales, la descripción de las discontinuidades, la presencia de zonas alteradas, los valores de RQD obtenidos en los sondeos, los parámetros geotécnicos del terreno y la presencia de agua subterránea. Asimismo, se han utilizado

los parámetros geométricos del túnel, tales como la longitud del trazado, los puntos kilométricos de inicio y fin de excavación, los recubrimientos estimados y la sección tipo prevista en el proyecto.

Estos datos se han obtenido fundamentalmente a partir de los anejos de geología y geotecnia del proyecto, de los registros de sondeos y de las estaciones geomecánicas realizadas durante la campaña de reconocimiento del terreno. La recopilación de esta información permite establecer una primera caracterización del macizo rocoso y de las condiciones geotécnicas presentes a lo largo del trazado.

Debe señalarse que, dentro de la herramienta desarrollada, se ha definido un conjunto de litologías y unidades geológicas de referencia que permiten estructurar la información de entrada de forma homogénea. No obstante, debido a la amplia variedad de litologías y unidades geológicas que pueden aparecer en proyectos reales de obras subterráneas, no resulta posible incluir de forma exhaustiva todas las tipologías geológicas existentes.

Por este motivo, en algunos casos ha sido necesario adaptar la litología definida en el proyecto a la categoría equivalente disponible dentro de la herramienta. Esta adaptación no supone una modificación de las características geológicas del terreno, sino una simplificación controlada que permite clasificar los materiales dentro de las categorías utilizadas por el modelo para el análisis geomecánico.

Como ejemplo de esta adaptación, la litología predominante identificada en el proyecto ha sido asociada a la categoría equivalente utilizada en la herramienta. En la siguiente tabla se presenta una comparación entre la litología definida en la documentación del proyecto y la litología empleada dentro del modelo, con el fin de mostrar el proceso de equivalencia aplicado para la introducción de los datos en la herramienta.

<b>Litología proyecto</b>	<b>Descripción geológica</b>	<b>Litología herramienta</b>	<b>Unidad geológica herramienta</b>
GH <sub>2</sub> (II)	Granito poco meteorizado, macizo rocoso competente con baja fracturación y discontinuidades escasas	Granito	Macizo rocoso masivo
GH <sub>2</sub> (II–III)	Granito ligeramente meteorizado con presencia de discontinuidades y fracturación moderada	Granito	Macizo rocoso fracturado

<b>Litología proyecto</b>	<b>Descripción geológica</b>	<b>Litología herramienta</b>	<b>Unidad geológica herramienta</b>
GH <sub>2</sub> (III–IV)	Granito meteorizado con elevada fracturación y alteración parcial de las discontinuidades	Granito	Macizo rocoso fracturado
GH <sub>2</sub> (IV)	Granito muy meteorizado o parcialmente descompuesto, con pérdida significativa de resistencia	Granito	Macizo rocoso alterado
Qe	Material residual procedente de meteorización del granito	Granito	Deposito deluvial
Mezcla 40% Qe – 60% GH <sub>2</sub> (IV)	Zona de transición entre granito muy alterado y material residual granítico	Granito	Macizo rocoso alterado

Tabla 46. Comparativa entre material geológico de proyecto y utilizado la herramienta. Fuente: Elaboración propia

Además de estos datos, para poder aplicar las diferentes clasificaciones geomecánicas consideradas en la herramienta ha sido necesario interpretar algunos parámetros a partir de la información cualitativa proporcionada por el proyecto. Este proceso de interpretación no supone la invención de valores, sino la traducción de las descripciones geológicas y geomecánicas disponibles a los parámetros requeridos por cada sistema de clasificación, siguiendo los criterios establecidos en la bibliografía técnica de referencia.

Entre los parámetros interpretados se encuentran la resistencia a compresión simple del macizo rocoso, el espaciamiento medio de discontinuidades, la condición superficial de las juntas, la estructura del macizo rocoso para la estimación del índice GSI y los parámetros necesarios para la aplicación del sistema Q de Barton. Estos valores se han estimado a partir de la información contenida en las estaciones geomecánicas, los registros de sondeos, el grado de meteorización de los materiales y las descripciones de las discontinuidades presentes en el macizo.

<b>Parámetro geomecánico</b>	<b>Observación sobre su interpretación</b>
UCS estimada del macizo rocoso	Estimada a partir de la litología granítica definida en el proyecto y del grado de meteorización del macizo.

<b>Parámetro geomecánico</b>	<b>Observación sobre su interpretación</b>
Espaciamiento medio de discontinuidades	Interpretado a partir de la descripción del grado de fracturación recogida en las estaciones geomecánicas.
Condición de juntas (RMR)	Asignada según la rugosidad, alteración y continuidad de las discontinuidades descritas en las estaciones geomecánicas.
Orientación relativa de discontinuidades respecto al túnel	Determinada comparando la dirección de las familias de discontinuidades con la dirección del eje del túnel.
Estructura del macizo (GSI)	Interpretada a partir del grado de fracturación y la organización de bloques descrita en el macizo rocoso.
Condición superficial de las juntas (GSI)	Estimada según el estado de alteración y las características de las superficies de discontinuidad.
Parámetros del sistema Q (Jn, Jr, Ja, Jw, SRF)	Asignados a partir del número de familias de juntas, su estado superficial, la presencia de agua y las condiciones de cobertura del túnel descritas en el proyecto.

*Tabla 47. Criterios de interpretación de los parámetros geomecánicos del proyecto. Fuente: Elaboración propia*

Finalmente, también se han recopilado los parámetros geométricos y de trazado necesarios para la aplicación de la herramienta. Estos datos describen las características geométricas del túnel y del trazado ferroviario, incluyendo la longitud del tramo analizado, los recubrimientos existentes, la sección de excavación y las condiciones geométricas del trazado en planta y alzado.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Longitud del tramo	714 m
Recubrimiento mínimo	4 m
Recubrimiento máximo	45 m
Sección de excavación	92 m <sup>2</sup>
Tipo de sección	Bóveda
Radio de acuerdo en planta (R)	1125 m
Pendiente longitudinal	6,59 %

*Tabla 48. Datos geométricos del trazado. Fuente: Elaboración propia*

A partir de toda esta información, y con el objetivo de poder aplicar de forma homogénea las clasificaciones geomecánicas y los criterios de decisión definidos en la herramienta, se han

seleccionado una serie de parámetros que permiten configurar los modelos de cálculo y establecer los criterios de decisión del sistema. Estos parámetros constituyen las variables de entrada utilizadas por la herramienta para evaluar las condiciones geotécnicas del terreno y determinar las soluciones constructivas compatibles en cada tramo analizado.

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
L_TRANS	10 m	Longitud de transición
K_RMR	10	Factor incertidumbre RMR
K_ROMANA	10	Factor incertidumbre Romana
CRITERIO_RANGOS	CONSERVADOR	Selección de criterio para los valores de Q
CRITERIO_RANGOS_GSI	CONSERVADOR	Selección de criterio para los valores de GSI mínimos y máximos
CRITERIO_RANGOS_CLASES	CONSERVADOR	Rangos de selección para mínimos y máximos calculados para las clases

Tabla 49. Parámetros utilizados en la herramienta para la definición de los criterios de decisión. Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2. Particiones de sección obtenidas de la traza

Una vez definidos los datos de partida geológicos, geotécnicos y geométricos del trazado, el siguiente paso en la aplicación de la herramienta consiste en establecer la partición longitudinal del túnel. Esta partición permite dividir el trazado en distintos tramos homogéneos desde el punto de vista geológico y geotécnico, facilitando así la posterior aplicación de las clasificaciones geomecánicas y el análisis de soluciones constructivas compatibles.

En el presente caso de estudio se ha optado por mantener las particiones de sección definidas en el propio proyecto constructivo, con el objetivo de poder realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos mediante la herramienta desarrollada y los criterios adoptados en el proyecto original. De esta forma, se garantiza que ambos análisis se realizan sobre la misma base geométrica y geológica, permitiendo evaluar de manera más objetiva la coherencia de las soluciones propuestas.

El tramo analizado corresponde únicamente al túnel excavado en mina, comprendido entre los puntos kilométricos definidos en el proyecto para el inicio y final de la excavación subterránea. En total, los 714 metros de trazado analizados se dividen en 15 tramos diferenciados, definidos en función de las características del terreno atravesado y de las condiciones geológicas identificadas durante la fase de investigación del terreno.

En la siguiente tabla se recoge la información relevante de cada uno de estos tramos, incluyendo los principales parámetros utilizados posteriormente como datos de entrada en la herramienta desarrollada.

ID_FINAL	PK_INI_FINAL	PK_FIN_FINAL	TIPO_FINAL	LITOLOGIA	UN_GEO
1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO
2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
4	133	143	ROCA	GRANITO	DEO. DELUVIAL
5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO

Tabla 50. Datos de la partición de sección de la herramienta. Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3. Clasificaciones geomecánicas de macizo rocoso y suelos

Una vez definida la partición longitudinal del trazado y recopilados los datos de partida necesarios para el análisis, el siguiente paso en la aplicación de la herramienta consiste en el cálculo de las distintas clasificaciones geomecánicas incorporadas en el modelo. Estas clasificaciones permiten caracterizar el comportamiento del macizo rocoso frente a la excavación subterránea y constituyen la base para la posterior selección de métodos constructivos, sostenimientos y longitudes de avance compatibles con las condiciones del terreno.

La herramienta desarrollada incluye la aplicación de varias clasificaciones geomecánicas ampliamente utilizadas en el ámbito de la ingeniería de túneles, tanto para macizos rocosos como para terrenos de tipo suelo. En concreto, se han incorporado las clasificaciones RMR de Bieniawski, Q-System de Barton, GSI de Hoek y Marinos y la clasificación de Romana, cada una de las cuales

aporta una aproximación diferente al comportamiento del macizo rocoso y a las recomendaciones constructivas asociadas.

En el caso del trazado analizado en el presente estudio, todos los tramos definidos en la partición longitudinal corresponden a macizo rocoso, por lo que no existen tramos clasificados como suelo dentro del tramo excavado en mina. En consecuencia, las clasificaciones aplicadas en este apartado corresponden exclusivamente a sistemas de caracterización de macizos rocosos, mientras que las clasificaciones específicas para suelos no han sido utilizadas en este caso de estudio.

Para la obtención de estas clasificaciones se han introducido en la herramienta los distintos parámetros geomecánicos necesarios para cada sistema de clasificación. En el caso de las clasificaciones RMR de Bieniawski y Romana, el cálculo se basa en la valoración de seis parámetros principales del macizo rocoso: resistencia a compresión simple de la roca intacta, RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades, presencia de agua en el macizo y orientación de las discontinuidades respecto al túnel.

Para la clasificación Q-System de Barton, se han considerado los parámetros que definen la expresión original del sistema Q, concretamente el índice de calidad del testigo RQD, el número de familias de discontinuidades ( $J_n$ ), la rugosidad de las discontinuidades ( $J_r$ ), el grado de alteración o relleno de las juntas ( $J_a$ ), la influencia del agua en el macizo ( $J_w$ ) y el factor de reducción de esfuerzos (SRF). Estos parámetros se combinan mediante la expresión matemática del sistema Q para obtener el valor final de la clasificación.

En el caso del índice GSI, la estimación del valor se ha realizado a partir de la valoración conjunta de la estructura del macizo rocoso y de la condición superficial de las discontinuidades, parámetros que permiten situar el macizo dentro del diagrama propuesto por Hoek y Marinos y obtener un rango de valores posible para el índice GSI.

Con el objetivo de mantener la claridad del documento y evitar una excesiva extensión del capítulo, en este apartado se presentan únicamente los valores de cálculo obtenidos para cada clasificación y para cada tramo. Estos valores corresponden al resultado final utilizado por la herramienta para la comparación entre clasificaciones y la posterior selección de soluciones constructivas.

El proceso completo de cálculo, incluyendo todos los parámetros introducidos, las tablas intermedias de cálculo y la aplicación de los criterios de incertidumbre definidos en la herramienta, se recoge de forma detallada en los anexos del presente documento. En dichos anexos puede

consultarse el desarrollo completo de cada clasificación hasta llegar al valor final utilizado en el análisis.

Debe señalarse que los valores mostrados en este apartado corresponden a los valores de cálculo adoptados por la herramienta, obtenidos a partir de los intervalos mínimos y máximos determinados mediante la aplicación de los criterios definidos en la hoja de parámetros o configuración del modelo. Estos criterios permiten considerar la incertidumbre asociada a la información geológica y geotécnica disponible, generando rangos de valores posibles para determinadas clasificaciones.

De este modo, a partir de los valores mínimos y máximos obtenidos mediante la aplicación de los parámetros de incertidumbre y de los factores de dispersión definidos en la herramienta, se selecciona un valor de cálculo representativo, que es el que se muestra en las tablas de este apartado y el que posteriormente se utiliza para la comparación entre clasificaciones.

Para mostrar las posibilidades de funcionamiento de la herramienta, en el caso de la clasificación RMR de Bieniawski los valores se han obtenido mediante el cálculo directo realizado por la propia herramienta, introduciendo los distintos parámetros geomecánicos requeridos por el sistema de clasificación. De este modo, el modelo calcula automáticamente el valor de RMR para cada tramo a partir de los parámetros introducidos, aplicando posteriormente las correcciones correspondientes, como la orientación de las discontinuidades respecto al eje del túnel.

Por el contrario, en el caso de la clasificación de Romana, los valores se han introducido de forma directa, utilizando los valores ya estimados en la documentación del proyecto. Esta decisión se adopta debido a que los valores de esta clasificación se encuentran definidos de forma explícita en el proyecto de referencia, lo que permite incorporarlos directamente al modelo sin necesidad de recalcularlos a partir de los parámetros individuales del macizo rocoso.

Asimismo, los valores obtenidos mediante el cálculo realizado por la herramienta se comparan con los valores de RMR estimados en el proyecto de referencia, con el objetivo de evaluar la coherencia entre ambos resultados y analizar el grado de concordancia entre el predimensionamiento obtenido mediante la herramienta y la caracterización geomecánica utilizada en el diseño original.

De esta forma, se muestra la capacidad de la herramienta para trabajar tanto con valores calculados internamente a partir de parámetros geomecánicos, como con valores de clasificación introducidos directamente por el técnico, permitiendo adaptar el funcionamiento del modelo a la información disponible en cada fase del proyecto.

ID	RMR_CALC	Q	GSI_CALC	ROMANA_CALC	RMR_PROYECTO
1	65	1,56	55	65	57
2	81	63,75	75	81	62
3	47	0,45	40	47	45
4	15	0,05	15	15	30
5	47	0,45	40	47	45
6	81	63,75	75	81	62
7	47	0,45	40	47	45
8	15	0,05	15	15	30
9	47	0,45	40	47	45
10	51	63,75	75	51	62
11	47	0,45	10	47	45
12	15	0,05	15	15	30
13	47	0,45	40	47	45
14	79	63,75	75	79	62
15	58	1,56	55	58	57

Tabla 51. Comparativa de los resultados de las clasificaciones geomecánicas frente a la de proyecto. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la tabla que los valores de RMR obtenidos mediante la herramienta muestran una tendencia coherente con los valores estimados en proyecto, estimándose en la mayoría de los tramos dentro de unos rangos similares, lo que indica que la herramienta reproduce de manera similar la calidad del macizo.

En los tramos con mayor calidad geomecánica del macizo, como los tramos 2, 6 y 14, la herramienta obtiene valores de RMR comprendidos entre 79 y 81, mientras que el proyecto asigna valores cercanos a 62. Esta diferencia puede interpretarse como una estimación ligeramente más favorable de la calidad del macizo por parte de la herramienta, posiblemente asociada a la interpretación de los parámetros geomecánicos introducidos o a la ausencia de ciertos condicionantes locales considerados durante el diseño del proyecto.

Por el contrario, en los tramos de calidad geomecánica media, como los tramos 3, 5, 7, 9, 11 y 13, los valores obtenidos mediante la herramienta se sitúan entre 47 y 51, mientras que el proyecto asigna valores cercanos a 45. En estos casos, la concordancia entre ambos resultados es elevada, lo

que sugiere que la herramienta reproduce de forma adecuada las condiciones geomecánicas del macizo rocoso para este tipo de terrenos.

En los tramos donde el macizo presenta peor calidad geomecánica, como los tramos 4, 8 y 12, los valores de RMR calculados por la herramienta alcanzan valores cercanos a 15, mientras que el proyecto estima valores alrededor de 30. Esta diferencia puede explicarse por la forma en que se han interpretado algunos de los parámetros utilizados en el cálculo, especialmente aquellos relacionados con la condición de las discontinuidades, la fracturación del macizo o la presencia de alteración en las juntas. En este sentido, la herramienta tiende a adoptar una interpretación más conservadora del comportamiento del macizo, lo que se traduce en valores de clasificación más bajos.

Si se analizan conjuntamente las diferentes clasificaciones geomecánicas incluidas en la tabla, se observa que existe una coherencia general entre los distintos sistemas de clasificación. Los tramos que presentan valores bajos de RMR también muestran valores reducidos en el índice Q y en el índice GSI, mientras que los tramos con mejores condiciones geomecánicas presentan valores elevados en todas las clasificaciones. Esta coherencia entre sistemas indica que los parámetros geomecánicos introducidos en la herramienta describen de forma consistente el comportamiento del macizo rocoso.

Por ejemplo, los tramos con valores de Q muy bajos (0,05 – 0,45) coinciden con los tramos de menor calidad geomecánica, donde también se obtienen valores bajos de RMR y GSI. En cambio, los tramos donde el valor de Q alcanza valores elevados (63,75) corresponden a macizos rocosos de buena calidad, reflejados igualmente en los valores altos de RMR y GSI.

#### **6.2.4. Resumen y comparativa de las clasificaciones por tramo**

Una vez obtenidos los valores correspondientes a cada una de las clasificaciones geomecánicas consideradas en el apartado anterior, se procede a realizar una síntesis de los resultados para cada uno de los tramos definidos en la partición longitudinal del túnel. Este resumen permite disponer de una visión conjunta del comportamiento geomecánico del macizo rocoso a lo largo del trazado y facilita la comparación entre los distintos sistemas de clasificación utilizados.

En este apartado se presentan, para cada tramo analizado, los valores de cálculo obtenidos mediante la herramienta, así como los valores mínimos y máximos estimados a partir de los criterios de incertidumbre y dispersión definidos en la hoja de configuración del modelo. Estos rangos

permiten representar la variabilidad asociada a la información geológica y geotécnica disponible, proporcionando una estimación más realista del comportamiento del macizo rocoso.

Se muestran las clases geomecánicas correspondientes a cada clasificación, es decir, las denominaciones cualitativas asignadas por cada autor a los distintos rangos de valores obtenidos. De este modo, se incluyen las categorías de calidad del macizo rocoso asociadas a cada sistema de clasificación, tales como las clases de calidad definidas en el sistema RMR, las categorías del sistema Q de Barton, los rangos asociados al índice GSI y las clases establecidas en la clasificación de Romana.

Las clases mostradas en este apartado corresponden a las clases obtenidas directamente mediante la herramienta, a partir de los valores de cálculo utilizados en el modelo. De esta forma, se garantiza que la clasificación cualitativa del macizo rocoso es coherente con los valores empleados posteriormente en el proceso de selección de soluciones constructivas.

<b>Id</b>	<b>Clase RMR</b>	<b>Clase Q</b>	<b>Clase GSI</b>	<b>Clase ROMANA</b>
1	Clase II Buena	Mala	Buena	Clase IIB Muy Buena
2	Clase I Muy Buena	Muy Buena	Muy buena	Clase IB Muy Buena
3	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
4	Clase V Muy Mala	Extremadamente mala	Pobre	Clase VA Muy Mala
5	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
6	Clase I Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena	Clase IB Muy Buena
7	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
8	Clase V Muy Mala	Extremadamente Mala	Pobre	Clase VA Muy Mala
9	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
10	Clase III Media	Muy Buena	Muy Buena	Clase IIIA Media Buena
11	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
12	Clase V Muy Mala	Extremadamente Mala	Pobre	Clase VA Muy Mala
13	Clase III Media	Muy Mala	Regular	Clase IIIB Media Mala
14	Clase II Buena	Muy Buena	Muy Buena	Clase IIB Muy Buena
15	Clase III Media	Mala	Buena	Clase IIIA Media Buena

*Tabla 52. Clases calculadas con la herramienta de predimensionamiento. Fuente: Elaboración propia*

### 6.2.5. Reglas técnicas y solución constructiva

Una vez obtenidas las clasificaciones geomecánicas correspondientes a cada tramo del trazado, el siguiente paso en el funcionamiento de la herramienta consiste en la identificación de las soluciones constructivas compatibles con las condiciones geomecánicas del terreno. Este proceso se basa en la combinación de los resultados de las distintas clasificaciones con un conjunto de reglas técnicas de decisión, que permiten traducir la calidad del macizo rocoso en alternativas constructivas viables desde el punto de vista de la práctica habitual en ingeniería de túneles.

Para ello, la herramienta incorpora un conjunto de reglas técnicas derivadas del análisis realizado en el capítulo del estado del arte, así como de la información técnica existente en la bibliografía especializada sobre construcción de obras subterráneas de desarrollo lineal. Estas reglas recogen la relación existente entre la calidad geomecánica del terreno, los métodos constructivos habitualmente empleados y los distintos sistemas de excavación y sostenimiento asociados a cada uno de ellos.

En la práctica de la ingeniería de túneles, la selección del método constructivo no depende únicamente de la geometría del túnel o del tipo de infraestructura, sino que está fuertemente condicionada por el comportamiento geomecánico del terreno. Macizos rocosos de buena calidad permiten el empleo de métodos más directos de excavación, mientras que terrenos de peor calidad requieren técnicas más controladas o incluso soluciones constructivas diferentes que garanticen la estabilidad del terreno durante la excavación.

A partir de esta base conceptual, se han definido dentro de la herramienta una serie de rangos de aplicabilidad para los distintos métodos constructivos analizados en el estado del arte, diferenciando entre métodos aplicables en suelos y métodos aplicables en macizos rocosos. En el caso del presente estudio, dado que todos los tramos del túnel se desarrollan en macizo rocoso, únicamente se han considerado las reglas técnicas correspondientes a excavaciones en roca.

El proceso de selección de métodos constructivos se realiza mediante la aplicación de una matriz de compatibilidad, en la que se combinan los valores de cálculo obtenidos en las clasificaciones geomecánicas con los rangos de utilización definidos para cada método constructivo. De esta forma, la herramienta identifica automáticamente aquellos métodos cuya aplicación resulta compatible con los valores obtenidos para cada tramo del trazado.

En términos generales, las reglas técnicas implementadas establecen valores mínimos y máximos de calidad geomecánica para cada método constructivo considerado. Estos rangos se han definido

a partir de las recomendaciones presentes en la literatura técnica y de la experiencia recogida en proyectos reales de excavación de túneles.

En el caso analizado, la aplicación de estas reglas técnicas conduce a la identificación de tres posibles métodos constructivos para los tramos del túnel estudiado, en función de la calidad geomecánica del macizo rocoso obtenida mediante las clasificaciones:

- Método NATM (Nuevo Método Austriaco), asociado a macizos rocosos de calidad media, en los que resulta necesario un control continuo de la excavación y un sostenimiento adaptativo que permita movilizar la capacidad resistente del terreno.
- Excavación mediante perforación y voladura, adecuada para macizos rocosos de buena calidad, donde la estabilidad del frente y del contorno excavado permite la aplicación de métodos de excavación más directos.
- Método Cut and Cover, aplicable en situaciones donde la calidad del macizo o las condiciones superficiales del terreno hacen recomendable una excavación desde superficie, generalmente asociada a macizos de baja calidad geomecánica o zonas muy alteradas cercanas a superficie.

Una vez identificado el método constructivo compatible con cada tramo, la herramienta aplica un segundo nivel de reglas técnicas que permiten definir los aspectos específicos de la excavación, tales como el método de excavación propiamente dicho, la sección tipo de avance, los sistemas de sostenimiento, las posibles medidas de presostenimiento o mejora del terreno y las longitudes de avance recomendadas.

Estas reglas técnicas reflejan la práctica habitual en la construcción de obras subterráneas. De este modo, cada método constructivo se asocia a un conjunto de soluciones técnicas coherentes, que incluyen:

- Métodos de excavación, tales como excavación mediante perforación y voladura, excavación mecanizada o excavación mediante medios mecánicos.
- Secciones tipo de excavación, como avance en sección completa, avance en calota y destroza o excavación por fases.
- Sistemas de sostenimiento, incluyendo hormigón proyectado, bulonado, cerchas metálicas u otras soluciones combinadas.
- Medidas de presostenimiento o mejora del terreno, como paraguas de micropilotes, inyecciones o refuerzos del frente de excavación.

- Longitudes de avance, definidas mediante rangos mínimos y máximos compatibles con la calidad geomecánica del terreno.

<b>Id</b>	<b>Método</b>	<b>Met. EXC</b>	<b>Sección</b>	<b>Long. Avance</b>	<b>Sostenimiento</b>
1	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1-4	Horm. Proy
2	Perf y Volad.	Perf y Voladura	Sección completa	5	Horm. Proy
3	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
4	Cut & Cover	Excavación abierta	Sección completa	0,5-1	Horm. Proy
5	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
6	Perf y Volad.	Perf y Voladura	Sección completa	5	Horm. Proy
7	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
8	Cut & Cover	Excavación abierta	Sección completa	0,5-1	Horm. Proy
9	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
10	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
11	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
12	Cut & Cover	Excavación abierta	Sección completa	0,5-1	Horm. Proy
13	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-2	Horm. Proy
14	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1-5	Horm. Proy
15	NATM	Perf y Voladura	Calota y destroza	1,5-3	Horm. Proy

*Tabla 53. Resultados obtenidos de la herramienta. Fuente: Elaboración propia*

Debe señalarse que, en condiciones reales de proyecto, la combinación de estos elementos puede dar lugar a un número elevado de alternativas constructivas posibles. Sin embargo, debido a las limitaciones del entorno de desarrollo utilizado para la herramienta, especialmente en lo referente a la gestión de múltiples combinaciones dentro del entorno Excel, el modelo se ha diseñado para mostrar únicamente dos soluciones constructivas compatibles para cada caso.

Esta simplificación se adopta con el objetivo de garantizar la estabilidad y el correcto funcionamiento de la herramienta, evitando la generación de un número excesivo de combinaciones que dificultaría tanto la gestión de la información como la interpretación de los resultados.

Asimismo, las reglas técnicas implementadas en el modelo corresponden a las soluciones más utilizadas en la práctica habitual de la ingeniería de túneles, permitiendo representar las alternativas constructivas más realistas en función de la calidad del terreno. El conjunto completo de reglas

técnicas consideradas, incluyendo todas las combinaciones posibles entre métodos constructivos, sistemas de excavación, sostenimientos y presostenimientos, se recoge de forma detallada en los anexos del presente documento.

Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos mediante la herramienta con la solución finalmente adoptada en el proyecto de referencia, se incluye a continuación la solución constructiva prevista en el proyecto para el túnel analizado. Esta información permite evaluar posteriormente el grado de concordancia entre las alternativas propuestas por la herramienta y la solución realmente proyectada. La excavación del túnel se planteó mediante método convencional en mina, utilizando excavación por perforación y voladura y un sistema de sostenimiento basado en la aplicación de hormigón proyectado, bulonado del macizo rocoso y cerchas metálicas en los tramos de menor calidad geomecánica, complementado en zonas singulares con medidas de presostenimiento como paraguas de micropilotes en los emboquilles.

<b>Id</b>	<b>Método</b>	<b>Met. EXC</b>	<b>Sostenimiento</b>
1	NATM	Perf y Voladura	IV
2	NATM	Perf y Voladura	I
3	NATM	Perf y Voladura	II
4	NATM	Excavación abierta	III
5	NATM	Perf y Voladura	II
6	NATM	Perf y Voladura	I
7	NATM	Perf y Voladura	II
8	NATM	Excavación abierta	III
9	NATM	Perf y Voladura	II
10	NATM	Perf y Voladura	I
11	NATM	Perf y Voladura	II
12	NATM	Excavación abierta	III
13	NATM	Perf y Voladura	II
14	NATM	Perf y Voladura	I
15	NATM	Perf y Voladura	IV

*Tabla 54. Soluciones constructivas proyectadas. Fuente: Elaboración propia*

Los sostenimientos planteados en el proyecto son los siguientes:

- Sostenimiento I: Tramos con  $RMR > 55$ , con una longitud de avance de 4 metros mediante explosivos. El sostenimiento en fase de avance se realizará con la siguiente secuencia:

- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
- Bulones de 4 metro de longitud, en una malla de 2x2.
- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 10 centímetros de espesor mínimo, en bóveda y paramentos.
- El arranque en fase de destroza se realizará, análogamente, mediante explosivos, una vez que la velocidad de convergencia de las estaciones colocadas en el avance sea menor de 0,01 mm/día.

La longitud de pase para la destroza será de 6 metros. El sostenimiento en fase de avance se realizará con la siguiente secuencia:

- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
- Colocación de bulones continuidad de la cuadrícula de avance
- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 10 centímetros de espesor mínimo, en hastiales
- **Sostenimiento II:** Tramos con  $55 > RMR > 40$ , con una longitud de avance de 3 metros mediante explosivos. El sostenimiento en fase de avance se realizará con la siguiente secuencia:
  - Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
  - Bulones de 4 metro de longitud, en una malla de 2x1,5.
  - Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 15 centímetros de espesor mínimo, en bóveda y paramentos.
  - El arranque en fase de destroza se realizará, análogamente, mediante explosivos, una vez que la velocidad de convergencia de las estaciones colocadas en el avance sea menor de 0,01 mm/día.

La longitud de pase para la destroza será de 5 metros. El sostenimiento en fase de avance se realizará con la siguiente secuencia:

- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
- Colocación de bulones continuidad de la cuadrícula de avance

- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 15 centímetros de espesor mínimo, en hastiales
- Sostenimiento III: Tramos con  $RMR < 40$ , con una longitud de avance de 1 metros mediante explosivos y medios mecánicos, con la siguiente secuencia:
  - Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
  - Cerchas tipo THN-29 cada 1 metro espaciadas longitudinalmente y arriostradas entre sí.
  - Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 20 centímetros de espesor mínimo, en bóveda y paramentos

La longitud de pase para la destroza será de 2 metros. El sostenimiento en fase de avance se realizará con la siguiente secuencia:

- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 5 centímetros de espesor mínimo.
- Recalce de las cerchas colocadas en el avance
- Proyección de una capa de sellado con hormigón H/MP/30/III, reforzado con fibras de 20 centímetros de espesor mínimo, en hastiales
- Sostenimiento IV: Para los tramos próximos al emboquille.

A la hora de comparar los resultados obtenidos en la herramienta frente al proyecto la Tabla 53 recoge las soluciones constructivas obtenidas mediante la herramienta desarrollada, mientras que la Tabla 54 presenta las soluciones adoptadas en el proyecto de referencia para cada uno de los tramos del túnel. La comparación entre ambos conjuntos de resultados permite evaluar el grado de concordancia entre las decisiones tomadas durante el desarrollo del proyecto y las alternativas propuestas por la herramienta a partir de las clasificaciones geomecánicas calculadas.

En primer lugar, se observa que el método constructivo predominante en ambos casos es el método convencional NATM, lo cual resulta coherente con la naturaleza del macizo rocoso atravesado por el túnel. La herramienta propone NATM en la mayoría de los tramos analizados, coincidiendo con el criterio adoptado en el proyecto, donde el túnel se plantea de forma general mediante excavación en mina con sostenimiento progresivo.

Sin embargo, la herramienta identifica algunos tramos donde propone métodos alternativos, principalmente Cut & Cover, en aquellos casos en los que la calidad geomecánica estimada del macizo es más baja o se encuentra próxima a zonas superficiales.

Esta solución que se plantea se debe a la menor calidad del macizo rocoso en ese punto, pero desde el punto de vista práctico, dada la cobertura existente, alrededor de 30-40 metros no es viable, siendo más práctico lo propuesto en proyecto, manteniendo el proceso constructivo con un sostenimiento mayor.

La otra diferencia radica en la elección de la perforación y voladura como método constructivo. Se da en los puntos con una mayor calidad del macizo.

Estas diferencias frente al proyecto vienen dadas por las reglas técnicas que rigen la herramienta, dado que el NATM puede ser utilizado en un amplio rango de calidades, junto con otros métodos como la voladura o sostenimientos de mayor envergadura. En caso de haber ampliado el rango de acción de este método constructivo, hubiese abarcado un rango el cual sería la única solución viable compatible con todos los resultados obtenidos en las clasificaciones.

En lo que respecta al método de excavación, tanto la herramienta como el proyecto coinciden mayoritariamente en la utilización de perforación y voladura para los tramos excavados en roca mediante método convencional. Esta coincidencia es especialmente significativa en los tramos donde el macizo presenta mejores condiciones geomecánicas, ya que en estos casos la excavación mediante explosivos permite obtener mayores rendimientos manteniendo condiciones adecuadas de estabilidad.

Otro aspecto relevante de la comparación es la configuración de la sección de excavación. La herramienta propone mayoritariamente excavación mediante calota y destroza, lo cual es una práctica habitual en el método NATM para macizos de calidad media o variable, ya que permite controlar las deformaciones del terreno y adaptar el sostenimiento a las condiciones reales del macizo. Aunque el proyecto no detalla explícitamente en la tabla la configuración de sección, la secuencia constructiva descrita en los sostenimientos indica igualmente una ejecución por fases, lo que sugiere que el planteamiento constructivo es conceptualmente equivalente.

En cuanto a las longitudes de avance, la herramienta propone valores comprendidos generalmente entre 1 y 3 metros, en función de la calidad geomecánica del terreno. Estos valores son inferiores a las longitudes de pase definidas en el proyecto, donde se establecen avances de 4 metros en macizos de buena calidad, 3 metros en macizos de calidad media y aproximadamente 1 metro en

los tramos de peor calidad geomecánica. Aunque las longitudes propuestas por la herramienta tienden a ser ligeramente más conservadoras, se mantienen dentro de rangos técnicamente razonables para excavaciones mediante NATM.

Respecto al sistema de sostenimiento, la herramienta identifica como solución principal la aplicación de hormigón proyectado, lo que coincide plenamente con el planteamiento del proyecto. En este último, el sostenimiento se basa en una combinación de hormigón proyectado reforzado con fibras, bulonado del macizo rocoso y cerchas metálicas en los tramos de menor calidad, configurando un sistema de sostenimiento progresivo característico del método NATM.

La principal diferencia entre ambos enfoques radica en el nivel de detalle del sostenimiento. Mientras que el proyecto define varios tipos de sostenimiento diferenciados (I, II, III y IV) en función del valor de RMR y de las condiciones del terreno, la herramienta propone una solución más simplificada basada en la utilización general de hormigón proyectado como elemento principal de estabilización. Esta simplificación se debe al carácter preliminar del modelo, orientado al predimensionamiento de soluciones constructivas, más que al diseño detallado del sostenimiento.

En términos globales, el análisis comparativo muestra una alta correspondencia entre las soluciones obtenidas mediante la herramienta y las soluciones adoptadas en el proyecto de referencia. Las principales decisiones constructivas, como el empleo del método NATM, la excavación mediante perforación y voladura, la utilización de hormigón proyectado como sistema de sostenimiento y la excavación abierta en determinados tramos superficiales, coinciden en ambos casos.

Las diferencias observadas se relacionan principalmente con el nivel de detalle del diseño constructivo, ya que el proyecto incorpora una definición más precisa de los sostenimientos y de las secuencias de excavación, mientras que la herramienta se centra en identificar alternativas técnicamente viables a partir de las condiciones geomecánicas del terreno

#### **6.2.6. Análisis económico de las partidas de obras subterráneas de desarrollo lineal**

El último paso dentro de la aplicación de la herramienta corresponde a la estimación económica preliminar de las soluciones obtenidas. Este módulo no pretende sustituir un presupuesto detallado de obra, sino proporcionar una aproximación económica inicial que permita valorar el orden de magnitud de las soluciones constructivas propuestas.

En el caso del proyecto utilizado como referencia, la información económica disponible se limita al resumen de capítulos del presupuesto, sin disponer de los cuadros de precios unitarios ni de las mediciones detalladas asociadas a cada unidad de obra. Esta limitación impide realizar una

comparación económica directa entre el proyecto y los resultados obtenidos mediante la herramienta.

Por este motivo, el módulo económico desarrollado dentro de la herramienta se basa en la estimación de variables fundamentales que influyen de forma significativa en el coste de ejecución de un túnel excavado mediante métodos convencionales.

Como punto de partida, y en base a la información generada por la propia herramienta, se obtienen para cada tramo la sección de excavación, expresada en metros cuadrados, y el perímetro de excavación. En el caso analizado, la sección se considera continua a lo largo del trazado. Estos parámetros constituyen la base geométrica para el cálculo de las mediciones.

El volumen de excavación se calcula a partir de la sección tipo del túnel y la longitud de cada tramo, obteniendo así una estimación del volumen total de material que debe ser extraído durante el proceso de excavación. Esta magnitud constituye uno de los parámetros fundamentales para evaluar los costes asociados tanto a la excavación como a la gestión del material excavado.

En el caso del sostenimiento mediante hormigón proyectado, el modelo permite al técnico introducir el espesor estimado de hormigón proyectado que se considere necesario en función de las condiciones geomecánicas del terreno. A partir de este valor y de la geometría de la sección excavada, la herramienta calcula el volumen aproximado de hormigón requerido para el sostenimiento del túnel.

Adicionalmente, el modelo incorpora la definición de parámetros de ejecución, tales como la longitud de pase seleccionada —comprendida dentro de los rangos establecidos por la herramienta— y el número de ciclos de trabajo previstos por jornada, lo que permite estimar el avance diario en metros.

Por otro lado, la estimación del coste asociado a la maquinaria se basa en la definición del ciclo de avance de excavación, que debe ser introducido por el técnico en función de las condiciones de trabajo previstas. Este ciclo incluye las principales fases del proceso constructivo, tales como:

- Perforación y voladura o excavación mecánica
- Retirada del material excavado
- Aplicación del sostenimiento en fase de avance
- Ejecución de la destroza
- Aplicación del sostenimiento correspondiente

- Preparación del siguiente ciclo de excavación en la calota

A partir de la definición de estos parámetros y del avance diario estimado, es posible determinar la duración de la excavación en cada tramo, lo que permite aproximar el coste asociado al uso de maquinaria y equipos de obra.

A su vez, mediante la introducción del espesor de hormigón proyectado y del número de bulones por metro lineal, la herramienta permite obtener las mediciones completas de sostenimiento, incluyendo la superficie a sostener, el volumen de hormigón proyectado y el número total de bulones necesarios en cada tramo.

Conjuntamente, los datos geométricos y de ejecución permiten definir las mediciones de excavación y sostenimiento por tramo, incluyendo el volumen de excavación, la superficie de sostenimiento y el volumen de hormigón proyectado.

A partir de estas mediciones y de la asignación de costes unitarios —coste por metro cúbico de excavación, coste por metro cúbico de hormigón proyectado y coste unitario de bulón— se obtienen los costes asociados a cada tramo.

Finalmente, el modelo proporciona indicadores económicos de síntesis, como el coste total por tramo, el coste por metro lineal y la duración estimada de la excavación, facilitando la comparación entre distintas soluciones constructivas.

De esta manera, aunque el modelo no sustituye a un presupuesto detallado de proyecto, sí permite obtener una estimación preliminar de las principales magnitudes económicas, lo que resulta especialmente útil en fases tempranas de diseño o en estudios comparativos entre distintas alternativas constructivas.

#### **6.2.7. Exposición de resultados**

Una vez completadas todas las fases de cálculo de la herramienta, los resultados obtenidos se presentan mediante un formato de hoja resumen, diseñado para facilitar la interpretación de la información generada por el modelo y permitir una visualización clara de los principales parámetros del análisis.

Este formato integra en una única vista los resultados más relevantes del estudio realizado, estructurando la información en tres bloques principales.

En primer lugar, se muestra la partición longitudinal del trazado, donde se representan los distintos tramos definidos a lo largo del túnel. Esta partición permite identificar la distribución de las condiciones geológicas y geotécnicas a lo largo del trazado, así como los cambios de comportamiento del terreno considerados en el análisis.

En segundo lugar, se presentan los valores de cálculo obtenidos para cada una de las clasificaciones geomecánicas utilizadas, incluyendo tanto los valores numéricos como la denominación de las clases geomecánicas asignadas por cada autor. De este modo, es posible visualizar de forma directa la caracterización geomecánica del macizo rocoso en cada tramo del túnel.

Por último, para cada uno de los tramos definidos se muestran las soluciones constructivas seleccionadas por la herramienta, incluyendo:

- El método constructivo propuesto
- El método de excavación asociado
- La longitud de avance recomendada
- Las posibles medidas de presostenimiento o mejora del terreno
- Sistema de sostenimiento previsto

Este formato de presentación permite disponer de una visión global del trazado y de las soluciones constructivas asociadas a cada tramo, facilitando la comparación entre alternativas y la interpretación de los resultados obtenidos.

Además, la hoja de resultados ha sido diseñada de forma que pueda exportarse fácilmente a otros formatos, lo que permite su utilización como documento de apoyo en informes técnicos, estudios preliminares o presentaciones de proyecto. De este modo, la herramienta no solo actúa como un sistema de cálculo, sino también como un instrumento de síntesis y comunicación de resultados dentro del proceso de análisis y predimensionamiento de obras subterráneas.

### ***6.3. Discusión de resultados***

La aplicación de la herramienta desarrollada a un caso real de túnel permite analizar de forma crítica su comportamiento como instrumento de apoyo al predimensionamiento de obras subterráneas. A lo largo de los apartados anteriores se ha presentado el proceso completo de utilización del modelo, desde la introducción de los datos de partida hasta la obtención de las soluciones constructivas compatibles con las condiciones geomecánicas del terreno. En este apartado se discuten los resultados obtenidos, valorando su coherencia técnica, su relación con las decisiones adoptadas en

el proyecto de referencia y las implicaciones que estos resultados tienen para el uso práctico de la herramienta.

En el ámbito profesional de la ingeniería civil, la calidad de la información geológica y geotécnica disponible constituye uno de los factores más determinantes para el diseño de obras subterráneas. Disponer de una campaña de reconocimiento adecuada y de anejos geológicos y geotécnicos bien elaborados permite caracterizar con mayor precisión el comportamiento del terreno, reduciendo la incertidumbre asociada al diseño y mejorando la optimización de las soluciones constructivas adoptadas. En el caso analizado, los datos introducidos en la herramienta proceden en parte de resultados obtenidos mediante ensayos geotécnicos recogidos en el proyecto, mientras que otros parámetros han sido estimados a partir de la interpretación de la información disponible en la documentación técnica. Este procedimiento reproduce de forma razonable el contexto habitual en fases preliminares de proyecto, donde no siempre se dispone de todos los parámetros necesarios para aplicar directamente las clasificaciones geomecánicas. Al comparar los valores obtenidos mediante la herramienta con los valores empleados en el proyecto, se observa que las diferencias más significativas aparecen en los extremos de calidad geomecánica del macizo, mientras que en los tramos de calidad media los resultados presentan una mayor concordancia. Este comportamiento resulta lógico, ya que las clasificaciones geomecánicas tienden a ser más sensibles a pequeñas variaciones en los parámetros cuando el macizo presenta condiciones muy favorables o desfavorables.

A pesar de estas diferencias puntuales, el comportamiento general del modelo confirma que la herramienta es capaz de reproducir de forma razonable la calidad geomecánica del terreno, lo que constituye una condición fundamental para que el resto de los módulos del sistema funcione correctamente. En este sentido, el uso simultáneo de varias clasificaciones geomecánicas aporta una ventaja significativa frente a los enfoques tradicionales, en los que habitualmente se trabaja con una única clasificación. La comparación entre diferentes sistemas permite obtener una visión más completa del comportamiento del macizo rocoso y reduce el riesgo de tomar decisiones basadas en una única interpretación del terreno.

En lo que respecta a la selección de métodos constructivos, los resultados obtenidos por la herramienta muestran una elevada coherencia con las soluciones adoptadas en el proyecto de referencia. La mayoría de los tramos analizados son clasificados por la herramienta como adecuados para excavación mediante método convencional, concretamente mediante el método NATM. Esta elección coincide con la solución finalmente adoptada en el proyecto, lo que confirma que los

criterios de decisión implementados en la herramienta son consistentes con la práctica habitual en ingeniería de túneles. No obstante, debe señalarse que el conjunto de reglas técnicas incluidas en el modelo puede ampliarse de forma significativa. A medida que se incorporen nuevas reglas técnicas o criterios de decisión, el abanico de soluciones constructivas disponibles podrá ampliarse, permitiendo al técnico disponer de un mayor número de alternativas entre las que seleccionar. Del mismo modo, el ajuste de los rangos de aplicabilidad de dichas reglas permitirá afinar la selección de soluciones en función de la experiencia acumulada o de las características específicas de cada proyecto.

Otro aspecto destacable del análisis es la coherencia observada en los métodos de excavación propuestos por la herramienta. En los tramos excavados en roca mediante método convencional, la herramienta propone mayoritariamente excavación mediante perforación y voladura, lo cual coincide con el método utilizado en el proyecto de referencia. Este resultado refleja adecuadamente la relación existente entre la calidad geomecánica del macizo rocoso y la elección del método de excavación, confirmando que las reglas técnicas implementadas en el modelo capturan correctamente los criterios utilizados habitualmente en la práctica profesional.

En cuanto a las longitudes de avance, los valores obtenidos mediante la herramienta resultan coherentes con las recomendaciones recogidas en las clasificaciones geomecánicas utilizadas, particularmente en las propuestas de Romana y Bieniawski, donde se establecen rangos orientativos de avance en función de la calidad del macizo rocoso. No obstante, en la práctica profesional estas longitudes de avance suelen ajustarse también en función de la observación directa del comportamiento del terreno durante la excavación, así como de la experiencia del equipo técnico responsable de la obra. En muchos casos, el refuerzo de los sistemas de sostenimiento o la mejora de las condiciones de trabajo permite aumentar ligeramente las longitudes de avance respecto a las recomendaciones iniciales, con el objetivo de mejorar los rendimientos de excavación manteniendo condiciones adecuadas de seguridad y estabilidad.

En relación con el sistema de sostenimiento, la herramienta identifica correctamente el uso del hormigón proyectado como elemento principal de estabilización del contorno excavado. Esta solución coincide plenamente con el planteamiento del proyecto, en el que el sostenimiento se basa en la aplicación de hormigón proyectado reforzado con fibras, combinado con bulonado del macizo rocoso y, en los tramos de menor calidad, con la incorporación de cerchas metálicas. La principal diferencia entre ambos enfoques radica en el nivel de detalle del diseño del sostenimiento. Mientras

que el proyecto define diferentes tipos de sostenimiento en función de los valores de RMR, la herramienta presenta una solución más simplificada orientada al predimensionamiento preliminar.

El módulo económico incorporado en la herramienta tiene como objetivo proporcionar una estimación rápida de las magnitudes económicas más relevantes asociadas a la ejecución del túnel. Este módulo no pretende sustituir a un presupuesto detallado de proyecto, sino permitir obtener una primera aproximación del orden de magnitud de los costes asociados a la excavación. En este caso, el análisis se ha centrado en tres de las partidas más significativas de una obra subterránea: el volumen de roca excavada, el volumen de hormigón proyectado utilizado en el sostenimiento y el coste asociado a la maquinaria empleada durante la excavación. De este modo, el modelo permite al técnico obtener una estimación rápida de las principales magnitudes económicas, útil para comparar alternativas constructivas o valorar la viabilidad preliminar de una solución.

Desde una perspectiva global, los resultados obtenidos muestran que la herramienta es capaz de integrar información geológica, geotécnica y constructiva en un único modelo de análisis, generando soluciones constructivas coherentes con las decisiones adoptadas en un proyecto real. La correspondencia observada entre los resultados de la herramienta y las soluciones proyectadas refuerza la idea de que este tipo de herramientas puede resultar de gran utilidad en las fases preliminares de diseño de obras subterráneas.

Además, el modelo permite estructurar el proceso de toma de decisiones de forma sistemática, facilitando la comparación entre diferentes clasificaciones geomecánicas y proporcionando una base objetiva para la selección de soluciones constructivas. En este sentido, la herramienta no pretende sustituir la experiencia del técnico ni el análisis detallado de cada proyecto, sino ofrecer un instrumento de apoyo que permita orientar el proceso de predimensionamiento y explorar de forma rápida distintas alternativas constructivas.

En conjunto, el análisis realizado confirma que la herramienta desarrollada constituye un sistema capaz de reproducir, con un grado razonable de precisión, los criterios técnicos utilizados en el diseño de túneles excavados mediante métodos convencionales. Este resultado valida el enfoque adoptado en el desarrollo del modelo y demuestra su potencial como herramienta de apoyo para el estudio preliminar de obras subterráneas de desarrollo lineal.

#### ***6.4. Conclusiones del caso de estudio***

La aplicación de la herramienta desarrollada al caso de estudio ha permitido evaluar su comportamiento en un escenario real de diseño de túneles y valorar su utilidad como instrumento

de apoyo en fases preliminares de proyecto. A partir de los resultados obtenidos, se constata que la herramienta es capaz de integrar información geológica, geotécnica y geométrica del trazado, transformándola en una caracterización geomecánica coherente del macizo rocoso a lo largo del túnel.

El uso combinado de diferentes sistemas de clasificación permite disponer de una visión más completa del comportamiento del terreno y facilita la comparación entre distintos enfoques de análisis. La comparación con los valores empleados en el proyecto de referencia muestra una coincidencia razonable en la tendencia general de los resultados, especialmente en tramos de calidad media del macizo rocoso. Las principales diferencias se concentran en los extremos de calidad geomecánica, lo cual es coherente con la sensibilidad de estas clasificaciones a pequeñas variaciones en los parámetros de entrada cuando la información es parcialmente interpretada.

En relación con las soluciones constructivas, la herramienta ha sido capaz de identificar alternativas compatibles con las condiciones geomecánicas del trazado, obteniendo en la mayoría de los tramos soluciones equivalentes a las adoptadas en el proyecto. El predominio de métodos convencionales de excavación en roca, junto con el empleo de perforación y voladura y sostenimiento mediante hormigón proyectado y bulonado, confirma que los criterios técnicos incorporados en el modelo reproducen adecuadamente las prácticas habituales en el diseño de túneles

Las longitudes de avance propuestas se sitúan dentro de rangos coherentes con las recomendaciones de las clasificaciones utilizadas. No obstante, estos valores deben interpretarse como orientativos, ya que en fase de ejecución suelen ajustarse en función de la observación directa del terreno y de la experiencia del equipo técnico.

Por otra parte, el módulo económico desarrollado dentro de la herramienta permite estimar de forma preliminar las principales magnitudes asociadas a la ejecución del túnel. A partir de los volúmenes de excavación, las necesidades de sostenimiento y los parámetros de ejecución definidos, se obtienen mediciones y costes aproximados que permiten evaluar el orden de magnitud de las soluciones propuestas. Los resultados económicos se expresan mediante unidades representativas como €/m<sup>3</sup> de excavación, €/m<sup>3</sup> de hormigón proyectado, €/ml de túnel y €/m<sup>2</sup> de superficie de sostenimiento, facilitando la comparación entre tramos y alternativas.

Asimismo, la herramienta incorpora una estimación temporal del proceso constructivo, calculando la duración de la excavación en función del avance diario definido, lo que permite expresar los

resultados en unidades de tiempo (días) y relacionarlos directamente con los costes asociados a maquinaria y ejecución.

El caso de estudio pone de manifiesto la importancia de disponer de información geológica y geotécnica fiable, ya que la calidad de los resultados depende directamente de la precisión de los datos de entrada. En este sentido, la herramienta no sustituye el criterio técnico, sino que lo complementa, proporcionando una base estructurada que permite reducir la incertidumbre y mejorar la toma de decisiones en las fases iniciales del proyecto.

## 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El desarrollo del presente trabajo ha permitido analizar en profundidad el estado del arte relacionado con la caracterización geomecánica de terrenos y la selección de métodos constructivos en obras subterráneas, así como diseñar e implementar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en la integración de diferentes clasificaciones geomecánicas y criterios técnicos de selección. A lo largo de los capítulos anteriores se ha abordado, en primer lugar, el estudio de los fundamentos geotécnicos y geomecánicos que condicionan el comportamiento del terreno frente a la excavación subterránea, analizando las principales clasificaciones utilizadas en ingeniería y los métodos constructivos habitualmente empleados en este tipo de obras. Posteriormente, se ha desarrollado una metodología estructurada que permite transformar la información geológica y geotécnica disponible en un conjunto de alternativas constructivas compatibles con las características del terreno, materializada finalmente mediante la implantación de una herramienta digital orientada al análisis preliminar de proyectos.

El presente capítulo tiene como objetivo sintetizar los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y analizando las principales aportaciones realizadas. Asimismo, se examinan las limitaciones identificadas durante el desarrollo del estudio y se plantean posibles líneas de evolución futura que permitan ampliar las capacidades de la herramienta propuesta.

Para ello, el capítulo se estructura en cuatro apartados principales. En primer lugar, se presentan las conclusiones generales del trabajo, donde se resumen los principales resultados obtenidos y la relevancia de la metodología desarrollada. A continuación, se analiza la validación de los objetivos planteados al inicio del estudio, evaluando el grado en que estos han sido alcanzados a lo largo del desarrollo del proyecto. Posteriormente, se exponen las limitaciones del estudio, identificando aquellos aspectos que condicionan el alcance de la herramienta o del propio trabajo realizado. Finalmente, se presentan las posibles líneas de desarrollo y aplicaciones futuras, donde se plantean mejoras potenciales y escenarios de evolución que podrían ampliar el uso de la herramienta en contextos profesionales o de investigación.

### ***7.1. Conclusiones generales***

El desarrollo de obras subterráneas constituye uno de los ámbitos más complejos de la ingeniería civil, debido a la incertidumbre inherente al comportamiento del terreno y a la gran cantidad de variables que intervienen en su diseño. En las fases iniciales del proyecto, esta incertidumbre se ve

acentuada por la limitada información geotécnica disponible, lo que obliga a definir soluciones constructivas preliminares con un conocimiento incompleto del macizo.

En este contexto, el presente trabajo identifica un vacío metodológico entre la caracterización geotécnica del terreno y el diseño detallado de las obras subterráneas. Aunque existen herramientas avanzadas para el cálculo estructural y el desarrollo del proyecto una vez definida la solución, no se dispone habitualmente de herramientas que apoyen de forma sistemática el predimensionamiento en fases preliminares.

Para dar respuesta a esta necesidad, se ha desarrollado una herramienta que permite integrar datos geológicos, geotécnicos y geométricos del trazado, transformándolos en un conjunto estructurado de alternativas constructivas compatibles con las condiciones del terreno. El modelo no pretende definir una solución única, sino orientar al técnico en la identificación de opciones viables en función de la información disponible en cada fase del proyecto.

Uno de los aspectos más relevantes del trabajo es la integración de diferentes clasificaciones geomecánicas dentro de un mismo sistema de análisis, como RMR, Q de Barton, GSI y la clasificación de Romana. Este enfoque permite comparar los resultados obtenidos por cada metodología y seleccionar aquellas soluciones constructivas que presentan mayor grado de coincidencia, aumentando así la robustez de las decisiones adoptadas.

Asimismo, la herramienta incorpora el concepto de incertidumbre geotécnica, permitiendo trabajar con rangos de valores y evaluar la calidad de la información mediante indicadores de completitud, trazabilidad y validez. De este modo, no solo se obtienen resultados, sino que se contextualiza su fiabilidad.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo estructura un proceso que integra la caracterización del terreno, el cálculo de clasificaciones, la consolidación de resultados y la selección de soluciones mediante matrices de compatibilidad. Este planteamiento mejora la trazabilidad del proceso de decisión y refuerza la coherencia entre los datos de partida y las soluciones propuestas.

En conjunto, los resultados demuestran que es posible sistematizar el predimensionamiento de obras subterráneas de desarrollo lineal mediante una herramienta que integra información geotécnica y criterios técnicos en un marco estructurado. Sin sustituir el análisis detallado ni el diseño definitivo, la herramienta constituye un apoyo eficaz para la toma de decisiones en fases iniciales, reduciendo la incertidumbre y facilitando la selección de alternativas constructivas coherentes.

### **7.2. Validación de los objetivos**

El presente trabajo se planteó con el objetivo general de desarrollar una herramienta que permita realizar un predimensionamiento de obras subterráneas de desarrollo lineal, facilitando la identificación preliminar de métodos constructivos, sostenimientos y estrategias de excavación compatibles con las condiciones geológicas del terreno.

Para alcanzar este objetivo, en primer lugar, se abordó el análisis del estado del arte, revisando el comportamiento del terreno frente a excavaciones subterráneas, los parámetros geotécnicos relevantes, las principales clasificaciones geomecánicas y los métodos constructivos y sostenimientos habituales. Este análisis permitió establecer una base técnica sólida y comprender las limitaciones y aplicabilidad de las distintas metodologías.

En segundo lugar, se estudiaron y compararon las principales clasificaciones geomecánicas empleadas en ingeniería de túneles, como RMR, Q de Barton, GSI y la clasificación de Romana. Este análisis permitió identificar sus diferencias metodológicas y sentar las bases para su integración dentro de un mismo sistema de evaluación.

Finalmente, se desarrolló una metodología que permite relacionar las clasificaciones geomecánicas con las recomendaciones constructivas, mediante la definición de matrices de compatibilidad entre clasificaciones, métodos de excavación y sistemas de sostenimiento. Este enfoque permite consolidar criterios de distintos autores y seleccionar soluciones coherentes con los resultados obtenidos y con la práctica habitual en el diseño de túneles.

### **7.3. Limitaciones del estudio**

- **Carácter académico y alcance temporal del trabajo**

El desarrollo de la herramienta se ha realizado en el contexto de un trabajo académico, lo que implica necesariamente una limitación en el tiempo disponible para su elaboración. Esta circunstancia ha condicionado el grado de profundidad con el que podían implementarse determinados módulos o funcionalidades dentro del modelo. En este sentido, la herramienta presentada puede considerarse un producto mínimo viable, que demuestra la viabilidad metodológica del enfoque propuesto y permite validar el concepto de integración de clasificaciones geomecánicas en un sistema de predimensionamiento, pero que no incorpora todas las funcionalidades que podrían desarrollarse en una aplicación completa destinada a uso profesional.

- **Validación limitada mediante casos de estudio**

La herramienta desarrollada ha sido aplicada a casos de estudio que permiten comprobar su funcionamiento y analizar su capacidad para generar soluciones constructivas coherentes con las condiciones geotécnicas consideradas. No obstante, el número de casos analizados es necesariamente limitado dentro del alcance de este trabajo. La validación del modelo mediante un conjunto más amplio de proyectos reales, que incluya distintos contextos geológicos, tipologías de túneles y métodos constructivos, permitiría evaluar con mayor profundidad el comportamiento de la herramienta y contrastar los resultados obtenidos con soluciones finalmente ejecutadas en obras reales.

- **Simplificación inherente al uso de clasificaciones geomecánicas**

El comportamiento geomecánico del terreno en obras subterráneas depende de numerosos factores geológicos, estructurales, hidrogeológicos y constructivos que no siempre pueden representarse completamente mediante sistemas de clasificación. Las clasificaciones geomecánicas utilizadas en este trabajo —como RMR, Q de Barton, GSI o la clasificación de Romana— constituyen herramientas ampliamente aceptadas para la caracterización preliminar del terreno, pero implican necesariamente una simplificación del comportamiento real del macizo. En consecuencia, los resultados obtenidos mediante la herramienta deben interpretarse como una aproximación inicial al comportamiento del terreno, que debe ser complementada posteriormente mediante análisis geotécnicos más detallados.

- **Nivel de detalle limitado de la caracterización geológica**

La herramienta ha sido diseñada para trabajar con información geotécnica disponible en fases iniciales de proyecto, donde el conocimiento del terreno suele basarse en campañas de investigación limitadas, ensayos puntuales o información procedente de proyectos cercanos. Como consecuencia, el modelo no incorpora de forma explícita ciertos aspectos que pueden resultar relevantes en el comportamiento real del terreno, como la variabilidad espacial de las discontinuidades, heterogeneidades litológicas locales, condiciones hidrogeológicas complejas o interacciones entre distintos tipos de materiales. Esta simplificación responde a la intención de desarrollar una herramienta de predimensionamiento, orientada a la identificación preliminar de soluciones constructivas.

- **Alcance limitado en la consideración de condicionantes externos al terreno**

El modelo desarrollado se centra en la integración de clasificaciones geomecánicas y recomendaciones constructivas derivadas de estas, junto con normas técnicas aplicadas en la práctica. Sin embargo, en proyectos reales de obras subterráneas intervienen numerosos factores adicionales que pueden influir de manera significativa en la selección de métodos de excavación y sostenimiento. Entre ellos se encuentran condicionantes ambientales, restricciones urbanísticas, disponibilidad de maquinaria, limitaciones logísticas de obra o estrategias de ejecución específicas del proyecto. Estos factores no se encuentran completamente incorporados en la herramienta propuesta, ya que su inclusión requeriría la ampliación del modelo mediante nuevos módulos de análisis y reglas adicionales de decisión.

- **Dependencia del criterio técnico del usuario**

Finalmente, es importante destacar que la herramienta desarrollada no pretende sustituir el criterio técnico del ingeniero responsable del proyecto. El modelo proporciona un sistema estructurado de análisis que permite organizar la información disponible y generar alternativas constructivas compatibles con las características del terreno, pero la interpretación final de los resultados y la selección de la solución constructiva más adecuada deben realizarse siempre bajo la supervisión de un técnico con experiencia en el diseño de obras subterráneas. En este sentido, la herramienta debe entenderse como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones y no como un sistema automático de diseño.

#### ***7.4. Posibles desarrollos y aplicaciones futuras***

La herramienta desarrollada en el presente trabajo constituye una base metodológica para el predimensionamiento de obras subterráneas de desarrollo lineal a partir de la integración de diferentes clasificaciones geomecánicas y criterios técnicos de selección. Si bien el modelo implementado permite demostrar la viabilidad del enfoque propuesto, el potencial de desarrollo de esta herramienta es considerable y abre diversas líneas de mejora y aplicación futura tanto en el ámbito académico como en el profesional.

En primer lugar, uno de los desarrollos más evidentes consiste en la migración del modelo a un entorno de programación específico, superando las limitaciones propias del entorno Excel. La implementación del algoritmo en lenguajes de programación como Python o mediante entornos de desarrollo de aplicaciones permitiría estructurar el sistema mediante bases de datos relacionales, mejorar significativamente la eficiencia de cálculo y facilitar la gestión de grandes volúmenes de

información geotécnica. Además, este tipo de desarrollo permitiría integrar motores de búsqueda más avanzados, capaces de evaluar simultáneamente múltiples alternativas constructivas y realizar comparaciones automáticas entre soluciones técnicas completas.

Otro campo de desarrollo futuro consiste en la integración de la herramienta con bases de datos geotécnicas y geológicas, permitiendo alimentar automáticamente el modelo con información procedente de campañas de investigación, sondeos o bases de datos de proyectos previos. Este tipo de integración permitiría mejorar progresivamente la capacidad de predicción del modelo y reducir la incertidumbre asociada a las fases iniciales de proyecto, especialmente en zonas con abundante información geológica disponible.

Asimismo, la herramienta podría evolucionar hacia su integración en entornos BIM (Building Information Modeling) aplicados a infraestructuras subterráneas. La conexión entre el modelo de predimensionamiento y modelos digitales tridimensionales del proyecto permitiría incorporar la información geotécnica directamente en el modelo BIM del túnel, facilitando la coordinación entre disciplinas y permitiendo una gestión más eficiente de las decisiones de diseño durante las fases tempranas del proyecto.

Otra línea de desarrollo de gran interés sería la incorporación de módulos avanzados de análisis de incertidumbre, capaces de evaluar de forma probabilística el comportamiento del terreno en función de la calidad y disponibilidad de los datos geotécnicos. La integración de técnicas de simulación, como métodos Monte Carlo u otros enfoques probabilísticos, permitiría cuantificar de manera más precisa el impacto de la incertidumbre geológica en la selección de métodos constructivos y sostenimientos.

En el ámbito de la inteligencia artificial y el análisis de datos, también resulta posible plantear la evolución de la herramienta hacia sistemas de aprendizaje automático basados en datos de proyectos reales. A partir de bases de datos de túneles ejecutados, el modelo podría entrenarse para identificar patrones entre condiciones geológicas, métodos constructivos adoptados y resultados obtenidos, permitiendo mejorar progresivamente la capacidad de recomendación de la herramienta.

Por otro lado, el modelo podría ampliarse mediante la incorporación de nuevos módulos técnicos, entre los que podrían incluirse sistemas más avanzados de estimación económica, análisis comparativo entre métodos constructivos, estimaciones de plazos de ejecución o evaluación de riesgos asociados a diferentes soluciones. De esta forma, la herramienta podría evolucionar desde

un sistema de predimensionamiento hacia una plataforma más completa de apoyo a la toma de decisiones en proyectos de obras subterráneas.

Finalmente, desde el punto de vista profesional, la herramienta presenta un importante potencial de aplicación en consultorías de ingeniería, administraciones públicas y empresas constructoras, especialmente en fases tempranas de planificación y estudio de alternativas. Su capacidad para integrar diferentes clasificaciones geomecánicas y generar soluciones constructivas compatibles con múltiples criterios técnicos puede contribuir a mejorar la calidad del proceso de toma de decisiones y a reducir la incertidumbre inherente al diseño de infraestructuras subterráneas.

En conjunto, estos posibles desarrollos ponen de manifiesto que el modelo presentado en este trabajo constituye únicamente una primera aproximación a un sistema que, con un mayor desarrollo tecnológico y la incorporación de nuevas funcionalidades, podría convertirse en una herramienta de gran utilidad para el diseño preliminar de obras subterráneas.

### ***7.5. Conclusiones generales del trabajo***

El desarrollo de infraestructuras subterráneas constituye uno de los campos más complejos de la ingeniería civil, en el que las decisiones adoptadas en las fases iniciales del proyecto condicionan de manera significativa el desarrollo posterior de la obra. En este contexto, disponer de herramientas que permitan estructurar la información disponible y orientar el proceso de predimensionamiento resulta especialmente valioso, facilitando la identificación de alternativas constructivas coherentes con las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno.

El trabajo desarrollado pone de manifiesto la importancia de integrar diferentes enfoques de caracterización geomecánica dentro de un mismo marco de análisis. En la práctica profesional, las clasificaciones geomecánicas suelen emplearse de forma independiente; sin embargo, su combinación permite obtener una visión más completa del comportamiento del terreno y refuerza la robustez de las decisiones adoptadas durante el proceso de diseño.

Asimismo, el enfoque planteado evidencia la necesidad de abordar el predimensionamiento desde una perspectiva sistemática, en la que la información geotécnica, los criterios técnicos y las recomendaciones constructivas se integren en un único proceso de análisis. Este planteamiento permite transformar datos dispersos en información útil para la toma de decisiones, reduciendo la dependencia de procesos exclusivamente manuales o basados en la experiencia individual.

Por otra parte, el desarrollo de la herramienta ha permitido comprobar el potencial de los modelos digitales para apoyar el trabajo del ingeniero en fases tempranas del proyecto. La estructuración de

la información mediante matrices de decisión, reglas de compatibilidad y criterios técnicos demuestra que es posible formalizar parte del conocimiento existente en el ámbito de las obras subterráneas y utilizarlo como base para sistemas de apoyo al diseño preliminar.

No obstante, la ingeniería de túneles continúa siendo un campo en el que el conocimiento técnico, la experiencia profesional y la interpretación del comportamiento del terreno siguen desempeñando un papel fundamental. En este sentido, las herramientas digitales deben entenderse como instrumentos de apoyo que complementan, y no sustituyen, el criterio del ingeniero.

De este modo, el presente trabajo se configura como una contribución orientada a integrar conocimiento geotécnico y herramientas digitales en el proceso de predimensionamiento de obras subterráneas, avanzando hacia una ingeniería más estructurada, rigurosa y apoyada en el conocimiento.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. AMBERG, Felix. Gotthard Base Tunnel: Technical Background and Innovations [en línea]. 2018. Disponible en: <https://pttp.es/Downloads/Informacion/01%20TUNEL%20GOTHARDO.pdf> [Consulta: 06/12/2025]
2. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). M 145-91 (2021): Standard Specification for Classification of Soils and Soil–Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes [en línea]. Washington, D.C.: AASHTO, 2021. Disponible en: <https://store.transportation.org/> [Consulta: 24/02/2026].
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* [en línea]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017. Disponible en: <https://www.astm.org/d2487-17.html> [Consulta: 24/02/2026].
4. ARREYGUE ROCHA, Eleazar, et al. Bulones en túneles: método austriaco [en línea]. Disponible en: <https://fr.scribd.com/doc/178537232/Corona-de-Bulones> [Consulta: 16/02/2026].
5. BABANAGAR, Nandeesh, et al. Digital twins for urban underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, vol. 155. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779824005583> [Consulta:03/02/2026].
6. BAHADUR KATUWAL, Tek. Selection of tunnel construction methods. Documento técnico [en línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/371950993\\_Selection\\_of\\_Tunnel\\_Construction\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/371950993_Selection_of_Tunnel_Construction_Methods) [Consulta: 20/12/2025].
7. BARBA ÁVILA, Carlos. Criterios de excavabilidad en túneles. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
8. BARBA ÁVILA, Carlos. Elementos de sostenimiento en túneles. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
9. BARBA ÁVILA, Carlos. Introducción a la mecánica de rocas y las obras subterráneas. Clasificaciones geomecánicas. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
10. BARBA ÁVILA, Carlos. Métodos constructivos mecanizados. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.

11. BARBA ÁVILA, Carlos. Métodos constructivos no mecanizados y semimecanizados. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
12. BARBA ÁVILA, Carlos. Métodos de estimación de sostenimiento túneles. Nuevo método austriaco. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
13. BARBA ÁVILA, Carlos. Métodos de excavación de túneles en roca. *Material docente Cimentaciones y túneles*. Madrid: Universidad Europea, curso académico 2024–2025.
14. BARTON, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39, pp. 185–216.
15. BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 1974, vol. 6, nº 4, pp. 189–236. Disponible en: [https://files.dnr.state.mn.us/lands\\_minerals/northmet/permit\\_to\\_mine/22\\_barton\\_1974\\_engineering\\_classification.pdf](https://files.dnr.state.mn.us/lands_minerals/northmet/permit_to_mine/22_barton_1974_engineering_classification.pdf) [Consulta: 14/12/2025].
16. BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 1974, vol. 6, nº 4, pp. 189–236.
17. BBT SE. Brenner Base Tunnel Project Overview [en línea]. 2022. Disponible en: <https://www.bbt-se.com/en/tunnel/project-overview/> [Consulta: 03/12/2025].
18. BERNOLD, Jean. Formwork and reinforcement grid. Patente CH620272A5. Publicada el 14-11-1980. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/CH620272A5/en> [Consulta: 18/02/2026].
19. BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
20. BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
21. BIENIAWSKI, Z. T. Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección. *IngeoPres*, s.f. Disponible en: <https://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/nbelandria/materias/geotecnia/Articulo%20Bieniawski.pdf> [Consulta: 17/02/2026].
22. BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. En: *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*. Johannesburg, 1976, vol. 1, pp. 97–106.

23. BIENIAWSKI, Z.T.; *Experience with in situ measurement of rock deformability*. New York: John Wiley & Sons, 1989. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com> [Consulta: 06/02/2026]
24. BORSELLI, Lorenzo. *Geotecnia I: Clasificación ingenieril de los suelos y de los macizos rocosos*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2024. Disponible en: [https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia\\_1\\_parte\\_II.pdf](https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_II.pdf) [Consulta: 25/02/2026]
25. BRANDL, H.; ADAM, D.; MARKIEWICZ, R. Energy geocomposites for tunnels. En: *Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics*. 2006. Disponible en: <https://library.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/resources/proceedings/B.6.7%20Energy%20geocomposites%20for%20tunnels.pdf> [Consulta: 12/01/2026].
26. CARTAYA PIRE, M. *Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de las obras subterráneas*. Tesis doctoral. Cuba, 2001. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223517652004.pdf> [Consulta: 22/01/2026].
27. CASAGRANDE, Arthur. Classification and Identification of Soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1948, vol. 113, pp. 901-992.
28. CASHMAN, P. M.; PREENE, M. *Groundwater Lowering in Construction: A Practical Guide to Dewatering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
29. CASTANEDO NAVARRO, Francisco J. Elementos de sostenimiento en túneles [en línea]. Disponible en: [https://www.equipodeprospecciones.com/descargas/Excavaciones\\_subterranas/Tema%202.\\_Elem\\_sost\\_Tunel.pdf](https://www.equipodeprospecciones.com/descargas/Excavaciones_subterranas/Tema%202._Elem_sost_Tunel.pdf) [Consulta: 14/02/2026].
30. CASTILLA GÓMEZ, Jorge; HERRERA HERBERT, Juan. Sostenimiento en minería y obras subterráneas [en línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/89367/1/LM1-B3T4-SOSTENIMIENTO-R2-20161121.pdf> . [Consulta: 10/01/2026]
31. CASTILLA GOMEZ, Jorge; HERRERA HERBERT, Juan. Sostenimiento en túneles [en línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/89367/1/LM1-B3T4-SOSTENIMIENTO-R2-20161121.pdf> [Consulta: 09/01/2026].
32. CELADA TAMAMES, Benjamin. Módulo B.4: Métodos de sección de partida. *Máster en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid, 2008.
33. CHARLES-CRUZ, Carlos Alberto. *Fundamentos de suelos* [en línea]. ResearchGate, septiembre 2023. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/375745338> [Consulta: 24/02/2026].

34. CHÁVEZ RAMIREZ, Nicolás et al. Documento técnico [en línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/421502651/EPB-e-Hidroescudo> [Consulta: 18/02/2026].
35. CHINYADZA, Chengetai Reality; et al. Integrating artificial intelligence into ventilation on demand: current practice and future promises. *Sensors*, 2026, vol. 26, nº 3. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/3/1042> [Consulta: 17/12/2025].
36. CROCE, P.; et al. Jet-grouting performance in tunnelling. En: *GeoSupport 2004 / World Tunnel Congress*. 2004, vol. 2, pp. 1221-1228. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/268590279\\_Jet-Grouting\\_Performance\\_in\\_Tunnelling](https://www.researchgate.net/publication/268590279_Jet-Grouting_Performance_in_Tunnelling) [Consulta: 23/02/2026].
37. DE LA VEGA GARCÍA, Sinue. Técnicas de tuneleo en México. Tesina para optar por el grado de Especialista en Construcción. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2014. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/b05ac1ac-890c-4e91-9b60-f0d4d57b4154/content> [Consulta: 11/02/2026].
38. DUIJVESTIJN, Bart; HAITSMAN, Jurjen. Go with the data flow: maximizing tunnel operation and maintenance. *Autodesk University*, 2023. Disponible en: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/de/class/Go-with-the-Data-Flow-Maximizing-Tunnel-Operation-and-Maintenance-2023> [Consulta: 06/02/2026].
39. DUQUE ESCOBAR, Gonzalo; ESCOBAR, Carlos Enrique. *Mecánica de los suelos I*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co> [Consulta: 24/02/2026].
40. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Subway [en línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/subway#ref140354> [Consulta: 03/02/2026].
41. ESCOBAL, Iñigo; BARAIBAR, José Manuel; GARCÍA MOCHALES, José Luis; GONZÁLEZ, Johnatan; ARLANDI, Manuel; BERNARDO, Alberto. Estabilización del sector occidental de la antigua cantera de Punta Lucero en el Puerto de Bilbao. *Informes de la Construcción*, 2021, vol. 73, nº 562, e394. Disponible en: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/6057/7443> [Consulta: 04/02/2026].
42. ESCOBAR, Elisa. Escudos de balance de presión de tierras (E.P.B.). *Revista Trébol*, nº 41. Madrid: Fundación MAPFRE, 2006, pp. 15–16. Disponible en: <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/en/media/group/1035716.do> [Consulta: 17/12/2025].

43. EUROHINCA. Escudo cerrado: hidroescudo [en línea]. Disponible en: <https://eurohinca.com/es/escudo-cerrado-hidroescudo/> [Consulta: 05/02/2026].
44. FAO – ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. *Guía para la descripción de suelos*. 4ª ed. Trad. y adaptación por Ronald Vargas Rojas. Roma: FAO, 2009. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content> [Consulta: 07/02/2026].
45. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Context sensitive rock slope design [en línea]. Disponible en: [https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/context\\_sensitive\\_rock\\_slope\\_design/ch\\_5\\_3.aspx](https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/context_sensitive_rock_slope_design/ch_5_3.aspx) [Consulta: 11/02/2026].
46. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Precast Concrete Segmental Liners for Large Diameter Road Tunnels. FHWA-HIF-20-035. Washington, D.C., 2020. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/hif20035.pdf> [Consulta: 04/03/2026].
47. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Rock tunneling. En: *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements* [en línea]. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2009. Disponible en: <https://pdhstar.com/wp-content/uploads/2018/12/GE%E2%80%90Rock-Tunneling-FINAL.pdf> [Consulta: 19/01/2026].
48. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. Publication No. FHWA-NHI-09-010. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2009. Disponible en: [https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/tunnel\\_manual.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/tunnel_manual.pdf) [Consulta: 03/12/2025].
49. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Tunnel planning. En: *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements* [en línea]. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2009. Disponible en: <https://pdhstar.com/wp-content/uploads/2018/11/GE-001-Tunnel-Planning-FINAL.pdf> [Consulta: 21/12/2025].
50. FEHMARN A/S. Fehmarnbelt Fixed Link: Technical Documentation [en línea]. 2022. Disponible en: <https://femern.com/the-tunnel/fehmarbelt-tunnel/> [Consulta: 05/12/2025].

51. FU, X.; WU, M.; ZHANG, L. Probabilistic life prediction of tunnel boring machine under wearing conditions with incomplete information. *Buildings*, 2022, vol. 12, 1959. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/buildings12111959> [Consulta: 03/02/2026].
52. GALL, Vojtech; MUNFAH, Nasri. Design guidelines for Sequential Excavation Method (SEM) practices for road tunnels in the United States [en línea]. Documento técnico. Disponible en: <https://www.gzconsultants.com/wp-content/uploads/Design-Guidelines-for-Sequential-excavation-Method-SEM-Practices-for-Road-Tunnels-in-the-United-States-3.pdf> [Consulta: 12/12/2025].
53. GALLER, R.; STIPEK, W.; BAUER, W. (eds.). *50 Years of NATM – Experience Reports*. Wien: ITA Austria, 2012.
54. GÓMEZ, Toni. *La historia del primer ferrocarril subterráneo del mundo y cómo acabó convirtiéndose en el Metro de Londres* [en línea]. Xataka, 24 enero 2024. Disponible en: <https://www.xataka.com/transporte/historia-primer-ferrocarril-subterraneo-mundo-como-acabo-convirtiendose-metro-londres> [Consulta: 27/11/2025]
55. GONZÁLEZ DÍEZ, Alberto; MARTÍNEZ CEDRÚN, Patricio. Caracterización geomecánica de suelos y rocas [en línea]. OpenCourseWare, Universidad de Cantabria, s.f. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.1.%20Macizo%20rocaso\\_REVISADO\\_OCW.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.1.%20Macizo%20rocaso_REVISADO_OCW.pdf) [Consulta: 23/02/2026].
56. GONZÁLEZ DÍEZ, Alberto; MARTÍNEZ CEDRÚN, Patricio. Clasificaciones geomecánicas [en línea]. OpenCourseWare, Universidad de Cantabria, s.f. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.2.%20Clasificaciones%20geomeca%CC%81nicas\\_Revisado\\_OCW.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.2.%20Clasificaciones%20geomeca%CC%81nicas_Revisado_OCW.pdf) [Consulta: 08/02/2026].
57. GONZÁLEZ DÍEZ, Alberto; MARTÍNEZ CEDRÚN, Patricio. *Clasificaciones geomecánicas* [en línea]. Santander: Universidad de Cantabria, 2024. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.2.%20Clasificaciones%20geomeca%CC%81nicas\\_Revisado\\_OCW.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.2.%20Clasificaciones%20geomeca%CC%81nicas_Revisado_OCW.pdf) [Consulta: 09/01/2026].
58. GUZMÁN RAMOS, C. Túneles 2: Función, clasificación y características de túneles [en línea]. Scribd, 2018. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/393985503/Tuneles-2-Unid-1-Funcion-clasificacion-y-caracteristicas-de-tuneles-CLASE-N-1-1> [Consulta: 05/12/2025]
59. HAUZINGER, Elisabeth; et al. Optimized reuse of tunnel and excavation materials in civil engineering and tunnel construction using AI-supported sensor technologies. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2025, vol. 170, nº 5. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-025-01579-4> [Consulta: 09/01/2026].

60. HERRENKNECHT AG. Mixshield Technology for Large-Diameter Tunnelling [en línea]. 2021. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/mixshield/> [Consulta: 01/12/2025].
61. HERRENKNECHT AG. Variable Density TBM: the hybrid universal solution for tunnelling in unconsolidated rock [en línea]. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/variable-density-tbm/> [Consulta: 21/02/2026].
62. HISTORIA CIVIL. *Túnel de Eupalinos* [en línea]. 29 enero 2014. Disponible en: <https://historiacivil.wordpress.com/2014/01/29/tunel-de-eupalinos/> [Consulta: 26/11/2025]
63. HOEK, E. *Practical Rock Engineering*. Vancouver: Rocscience, 2007. [Consulta: 04/12/2025].
64. HOEK, E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 1994, vol. 2, nº 2, pp. 4–16. Disponible en: <https://isrm.net/download/media.file.afcfaa77c2928214.313333323136393339396973726d5f6e6577736a6f75726e616c5f2d5f313939342c5f766f6c756d655f322c5f6e756d.pdf> [Consulta: 22/02/2026].
65. HOEK, E.; BROWN, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, vol. 34, n.º 8, pp. 1165–1186. Disponible en: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/1997-Practical-Estimates-of-Rock-Mass-Strength.pdf> [Consulta: 05/02/2026]
66. HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. *Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition*. In: *Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto, 2002. Disponible en: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2002-Hoek-Brown-Failure-Criterion.pdf> [Consulta: 02/02/2026]
67. HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. *Support of underground excavations in hard rock* [en línea] Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. Disponible en: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Support-of-Underground-Excavations-in-Hard-Rock.pdf> [Consulta: 03/02/2026]
68. INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. *Manual de ingeniería de taludes*. Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, 1987.
69. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring (ISRM Orange Book)*. Editado por R. Ulusay.

- Cham: Springer, 2014. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-07713-0> [Consulta: 05/02/2026].
70. INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA-AITES). BIM in tunnelling – Guideline for mechanised and conventional tunnels [en línea]. 2020. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/397173829\\_ITA-AITES\\_-\\_BIM\\_in\\_tunnelling\\_-\\_Guideline\\_for\\_mechanised\\_and\\_conventional\\_tunnels/link/6906600c368b49329fa8c2a4/download](https://www.researchgate.net/publication/397173829_ITA-AITES_-_BIM_in_tunnelling_-_Guideline_for_mechanised_and_conventional_tunnels/link/6906600c368b49329fa8c2a4/download) [Consulta: 27/01/2026].
71. INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA-AITES). Cut and cover construction method [en línea]. Disponible en: [https://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/ITA\\_Report\\_N2\\_WG19\\_P.pdf](https://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/ITA_Report_N2_WG19_P.pdf) [Consulta: 21/01/2026].
72. INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA-AITES). Guidelines for the Design of Tunnels. Lausanne: ITA, 2000. [Consulta: 03/12/2025].
73. ITA-AITES. Global Tunnelling and Underground Space Annual Report [en línea]. 2020. Disponible en: <https://www.ita-aites.org> [Consulta: 04/12/2025].
74. JIMÉNEZ RODRÍGUEZ, Rafael. Descripción de los macizos rocosos y de las discontinuidades. IV Edición *Máster en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
75. JIMÉNEZ, Rafael. Descripción de macizos rocosos. Discontinuidades. Alteración. clasificaciones geomecánicas. Definición. Material docente. *IV Edición Máster en túneles y obras subterráneas*. Universidad Politécnica de Madrid 2009.
76. JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos. Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa, 1974.
77. JUNCÁ UBIERNA, José A. “Historia de los túneles y su evolución tecnológica”. En: LÓPEZ JIMENO, Carlos (ed.). *Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Volumen I*. Madrid: U.D. Proyectos, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2011, pp. 31–67. ISBN 978-84-96140-36-3.
78. KUMAR, M.; SHARMA, A.; SINGH, H.; et al. Self-healing concrete as a prospective construction material: a review. *Construction and Building Materials*. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/360258768\\_Self-Healing\\_Concrete\\_as\\_a\\_Prospective\\_Construction\\_Material\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/360258768_Self-Healing_Concrete_as_a_Prospective_Construction_Material_A_Review) [Consulta: 22/01/2026].

79. LARA GARCÍA, Gerardo. Procedimiento constructivo del cruce del Metropolitano Línea B con el Eje 1 Poniente Guerrero mediante tuneleo falso. Tesis. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1996. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ppt1997/0243727/0243727.pdf> [Consulta: 06/02/2026].
80. LIU, Thomas. A review of engineering soil classification systems. *Highway Research Record*, 1967, nº 156.
81. LÓPEZ JIMENO, Carlos et al. *Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid: Entorno Gráfico, 1997.
82. MARINOS, P.; HOEK, E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2001, vol. 60, pp. 85–92. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s100640000090> [Consulta: 06/02/2026]
83. MARINOS, P.; HOEK, E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *Proceedings of the GeoEng2000 Conference*. Melbourne, 2000. Disponible en: <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf> [Consulta: 07/02/2026]
84. MARTÍ, J. V.; YEPES, V.; GONZÁLEZ, F.; ALCALÁ, J. Técnicas de voladuras y excavación en túneles. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2012. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2023/04/04/tuneles-perforacion-y-voladura/> [Consulta: 24/02/2026].
85. MEDINA RODRÍGUEZ, Luis; NÚÑEZ TEMES, Carlos. Análisis de los asentos inducidos por la excavación de túneles mediante el método clásico de Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 2002, año 149, nº 3422, pp. 27–37.
86. MELIS MAYNAR, Manuel J.; TRABADA GUIJARRO, Jesús M. Construcción en 39 meses de 8 km de túnel por el Método Clásico de Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 2000, año 147, nº extraordinario 3405, pp. 25–40.
87. MELIS MAYNAR, Manuel J.; TRABADA GUIJARRO, Jesús M. Construcción de una estación en caverna de gran luz: la estación de Guzmán el Bueno. *Revista de Obras Públicas*, diciembre 2000, número extraordinario.
88. MELIS MAYNAR, Manuel. *Apuntes de introducción al proyecto y construcción de túneles y metros en suelos y rocas blandas o muy rotas*. Material docente. EAN: 9788461553310. Publicado el 1 de enero de 2011.

89. MENDAÑA, C.; MIRANDA, J.; RUIZ, V. La revolución de los túneles. *Revista de Obras Públicas*, 2021.
90. MENDAÑA, F.; FERNÁNDEZ, R. Hidroescudos y tuneladoras E.P.B.: campos de utilización. *Revista de Obras Públicas*, 2011, nº 3525, pp. 67–86.
91. MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA (MITMA). Estudio informativo LAV Nogales de Pisuerga–Reinosa. Anejo: geología y geotecnia [en línea]. Madrid: MITMA. Disponible en: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudio\\_ferrocarriles/Estudio\\_Informativo\\_LAV\\_NogalesPisuerga-Reinosa/1.\\_memoria\\_y\\_anejos/anejo\\_05.\\_geologia\\_y\\_geotecnia.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudio_ferrocarriles/Estudio_Informativo_LAV_NogalesPisuerga-Reinosa/1._memoria_y_anejos/anejo_05._geologia_y_geotecnia.pdf) [Consulta: 14/01/2026].
92. MIRANDA, R.; BELTRÁN, D. El túnel de La Cabrera. *Revista de Obras Públicas*, junio 2011, nº 3522. Disponible en: [https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2011/2011\\_junio\\_3522\\_04.pdf](https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2011/2011_junio_3522_04.pdf) [Consulta: 28/02/2026].
93. NATIONAL GEOGRAPHIC HISTORIA. *Ciudad subterránea descubierta por accidente* [en línea]. Disponible en: [https://historia.nationalgeographic.com.es/foto-del-dia/ciudad-subterranea-descubierta-por-accidente\\_22577](https://historia.nationalgeographic.com.es/foto-del-dia/ciudad-subterranea-descubierta-por-accidente_22577) [Consulta: 27/11/2025]
94. NATIONAL GEOGRAPHIC HISTORIA. *El túnel de San Gotardo: La gran proeza de ingeniería del siglo XIX* [en línea]. Disponible en: [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/tunel-san-gotardo-gran-proeza-ingenieria-siglo-xix\\_17617](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/tunel-san-gotardo-gran-proeza-ingenieria-siglo-xix_17617) [Consulta: 27/11/2025].
95. NEMO, Leslie. The first New York City subway delivers speed. *Civil Engineering Magazine* (ASCE), 2024. Disponible en: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/05/the-first-new-york-city-subway-delivers-speed> [Consulta: 19/02/2026].
96. NÚÑEZ PEIRÓ, Miguel; ZURDO ARRANZ, Jesús; PÉREZ BASANTE, Ángel Luis; VINYALS, Jordi. Procedimientos constructivos de un túnel subterráneo de vía doble en la prolongación de la línea 3 de Metro de Madrid desde Villaverde Alto a El Casar. *Revista de Obras Públicas*, 2025, nº 3656 (Ejemplar dedicado a: Túneles y Obras Subterráneas), pp. 94–104.
97. ORTUÑO, Luis. Concepto de Ko. Influencia en túneles. IV Edición *Máster en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
98. OSEPSA. Procedimiento: hormigones y morteros proyectados (gunita) [en línea]. Disponible en: [https://www.osepsa.es/calidad/wp-content/uploads/2012/05/PE01.HORMIGONES-Y-MORTERO-PROYECTADO-GUNITA.REV\\_.001.pdf](https://www.osepsa.es/calidad/wp-content/uploads/2012/05/PE01.HORMIGONES-Y-MORTERO-PROYECTADO-GUNITA.REV_.001.pdf) [Consulta: 26/01/2026].

99. OTEO MAZO, C. Construcción de túneles: introducción. *Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas*, s.f.
100. OTEO MAZO, C. Sobre cómo seleccionar el proceso constructivo: criterios. *Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas*, s.f.
101. OTEO MAZO, Carlos. “La batalla por el túnel: una disertación sobre ingeniería subterránea”. *Revista de Obras Públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, nº 3590 (Ejemplar dedicado a: Túneles y obras subterráneas), 2017, pp. 64-85. ISSN 0034-8619.
102. OTEO, Carlos. Instrumentación de túneles: lo que puede obtenerse. Ponencia 0510COT1-VIII. Madrid, s.f.
103. OTEO, Carlos. Métodos constructivos convencionales y semimecanizados en suelos. I Edición *Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid: AETOS, 2006.
104. PAT PADILLA, Francisco José. Control de procesos para la excavación de túneles en frente mixto con TBM de tipo EPB. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, 2019. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/handle/132.248.52.100/16743> [Consulta: 12/02/2026].
105. PAT PADILLA, Francisco José. Control de procesos para la excavación de túneles en frente mixto con TBM de tipo EPB. Tesis de maestría. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2019. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2019/mayo/0788892/0788892.pdf> [Consulta: 03/03/2026].
106. PÉREZ ACEBO, Heriberto; GALLO LAYA, Javier; GARCÍA BRAGADO, David. *Excavación, sostenimiento y técnicas de corrección en túneles, obras subterráneas y labores mineras*. Bilbao: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), 2016.
107. PÉREZ ÁLVAREZ, Rubén. Diseño y ejecución de obras subterráneas. Tema 10: sistemas de excavación en túneles [en línea]. OpenCourseWare. Santander: Universidad de Cantabria, s.f. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema\\_10.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema_10.pdf) [Consulta: 16/01/2026].
108. PÉREZ ÁLVAREZ, Rubén. Diseño y ejecución de obras subterráneas. Tema 8: excavación con máquinas integrales [en línea]. OpenCourseWare. Santander: Universidad de Cantabria, s.f. Disponible en:

- [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema\\_08.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema_08.pdf) [Consulta: 12/02/2026].
109. PÉREZ ÁLVAREZ, Rubén. Diseño y ejecución de obras subterráneas. Tema 11: sostenimiento de túneles [en línea]. OpenCourseWare. Santander: Universidad de Cantabria. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema\\_11.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema_11.pdf) [Consulta: 30/12/2025].
110. PÉREZ ÁLVAREZ, Rubén. Diseño y ejecución de obras subterráneas. Tema 6: emboquille de túneles [en línea]. OpenCourseWare. Santander: Universidad de Cantabria. Disponible en: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema\\_06.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1965/course/section/1667/tema_06.pdf) [Consulta: 27/02/2026].
111. PÉREZ VALCÁRCEL, Juan. *Conceptos generales de la mecánica de suelos*. A Coruña: E.T.S. Arquitectura de A Coruña, Universidade da Coruña, 2009.
112. PÉREZ, M. et al. Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 2018, nº 43, pp. 34–44. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/issue/view/4893> [Consulta: 03/02/2026].
113. PERUCHO, Áurea. *El tensor de tensiones*. Madrid: Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), 2009.
114. POTTER, Brian. Why we stopped building cut-and-cover [en línea]. Works in Progress, 2024. Disponible en: <https://worksinprogress.co/issue/why-we-stopped-building-cut-and-cover/> [Consulta: 02/12/2025]
115. POWERS, J. P.; CORWIN, A. B.; SCHMALL, P. C.; KAECK, W. E. *Construction Dewatering and Groundwater Control*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
116. PREENE, M.; ROBERTS, T. O. L.; POWRIE, W. *Groundwater Control – Design and Practice*. London: CIRIA, 2016.
117. PREGO, Carlos. A grandes túneles, gigantescas tuneladoras: así es “Qin Liangyu”, la mayor máquina perforadora del mundo [en línea]. *Xataka*, 2023. Disponible en: <https://www.xataka.com/otros/a-grandes-tuneles-gigantescas-tuneladoras-asi-s-880-qin-liangyu-mayor-maquina-perforadora-mundo> [Consulta: 07/12/2025].
118. PRELINI, Charles. *Tunneling: A Practical Treatise*. 6th ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1902. Disponible en:

- <https://dn790003.ca.archive.org/0/items/tunnelingpractic00prel/tunnelingpractic00prel.pdf> [Consulta: 18/01/2026].
119. RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Pedro. Los túneles de Madrid Calle 30: un proyecto icónico de transformación urbana. Madrid: AMITOS, 2025.
  120. RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Pedro. Métodos empíricos basados en clasificaciones geomecánicas. VII *Máster en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid: TYPESA, 2012.
  121. RAMOS, Fredy Alonso. Procedimiento constructivo del túnel Emisor Oriente con tuneladora TBM-EPB, tramo III, lumbrera 10 a 11. Tesis de Ingeniería Civil. México: Universidad Nacional Autónoma de México, FES Aragón, 2013. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/septiembre/0701798/0701798.pdf> [Consulta: 22/02/2026].
  122. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Diccionario de la lengua española* [en línea]. 23.ª ed. Madrid: RAE, 2014-2024. Disponible en: <https://dle.rae.es/túnel> [Consulta: 24/11/2025].
  123. REIG, Isabel. Movimientos y deformaciones. Compatibilidad. Madrid: Berinsa, 2009.
  124. REY SABÍN, Alberto et al. Túneles y obras subterráneas [en línea]. Madrid: Sika España, 2016. Disponible en: <https://www.pttp.es/wp-content/uploads/2016/10/Tuneles-y-Obras-Subterr%C3%A1neas-baja.pdf> [Consulta: 10/01/2026].
  125. RODRÍGUEZ ORTIZ, José M<sup>ª</sup>; RODRÍGUEZ JURADO, Jesús. Túneles en terrenos salinos. *Revista de Obras Públicas*, octubre 2011, nº 3525, pp. 5–44.
  126. RODRÍGUEZ, Guillermo. Clasificación geomecánica de macizos rocosos: RMR (Bieniawski), Q (Barton) y GSI (Hoek). Comparación, limitaciones y aplicaciones [en línea]. *Centro Geotécnico Internacional*, 2025. Disponible en: <https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/clasificacion-geomecanica-de-macizos-rocosos-rmr-bieniawski-q-barton-y-gsi-hoek-comparacion-limitaciones-y-aplicaciones.html> [Consulta: 14/02/2026].
  127. ROMANA RUIZ, Manuel. Clasificación geomecánica y sostenimiento en túneles. Documentación técnica y material docente de STMR. Disponible en: <https://www.stmr.es/servicios/mecanica-de-rocas> [Consulta: 06/02/2026]
  128. ROMANA RUIZ, Manuel. *Mecánica de rocas aplicada a túneles*. Madrid: STMR – Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas, 2001. Disponible en: <https://www.stmr.es> [Consulta: 06/02/2026]
  129. ROMANA RUIZ, Manuel. *Mecánica de rocas práctica. Clasificación RMR*. Módulo 1, 2.ª ed. Madrid: STMR – Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas, 2005.

130. ROMANA RUIZ, Manuel. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. En: *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*. Zacatecas, 1985, pp. 49–53.
131. ROMANA RUIZ, Manuel. Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles en función del valor del RMR. Madrid: STMR. <https://www.stmr.es/servicios/mecanica-de-rocas> [Consulta: 06/02/2026]
132. ROMANA RUIZ, Manuel. Recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles. *Revista de Obras Públicas*, 2001, nº 3408, pp. 19-28. Disponible en: [https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2001/2001\\_marzo\\_3408\\_06.pdf](https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2001/2001_marzo_3408_06.pdf) [Consulta: 15/01/2026].
133. ROMERO GRANADOS, Wilfrido Oswaldo. Excavación de túneles empleando el método convencional [tesis digital]. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2013. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/marzo/0691081/0691081.pdf> [Consulta: 22/02/2026].
134. ROMERO GRANADOS, Wilfrido Oswaldo. Excavación de túneles empleando el método convencional [tesis digital]. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2013. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/marzo/0691081/0691081.pdf> [Consulta: 22/02/2026].
135. ROMERO GRANADOS, Wilfrido Oswaldo. Excavación de túneles empleando el método convencional [tesis digital]. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013. Disponible en: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/marzo/0691081/0691081.pdf> [Consulta: 22/02/2026].
136. ROSAS, Juan José. Escudos para perforar. 200 años de evolución [en línea]. GeoJuanjo, noviembre 2012. Disponible en: <https://geojuanjo.blogspot.com/2012/11/escudos-para-perforar-200-anos-de.html> [Consulta: 23/11/2025]
137. RUIZ, P.; ESPINOSA, J.; PALMA, A.; FERNÁNDEZ, E. La construcción del túnel minero “Sur, Los Bronces” en Los Andes con TBM doble escudo. *Revista de Obras Públicas*, septiembre 2012, nº 3535. Disponible en:

- [https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2012/2012\\_%20septiembre\\_3535\\_%2004.pdf](https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2012/2012_%20septiembre_3535_%2004.pdf)  
[Consulta: 25/02/2026].
138. s.a. *túnel* [en línea]. s.f. Disponible en: <https://www.elcastellano.org/palabra/túnel>  
[Consulta: 25/11/2025].
139. S.A. Túnel del Corno. Línea de Alta Velocidad. Emboquille y visera con chapa Bernold [en línea]. Disponible en: [https://pttp.es/Downloads/Informacion/06%20TUNEL\\_DEL\\_CORNO.pdf](https://pttp.es/Downloads/Informacion/06%20TUNEL_DEL_CORNO.pdf) [Consulta: 13/01/2026].
140. SANTOS COLQUE, Edwin; RODRÍGUEZ REBOLLEDO, Juan F.; AUVINET, Gabriel. Simulación numérica tridimensional de la excavación de túneles en suelos blandos con TBM-EPB. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 2014, vol. 9, nº 3, pp. 195–199.
141. SAROGLU, H. The challenge of rock mass classification of anisotropic rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, vol. 58, pp. 11195–11215. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/394315501\\_The\\_Challenge\\_of\\_Rock\\_Mass\\_Classification\\_of\\_Anisotropic\\_Rockmasses](https://www.researchgate.net/publication/394315501_The_Challenge_of_Rock_Mass_Classification_of_Anisotropic_Rockmasses) [Consulta: 18/02/2026].
142. SEEQUENT. El asombroso planeta Tierra: primero construya su túnel, luego húngalo [en línea]. 27 junio 2023. Disponible en: <https://www.seequent.com/es/el-asombroso-planeta-tierra-primero-construya-su-tunel-luego-hungalo/> [Consulta: 08/12/2025]
143. SERRANO, Alcibiades. La incertidumbre en el proyecto de un túnel. Conferencia inaugural, *Máster de Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid, 2009.
144. SHARMA, Shivam, et al. Applications of geophysical methods in tunnel and oil exploration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 889, 012015. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/889/1/012015> [Consulta: 21/01/2026].
145. SIMIC, Davor. Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. *IV Edición Máster en Túneles y Obras Subterráneas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
146. SINGH, Jagendra; et al. AI-driven innovations in tunnel construction and transport. *The Open Transportation Journal*, 2025, vol. 19. Disponible en: <https://opentransportationjournal.com/VOLUME/19/ELOCATOR/e26671212383139/FULLTEXT/> [Consulta: 04/02/2026].
147. TANG, Yu; YANG, Junsheng; WANG, Shanyong; WANG, Shaofeng. Analysis of rock cuttability based on excavation parameters of TBM. *Geomechanics and Geophysics for Geo-*

- Energy and Geo-Resources*, 2023, vol. 9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00628-x> [Consulta: 19/01/2026].
148. TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. 2ª ed. Buenos Aires: Editorial El Ateneo, 1955. (Edición original en inglés: 1948).
149. THE BORING COMPANY. *TBM 2.0: Continuous Tunnelling Concept* [en línea]. 2021. Disponible en: <https://www.boringcompany.com> [Consulta: 02/12/2025].
150. THE CHINA GUIDE. *Longmen Grottoes* [en línea]. Disponible en: <https://www.thechinaguide.com/es/sight/longmen-grottoes> [Consulta: 26/11/2025].
151. TOMLINSON, M. J. *Diseño y construcción de cimientos*. Bilbao: URMO, 1982.
152. U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) *EM 1110-2-2901: Tunnels and Shafts in Rock* [en línea]. Washington D.C., 1997. Disponible en: [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/IAG/Files/31\\_Tunnels\\_and\\_Shafts\\_in\\_Rock-USACE.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IAG/Files/31_Tunnels_and_Shafts_in_Rock-USACE.pdf) [Consulta: 07/12/2025].
153. VELASCO, Álex. Xataka [en línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/otros/a-grandes-tuneles-gigantescas-tuneladoras-asi-s-880-qin-liangyu-mayor-maquina-perforadora-mundo> [Consulta: 28/11/2025]
154. VIDAL PARDAL, Manuel. Construcción de túneles (artículo histórico). *Revista de Obras Públicas*, 1946. Disponible en: [https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1946/1946\\_tomol\\_2769\\_04.pdf](https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1946/1946_tomol_2769_04.pdf) [Consulta: 06/03/2026].
155. WARREN, S. N.; KALLU, R. R.; BARNARD, C. K. Correlation of the Rock Mass Rating (RMR) System with the Unified Soil Classification System (USCS): Introduction of the Weak Rock Mass Rating System (W-RMR). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, pp. 4505–4521. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/308339408\\_Correlation\\_of\\_the\\_Rock\\_Mass\\_Rating\\_RMR\\_System\\_with\\_the\\_Unified\\_Soil\\_Classification\\_System\\_USCS\\_Introduction\\_of\\_the\\_Weak\\_Rock\\_Mass\\_Rating\\_System\\_W-RMR](https://www.researchgate.net/publication/308339408_Correlation_of_the_Rock_Mass_Rating_RMR_System_with_the_Unified_Soil_Classification_System_USCS_Introduction_of_the_Weak_Rock_Mass_Rating_System_W-RMR) [Consulta: 14/01/2026].
156. WILTON, James L. “Cut-and-Cover Tunnel Structures”. En: KUESEL, Thomas R.; BICKEL, Elwyn H.; KING, Thomas (eds.). *Tunnel Engineering Handbook*. 2nd ed. New York: Chapman & Hall, 1995, pp. 455–492. ISBN 978-0-412-54070-6
157. WORLD HISTORY ENCYCLOPEDIA. *Qanat* [en línea]. Disponible en: <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-14634/qanat/> [Consulta: 25/11/2025].

158. YEPES, Víctor. Jet grouting [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2019. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/02/jet-grouting/> [Consulta: 17/01/2026].
159. YEPES, Víctor. Método “cut and cover” de construcción de túneles [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2015. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/06/22/metodo-cut-and-cover-de-construccion-de-tuneles/> [Consulta: 02/12/2025].
160. YEPES, Víctor. Método belga de construcción de túneles [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2013. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/12/21/metodo-belga-de-construccion-de-tuneles/> [Consulta: 08/01/2026].
161. YEPES, Víctor. Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2020. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/wp-content/uploads/2016/01/Cimientos.pdf> [Consulta: 02/02/2026].
162. YEPES, Víctor. Sostenimientos de un túnel según el índice Q de Barton [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, s.f. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2023/01/Clasificacion-de-Barton.pdf> [Consulta: 02/02/2026].
163. YEPES, Víctor. Tuneladoras de frente en presión de lodos: los hidroescudos [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2020. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/04/29/tuneladoras-de-frente-en-presion-de-lodos-los-hidroescudos/> [Consulta: 07/03/2026].
164. YEPES, Víctor. Túneles: perforación y voladura [en línea]. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2023. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2023/04/04/tuneles-perforacion-y-voladura/> [Consulta: 27/01/2026].
165. ZHANG, Fu-sheng; XU, Jia-zhong; ZU, Lei. The buckling behavior of radome with different braided angles under wind loading based on CFRP. *Composite Structures*, 2017, vol. 180, pp. 904–913. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.059> [Consulta: 12/02/2026].

## 9. ANEXOS

## 9.1. PORTADA INSTITUCIONAL Y PORTADA DE CONTROL



# HERRAMIENTA PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO Y ESTUDIO DE OBRAS LINEALES SUBTERRÁNEAS

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MASTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

AUTOR:	MARTÍN GONZÁLEZ ADÁN
DIRECTOR:	DR. D. CARLOS BARBA ÁVILA
CURSO ACADÉMICO	2025 - 2026



## HERRAMIENTA PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO Y ESTUDIO DE OBRAS LINEALES SUBTERRÁNEAS

VERSIÓN 1.0 HERRAMIENTA PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO Y ESTUDIO ECONÓMICO

### DATOS DE PROYECTO

PROYECTO:	
UBICACIÓN:	
FECHA:	
VERSIÓN:	
RESPONSABLE:	

ENTRADA DE DATOS

CLASIFICACIONES

CONVERGENCIA

PRODUCCIÓN Y COSTE

RESULTADO FINAL

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**9.2. DATOS DEL TRAZADO INICIALES OBTENIDOS DEL PROYECTO**

DATOS DE ENTRADA DEL TRAZADO - GE								
IDENTIFICACIÓN			CONTEXTO GEOLÓGICO			HIDROGEOLOGÍA		GEOMETRÍA
ID	PK_Ini	PK_Fin	Tipo_Terreno	Litología	Unidad_geologica	Nivel_freatico_m	Condicion_Agua	Seccion_Tipo
1	0,00	15,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
2	15,00	118,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BAJO_COBERTURA	SECO	BOVEDA
3	118,00	133,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
4	133,00	143,00	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO	BOVEDA
5	143,00	158,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
6	158,00	222,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BAJO_COBERTURA	SECO	BOVEDA
7	222,00	237,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
8	237,00	247,00	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO	BOVEDA
9	247,00	262,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
10	262,00	372,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BAJO_COBERTURA	SECO	BOVEDA
11	372,00	387,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
12	387,00	397,00	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO	BOVEDA
13	397,00	412,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA
14	412,00	699,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BAJO_COBERTURA	SECO	BOVEDA
15	699,00	714,00	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BAJO_COBERTURA	GOTEO	BOVEDA



**9.3. DATOS OBTENIDOS DE LA HOJA DE PARTICIÓN DE SECCIÓN**

04_PARTICION_TRAMOS-GENERACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS									
IDENTIFICACIÓN DE TRAMO						GEOMETRÍA DEL TÚNEL		CONDICIONES HIDROGEOLOGÍCAS	
ID_Out	PK_ini_out	PK_fin_out	Tipo_out	Litología_out	Un_geo_out	Seccion_Tipo	Diametro_Exc_m	Nivel_Frea_m	Condicion_Agua
1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	SECO
3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	BOVEDA	13	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO
5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	SECO
7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	BOVEDA	13	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO
9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	SECO
11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	BOVEDA	13	SOBRE_COBERTURA	HUMEDO
13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO
14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	SECO
15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BOVEDA	13	BAJO_COBERTURA	GOTEO

PUNOS Y TRANSICIONES						
ENTORNO	DATOS PROGRAMA					
Entorno	ID_FINAL	PK_INI_FINAL	PK_FIN_FINAL	TIPO_FINAL	ID_REF	AVISO_04
MONTAÑA	1	0	15	ROCA	1	
MONTAÑA	2	15	118	ROCA	2	
MONTAÑA	3	118	133	ROCA	3	
MONTAÑA	4	133	143	ROCA	4	
MONTAÑA	5	143	158	ROCA	5	
MONTAÑA	6	158	222	ROCA	6	
MONTAÑA	7	222	237	ROCA	7	
MONTAÑA	8	237	247	ROCA	8	
MONTAÑA	9	247	262	ROCA	9	
MONTAÑA	10	262	372	ROCA	10	
MONTAÑA	11	372	387	ROCA	11	
MONTAÑA	12	387	397	ROCA	12	
MONTAÑA	13	397	412	ROCA	13	
MONTAÑA	14	412	699	ROCA	14	
MONTAÑA	15	699	714	ROCA	15	

## 9.4. CÁLCULO DE CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

### 9.4.1. CÁLCULO DE CLASIFICACIÓN RMR

DATOS DE PROYECTO						
Tramo_ID	ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	LITOLOGIA	UNIDAD_GEOLOGICA
1	1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO
2	2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
3	3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
4	4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
5	5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
6	6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
7	7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
8	8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
9	9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
10	10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
11	11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
12	12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
13	13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
14	14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
15	15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO

ENTRADA DATOS		RESISTENCIA ROCA		
Modo	RMR_directo	Tipo_Resistencia	UCS_Mpa	IS50_Mpa
CALCULO		UCS	80,00	
CALCULO		UCS	100,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	35,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	100,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	35,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	100,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	35,00	
CALCULO		UCS	70,00	
CALCULO		UCS	110,00	
CALCULO		UCS	80,00	

	CALIDAD MACIZO	ESPACIAMIENTO DISCONT.	CONDICIÓN JUNTAS	
Aviso_Res	RQD_%	Espaciamiento_m	Condición_Junta	Modo_Agua
	70,00	1,2	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	85,00	2,5	Muy rugosas. No continuas. Cerradas. Bordes sanos y duros.	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	30,00	0,15	Relleno blando > 5 mm / Separación > 5mm. Continuas	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	85,00	2,5	Muy rugosas. No continuas. Cerradas. Bordes sanos y duros.	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	30,00	0,15	Relleno blando > 5 mm / Separación > 5mm. Continuas	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	85,00	2,5	Relleno blando > 5 mm / Separación > 5mm. Continuas	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	30,00	0,15	Relleno blando > 5 mm / Separación > 5mm. Continuas	TEXTO
	55,00	0,4	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO
	85,00	2,5	Muy rugosas. No continuas. Cerradas. Bordes sanos y duros.	TEXTO
	70,00	1,2	Algo rugosas. Separación < 1 mm. Bordes algo meteorizados	TEXTO

CLASIFICACIÓN RMR - CÁLCULO POR TRAMOS				
CONDICIONES DE AGUA				
Categoría	Tipo_Agua	L <sub>mín_10m</sub>	P_Intersticial	Aviso_Ag
LIGERAMENTE HÚMEDO				
SECO				
GOTEANDO				
HÚMEDO				
GOTEANDO				
SECO				
GOTEANDO				
HÚMEDO				
GOTEANDO				
SECO				
GOTEANDO				
HÚMEDO				
GOTEANDO				
SECO				
LIGERAMENTE HÚMEDO				

ORIENTACIÓN DISCONTINUIDADES				PUNTUACIÓN PARÁMETROS			
Direccion_Eje	Sentido_Excavacion	Rango_Buzamiento	Categoria	P_UCS	P_RQD	P_Esp	P_Cond
Paralela	-	20_45	Media	7	13	15	25
Paralela	-	20_45	Favorable	7	14	20	30
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	45_90	Muy favorable	4	8	8	0
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	20_45	Favorable	7	14	20	30
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	45_90	Muy desfavorable	4	8	8	0
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	20_45	Favorable	7	14	20	0
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	45_90	Muy desfavorable	4	8	8	0
Paralela	-	45_90	Desfavorable	7	13	10	25
Paralela	-	45_90	Favorable	12	14	20	30
Paralela	-	45_90	Media	7	13	15	25

	RMR BÁSICO	CORREC. ORIENT	RESULTADO FINAL		CONTROL DE INCERTIDU		
P_Agua	RMRb	P_Orient	RMR_calc	V_RMR	IC_RMR	IT_RMR	IVC_RMR
10	70	-5	65	65	100,00%	1	1,00
15	86	-5	81	81	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
7	27	-12	15	15	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
15	86	-5	81	81	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
7	27	-12	15	15	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
15	56	-5	51	51	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
7	27	-12	15	15	100,00%	1	1,00
4	59	-12	47	47	100,00%	1	1,00
15	91	-12	79	79	100,00%	1	1,00
10	70	-12	58	58	100,00%	1	1,00

MBRE		RANGO RMR		VALIDEZ
k_RMR	Delta_RMR	RMR_Min	RMR_max	Valida
10	0,00	65,00	65,00	RMR VALIDO
10	0,00	81,00	81,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	15,00	15,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	81,00	81,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	15,00	15,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	51,00	51,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	15,00	15,00	RMR VALIDO
10	0,00	47,00	47,00	RMR VALIDO
10	0,00	79,00	79,00	RMR VALIDO
10	0,00	58,00	58,00	RMR VALIDO

9.4.2. CÁLCULO DE LA CLASIFICACIÓN Q-BARTON

DATOS DE PROYECTO						
Tramo_ID	ID_REF	PK_INI	PK_FN	TIPO_TERRENO	LITOLOGIA	UNIDAD_GEOLOGICA
1	1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO
2	2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
3	3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
4	4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
5	5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
6	6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
7	7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
8	8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
9	9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
10	10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
11	11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
12	12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
13	13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
14	14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
15	15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO

ENTRADA DE DATOS				
Jn_sel	Jr_sel	Ja_sel	Jw_sel	SRF_sel
Tres familia de juntas	Onduladas, lisas	Ligera alteración	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Dos familia de juntas	Onduladas, rugosas	Juntas de paredes sanas	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Cobertura media
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Cuatro o mas familias. Roca muy fracturada	Planas, lisas	Alteraciones arcillosas	Afluencia importante por juntas limpias	Zonas debiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Dos familia de juntas	Onduladas, rugosas	Juntas de paredes sanas	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Cobertura media
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Cuatro o mas familias. Roca muy fracturada	Planas, lisas	Alteraciones arcillosas	Afluencia importante por juntas limpias	Zonas debiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Dos familia de juntas	Onduladas, rugosas	Juntas de paredes sanas	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Cobertura media
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Cuatro o mas familias. Roca muy fracturada	Planas, lisas	Alteraciones arcillosas	Afluencia importante por juntas limpias	Zonas debiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura
Tres familia de juntas con otras juntas ocasionales	Planas, rugosas o irregulares	Ligera alteración	Afluencia media con lavado de algunas juntas	Zonas debiles aisladas en roca competente con cobertura <50m
Dos familia de juntas	Onduladas, rugosas	Juntas de paredes sanas	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Cobertura media
Tres familia de juntas	Onduladas, lisas	Ligera alteración	Excavaciones secas o con presencia de caudales <	Zonas debiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta con cobertura

ASIFICACIÓN Q - CÁLCULO POR TRAMOS							
RQD_%	RANGOS DE DATOS						
	JN_min	JN_max	JR_min	JR_max	JA_min	JA_max	JW_min
70,00	9	9	2	2	2	2	1
85,00	4	4	3	3	0,75	1	1
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
30,00	15	15	1	1	4	4	0,5
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
85,00	4	4	3	3	0,75	1	1
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
30,00	15	15	1	1	4	4	0,5
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
85,00	4	4	3	3	0,75	1	1
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
30,00	15	15	1	1	4	4	0,5
55,00	12	12	1,5	1,5	2	2	0,66
85,00	4	4	3	3	0,75	1	1
70,00	9	9	2	2	2	2	1

			PUNTUACIÓN PARÁMETROS						RESULTADO FINAL		VALIDEZ	
JW_max	SRF_min	SRF_max	RQD	JN	JR	JA	JV	SRF	Q_b	Q_calc	AVISO_Q	Valida
1	5	5	70	9	2	2	1	5	1,56	1,56	OK	Q VAUDO
1	1	1	85	4	3	1	1	1	63,75	63,75	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
0,5	5	5	30	15	1	4	0,5	5	0,05	0,05	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
1	1	1	85	4	3	1	1	1	63,75	63,75	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
0,5	5	5	30	15	1	4	0,5	5	0,05	0,05	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
1	1	1	85	4	3	1	1	1	63,75	63,75	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
0,5	5	5	30	15	1	4	0,5	5	0,05	0,05	OK	Q VAUDO
0,66	5	5	55	12	1,5	2	0,66	5	0,45	0,45	OK	Q VAUDO
1	1	1	85	4	3	1	1	1	63,75	63,75	OK	Q VAUDO
1	5	5	70	9	2	2	1	5	1,56	1,56	OK	Q VAUDO

### 9.4.3. CÁLCULO DE CLASIFICACIÓN GSI HOEK Y MARINOS

CLASIFICACIÓN GSI - CÁLCULO							
DATOS DE PROYECTO							
Tramo_ID	ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	LITOLOGIA	UNIDAD_GEOLOGICA	ESTRUCTURA_SEL
1	1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BLOQUES_REGULARES
2	2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	MASIVO
3	3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
4	4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	FRACTURACION_INTENSA
5	5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
6	6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	MASIVO
7	7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
8	8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	FRACTURACION_INTENSA
9	9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
10	10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	MASIVO
11	11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
12	12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	FRACTURACION_INTENSA
13	13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	BLOQUES_IRREGULARES
14	14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	MASIVO
15	15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	BLOQUES_REGULARES

POR TRAMOS				
DATOS ENTRADA		RESULTADOS		
CONDICION_SEL	Clave_GSI	GSI_CALC_MIN	GSI_CALC_MAX	GSI_CALC
BUENA	BLOQUES_REGULARES_BUENA	55	80	55
MUY_BUENA	MASIVO_MUY_BUENA	75	100	75
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
POBRE	FRACTURACION_INTENSA_POBRE	15	30	15
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
MUY_BUENA	MASIVO_MUY_BUENA	75	100	75
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
POBRE	FRACTURACION_INTENSA_POBRE	15	30	15
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
MUY_BUENA	MASIVO_MUY_BUENA	75	100	75
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
POBRE	FRACTURACION_INTENSA_POBRE	15	30	15
MEDIA	BLOQUES_IRREGULARES_MEDIA	40	55	40
MUY_BUENA	MASIVO_MUY_BUENA	75	100	75
BUENA	BLOQUES_REGULARES_BUENA	55	80	55

#### 9.4.4. CÁLCULO DE LA CLASIFICACIÓN DE ROMANA

DATOS DE PROYECTO							ENTRADA DATOS	
Tramo_ID	ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	LITOLOGIA	UNIDAD_GEOLOGICA	Modo	RMR_directo
1	1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	DIRECTO	65
2	2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	DIRECTO	81
3	3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
4	4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	DIRECTO	15
5	5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
6	6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	DIRECTO	81
7	7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
8	8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	DIRECTO	15
9	9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
10	10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	DIRECTO	51
11	11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
12	12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL	DIRECTO	15
13	13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO	DIRECTO	47
14	14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO	DIRECTO	79
15	15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO	DIRECTO	58

RMR BÁSICO							
RMR BÁSICO	CORREC. ORIENT	RESULTADO FINAL		CONTROL DE INCERTIDUMBRE			
ROMANAb	P_Orient	ROMANA_calc	V_ROMANA	IC_ROMANA	IT_ROMANA	IVC_ROMANA	k_ROMANA
65		65	65	100,00%	0,8	0,80	10
81		81	81	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
15		15	15	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
81		81	81	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
15		15	15	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
51		51	51	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
15		15	15	100,00%	0,8	0,80	10
47		47	47	100,00%	0,8	0,80	10
79		79	79	100,00%	0,8	0,80	10
58		58	58	100,00%	0,8	0,80	10

	RANGO ROMANA		VALIDEZ
Delta_ROMANA	ROMANA_Min	ROMANA_max	Valida
2,00	63,00	67,00	ROMANA VALIDO
2,00	79,00	83,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	13,00	17,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	79,00	83,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	13,00	17,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	49,00	53,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	13,00	17,00	ROMANA VALIDO
2,00	45,00	49,00	ROMANA VALIDO
2,00	77,00	81,00	ROMANA VALIDO
2,00	56,00	60,00	ROMANA VALIDO

## 9.5. RESUMEN DE CLASIFICACIONES, REGLAS TÉCNICAS, MATRIZ DE COMPATIBILIDAD Y SOLUCIONES OBTENIDAS

### 9.5.1. RESUMEN DE LAS CLASIFICACIONES

DATOS DE PROYECTO							
Tramo_ID	Tramo_ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	RMR_CALC	RMR_CALC_MIN	RMR_CALC_MAX
1	1	0	15	ROCA	65	65,00	65,00
2	2	15	118	ROCA	81	81,00	81,00
3	3	118	133	ROCA	47	47,00	47,00
4	4	133	143	ROCA	15	15,00	15,00
5	5	143	158	ROCA	47	47,00	47,00
6	6	158	222	ROCA	81	81,00	81,00
7	7	222	237	ROCA	47	47,00	47,00
8	8	237	247	ROCA	15	15,00	15,00
9	9	247	262	ROCA	47	47,00	47,00
10	10	262	372	ROCA	51	51,00	51,00
11	11	372	387	ROCA	47	47,00	47,00
12	12	387	397	ROCA	15	15,00	15,00
13	13	397	412	ROCA	47	47,00	47,00
14	14	412	699	ROCA	79	79,00	79,00
15	15	699	714	ROCA	58	58,00	58,00

RESUMEN DE CLASIFICACIONES POR TRAMO						
VALORES DE CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS						
Q_CALC	GSI_CALC	GSI_CALC_MIN	GSI_CALC_MAX	ROMANA_CALC	ROMANA_CALC_MIN	ROMANA_CALC_MAX
1,56	55	55	80	65	63,00	67,00
63,75	75	75	100	81	79,00	83,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
0,05	15	15	30	15	13,00	17,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
63,75	75	75	100	81	79,00	83,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
0,05	15	15	30	15	13,00	17,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
63,75	75	75	100	51	49,00	53,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
0,05	15	15	30	15	13,00	17,00
0,45	40	40	55	47	45,00	49,00
63,75	75	75	100	79	77,00	81,00
1,56	55	55	80	58	56,00	60,00

CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS Y GEOLÓGICAS				
USCS_CALC	CLASE_RMR	CLASE_Q	CLASE_GSI	CLASE_ROMANA
	CLASE_II_BUENA	MALA	BUENA	CLASE_IIB_BUENA_MEDIA
	CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY_BUENA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY_BUENA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IIIA_MEDIA_BUENA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
	CLASE_II_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY_BUENA
	CLASE_III_MEDIA	MALA	BUENA	CLASE_IIIA_MEDIA_BUENA

### 9.5.2. REGLAS TÉCNICAS

#### 9.5.2.1. Reglas técnicas sobre métodos constructivos en roca

METODO	RMR_MIN	RMR_MAX	Q_MIN	Q_MAX	GSI_MIN	GSI_MAX	ROMANA_MIN
NATM	30,00	80,00	0,10	70	35	80	40
PERFORACION_VOLADURA	50,00	100,00	5,00	1000	40	100	40
ROZADORA	30,00	70,00	0,20	15	30	65	25
TBM_GRIPPER	60,00	100,00	10,00	1000	60	100	60
ESCUDO_SIMPLE	20,00	80,00	1,00	50	45	80	40
ESCUDO_DOBLE	40,00	100,00	4,00	1000	55	100	50
CUT_AND_COVER	0,00	20,00	0,00	10	0	30	0
METODO_ALEMAN	20,00	75,00	0,10	30	30	40	40
METODO_INGLES	30,00	65,00	0,10	20	35	60	30
METODO_BELGA_MADRID	20,00	55,00	0,10	10	25	50	20

ROMANA_MAX	L_MIN_TUNEL_m	L_MAX_TUNEL_m	RADIO_MIN_m	RADIO_MAX_m	COBERTURA_MIN_m
85	0	5000	50	9999	5
100	0	9999	30	9999	5
70	0	4000	80	9999	5
100	4500	20000	300	9999	50
80	4500	20000	300	9999	10
100	4500	20000	300	9999	20
25	0	1000	0	9999	0
75	0	5000	50	9999	5
60	0	5000	50	9999	5
50	0	4000	50	9999	5

COBERTURA_MAX_m	NIVEL_FREATICO
800	BAJO_COBERTURA
1500	BAJO_COBERTURA
800	BAJO_COBERTURA
1500	BAJO_COBERTURA
100	SOBRE_COBERTURA
1500	BAJO_COBERTURA
30	SOBRE_COBERTURA
800	BAJO_COBERTURA
800	BAJO_COBERTURA
800	BAJO_COBERTURA

## 9.5.2.2. Reglas técnicas sobre métodos constructivos en suelos

METODO	USCS	L_MIN_TUNEL_m	L_MAX_TUNEL_m	RADIO_MIN_m	COBERTURA_MIN_m	COBERTURA_MAX_m	NIVEL_FREATICO
CUT_AND_COVER	GW	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	GW	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
HYDROSHIELD	GW	1000	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
CUT_AND_COVER	GP	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	GP	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
HYDROSHIELD	GP	1000	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
CUT_AND_COVER	GM	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	GC	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	SW	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	SW	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
HYDROSHIELD	SW	1000	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
CUT_AND_COVER	SP	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	SP	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
HYDROSHIELD	SP	1000	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
CUT_AND_COVER	SM	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	SM	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
ESCUDO_DOBLE	SM	500	20000	300	5	100	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	SC	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
SLURRY_SHIELD	SC	500	20000	300	10	100	SOBRE_COBERTURA
ESCUDO_DOBLE	SC	500	20000	300	5	100	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	ML	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	ML	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_SIMPLE	ML	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_DOBLE	ML	500	20000	300	5	100	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	CL	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	CL	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_SIMPLE	CL	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_DOBLE	CL	500	20000	300	5	100	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	MH	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	MH	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_SIMPLE	MH	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	CH	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	CH	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
ESCUDO_SIMPLE	CH	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	OL	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	OL	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	OH	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA
EPB	OH	500	20000	300	5	80	CUALQUIERA
CUT_AND_COVER	PT	0	2000	0	0	30	CUALQUIERA

9.5.2.3. Reglas técnicas sobre métodos de excavación para los métodos constructivos

METODO_CONSTRUCTIVO	METODO_EXCAVACION
NATM	PERFORACION_VOLADURA
NATM	ROZADORA
NATM	VOLADURA_MECANIZADO
METODO_ALEMAN	PERFORACION_VOLADURA
METODO_ALEMAN	MECANIZADO
METODO_ALEMAN	MANUAL
METODO_INGLES	MECANIZADO
METODO_INGLES	PERFORACION_VOLADURA
METODO_INGLES	MANUAL
METODO_BELGA_MADRID	PERFORACION_VOLADURA
METODO_BELGA_MADRID	MANUAL
METODO_BELGA_MADRID	MECANIZADO
PERFORACION_VOLADURA	PERFORACION_VOLADURA
ROZADORA	ROZADORA
TBM_GRIPPER	TBM
ESCUDO_SIMPLE	TBM
ESCUDO_DOBLE	TBM
EPB	TBM
SLURRY_SHIELD	TBM
HYDROSHIELD	TBM
CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA

9.5.2.4. Sección de excavación para métodos constructivos

METODO_CONSTRUCTIVO	SECCION_EXCAVACION
NATM	CALOTA_DESTROZA
NATM	AVANCE_DESTROZA
NATM	SECCION_COMPLETA
METODO_ALEMAN	HASTIALES_BOVEDA_DESTROZA
METODO_INGLES	AVANCE_DESTROZA
METODO_BELGA_MADRID	BOVEDA_HASTIALES_DESTROZA
PERFORACION_VOLADURA	SECCION_COMPLETA
PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
ROZADORA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	CALOTA_DESTROZA
TBM_GRIPPER	SECCION_COMPLETA
ESCUDO_SIMPLE	SECCION_COMPLETA
ESCUDO_DOBLE	SECCION_COMPLETA
EPB	SECCION_COMPLETA
SLURRY_SHIELD	SECCION_COMPLETA
HYDROSHIELD	SECCION_COMPLETA
CUT_AND_COVER	SECCION_COMPLETA

9.5.2.5. Longitudes de avance recomendadas por Bieniawski (RMR)

CLASIFICACION	CLASE_MIN	CLASE_MAX	AVANCE_MIN_m	AVANCE_MAX_m	SECCION_EXCAVACION
RMR	81	100	3,0	4,0	SECCION_COMPLETA
RMR	61	80	1	1,5	SECCION_COMPLETA
RMR	41	60	1,5	3	AVANCE_DESTROZA
RMR	21	40	1	1,5	AVANCE_DESTROZA
RMR	0	20	0,5	1,5	GALERIAS_MULTIPLES

9.5.2.6. Longitudes de avance recomendadas por Romana

CLASIFICACION	CLASE_MIN	CLASE_MAX	AVANCE_MIN_m	AVANCE_MAX_m	SECCION_EXCAVACION
ROMANA	91	100	5	9999	SECCION_COMPLETA
ROMANA	81	90	5	9999	SECCION_COMPLETA
ROMANA	71	80	5	1,6	SECCION_COMPLETA
ROMANA	61	70	4	9,5	CALOTA_DESTROZA
ROMANA	51	60	3	6	CALOTA_DESTROZA
ROMANA	41	50	2	4	CALOTA_DESTROZA
ROMANA	31	40	1	2,5	GALERIA_AVANCE
ROMANA	21	30	1	1,75	GALERA_AVANCE
ROMANA	11	20	0,3	1	GALERIAS_MULTIPLES
ROMANA	0	10	0,5	1	CONTRABOVEDA

9.5.2.7. Sostenimientos para los métodos constructivos

METODO_CONSTRUCTIVO	SOSTENIMIENTO
NATM	HORMIGON_PROYECTADO
NATM	HORMIGON_PROYECTADO + BULONES
NATM	HORMIGON_PROYECTADO + CERCHAS
NATM	CERCHAS
METODO_ALEMAN	HORMIGON_PROYECTADO
METODO_INGLES	CERCHAS
METODO_BELGA_MADRID	CERCHAS + HORMIGON_PROYECTADO
PERFORACION_VOLADURA	HORMIGON_PROYECTADO
ROZADORA	HORMIGON_PROYECTADO
TBM_GRIPPER	BULONES
TBM_GRIPPER	HORMIGON_PROYECTADO
ESCUDO_SIMPLE	DOVELAS
ESCUDO_DOBLE	DOVELAS
EPB	DOVELAS
SLURRY_SHIELD	DOVELAS
HYDROSHIELD	DOVELAS
CUT_AND_COVER	HORMIGON_PROYECTADO_PANTALLAS

9.5.3. MATRIZ DE COMPATIBILIDAD

DATOS DE PROYECTO					CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS Y GEOLÓGICAS			
Tramo_ID	Tramo_ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	USCS	CLASE_RMR	CLASE_Q	CLASE_GSI
1	1	0	15	ROCA		CLASE_II_BUENA	MALA	BUENA
2	2	15	118	ROCA		CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
3	3	118	133	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
4	4	133	143	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
5	5	143	158	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
6	6	158	222	ROCA		CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
7	7	222	237	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
8	8	237	247	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
9	9	247	262	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
10	10	262	372	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
11	11	372	387	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
12	12	387	397	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
13	13	397	412	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
14	14	412	699	ROCA		CLASE_II_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
15	15	699	714	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MALA	BUENA

DATOS DE PROYECTO					CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS Y GEOLÓGICAS			
Tramo_ID	Tramo_ID_REF	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	USCS	CLASE_RMR	CLASE_Q	CLASE_GSI
1	1	0	15	ROCA		CLASE_II_BUENA	MALA	BUENA
2	2	15	118	ROCA		CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
3	3	118	133	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
4	4	133	143	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
5	5	143	158	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
6	6	158	222	ROCA		CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
7	7	222	237	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
8	8	237	247	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
9	9	247	262	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
10	10	262	372	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
11	11	372	387	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
12	12	387	397	ROCA		CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE
13	13	397	412	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR
14	14	412	699	ROCA		CLASE_II_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA
15	15	699	714	ROCA		CLASE_III_MEDIA	MALA	BUENA

SELECCIÓN DE PROCESO CONSTRUCTIVO					
MÉTODOS CONSTRUCTIVOS		EXCAVACIÓN			
MET_POSIBLE_2	MET_ELEGIDO	EXC_POSIBLE_1	EXC_POSIBLE_2	EXC_ELEGIDO	SEC_POSIBLE_1
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
TBM_GRIPPER	PERFORACION_VOLADURA	PERFORACION_VOLADURA		PERFORACION_VOLADURA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA		EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
TBM_GRIPPER	PERFORACION_VOLADURA	PERFORACION_VOLADURA		PERFORACION_VOLADURA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA		EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
PERFORACION_VOLADURA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA		EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
PERFORACION_VOLADURA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA
ROZADORA	NATM	PERFORACION_VOLADURA	ROZADORA	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA

SECCIÓN				
SECCIÓN		LONGITUD DE AVANCE		
SEC_POSIBLE_2	SEC_ELEGIDO	LONG_AVANCE_MIN	LONG_AVANCE_MAX	PRESOS_POSIBLE_1
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,00	4,00	NINGUNO
CALOTA_DESTROZA	SECCION_COMPLETA	5,00	5,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
	SECCION_COMPLETA	0,50	1,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
CALOTA_DESTROZA	SECCION_COMPLETA	5,00	5,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
	SECCION_COMPLETA	0,50	1,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
	SECCION_COMPLETA	0,50	1,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	2,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,00	5,00	NINGUNO
AVANCE_DESTROZA	CALOTA_DESTROZA	1,50	3,00	NINGUNO

PRESOSTENIMIENTO		SOSTENIMIENTO		
PRESOS_POSIBLE_2	PRESOS_ELEGIDO	SOST_POSIBLE_1	SOST_POSIBLE_2	SOST_ELEGIDO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO		HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO_PANTALLAS		
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO		HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO_PANTALLAS		
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO_PANTALLAS		
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO
PARAGUAS_MICROPILOTES	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO	HORMIGON_PROYECTADO + BULDNES	HORMIGON_PROYECTADO

**9.6. ANÁLISIS ECONÓMICO**

IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO				GEOMETRÍA DE EXCAVACIÓN					
ID	PK INI	PK FIN	LONG TRAMO m	SECCION TIPO	DIAMETRO	ALTURA	ANCHURA	SEC EXC m2	PERIMETRO EXC M
1	0	15	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
2	15	118	103,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
3	118	133	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
4	133	143	10,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
5	143	158	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
6	158	222	64,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
7	222	237	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
8	237	247	10,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
9	247	262	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
10	262	372	110,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
11	372	387	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
12	387	397	10,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
13	397	412	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
14	412	699	287,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84
15	699	714	15,00	CIRCULAR	13			132,73	40,84

ANALISIS ECONÓMICO Y RENDIMIENTOS								
MÉTODO CONSTRUCTIVO	PARÁMETROS DE EJECUCIÓN			DATOS DE EJECUCIÓN		MEDICIONES EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO		
METODO CONSTRUCTIVO	LONG PASE	CICLOS DIA	AVANCE DIA	HORM PROJ ESP m	BULONES x m	VOLUMEN EXC m3	SUPERFICIE SOST m2	VOLUMEN HORM PROJ
NATM	4	1	4	0,1		1990,98	612,61	61,26
PERFORACION_VOLADURA	5	1	5	0,1		13671,43	4206,59	420,66
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
CUT_AND_COVER	5	1	5			1327,32	408,41	
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
PERFORACION_VOLADURA	5	1	5	0,1		8494,87	2613,81	261,38
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
CUT_AND_COVER	5	1	5			1327,32	408,41	
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
NATM	2	1	2	0,1		14600,55	4492,48	449,25
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
CUT_AND_COVER	5	1	5			1327,32	408,41	
NATM	2	1	2	0,1		1990,98	612,61	61,26
NATM	5	1	5	0,1		38094,17	11721,28	1172,13
NATM	3	1	3	0,1		1990,98	612,61	61,26

	COSTES UNITARIOS			COSTES CALCULADOS			INDICADORES FINALES		
BULONES TRAMO Ud	COSTE EXC M3	COSTE HORM PROJ M3	COSTE BULON Ud	COSTE EXC TRAMO	COSTE HORM PROJ TRAMO	COSTE BULONES TRAMO	COSTE TOTAL TRAMO	COSTE m	DURACION TRAMO días
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	3,75
	100,00 €	300,00 €		1.367.142,58 €	126.197,78 €		1.493.340,36 €	14.498,45 €	20,6
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	80,00 €			106.185,83 €			106.185,83 €	10.618,58 €	2
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	100,00 €	300,00 €		849.486,65 €	78.414,15 €		927.900,81 €	14.498,45 €	12,8
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	80,00 €			106.185,83 €			106.185,83 €	10.618,58 €	2
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	100,00 €	300,00 €		1.460.055,19 €	134.774,32 €		1.594.829,51 €	14.498,45 €	55
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	80,00 €			106.185,83 €			106.185,83 €	10.618,58 €	2
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	7,5
	100,00 €	300,00 €		3.809.416,71 €	351.638,47 €		4.161.055,18 €	14.498,45 €	57,4
	100,00 €	300,00 €		199.098,43 €	18.378,32 €		217.476,75 €	14.498,45 €	5

## 9.7. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS



DATOS DE PROYECTO					
ID	PK_INI	PK_FIN	SECCION_TIPO	RAD_PLANT_m	ENTORNO
1	0	15	BOVEDA	1125	MONTAÑA
2	15	118	BOVEDA	1125	MONTAÑA
3	118	133	BOVEDA	1125	MONTAÑA
4	133	143	BOVEDA	1125	MONTAÑA
5	143	158	BOVEDA	1125	MONTAÑA
6	158	222	BOVEDA	1125	MONTAÑA
7	222	237	BOVEDA	1125	MONTAÑA
8	237	247	BOVEDA	1125	MONTAÑA
9	247	262	BOVEDA	1125	MONTAÑA
10	262	372	BOVEDA	1125	MONTAÑA
11	372	387	BOVEDA	1125	MONTAÑA
12	387	397	BOVEDA	1125	MONTAÑA
13	397	412	BOVEDA	1125	MONTAÑA
14	412	699	BOVEDA	1125	MONTAÑA
15	699	714	BOVEDA	1125	MONTAÑA

RESUMEN PARTICIÓN DE TRAMOS					
ID	PK_INI	PK_FIN	TIPO_TERRENO	LITOLOGIA	UNIDAD_GEOLOGICA
1	0	15	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO
2	15	118	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
3	118	133	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
4	133	143	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
5	143	158	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
6	158	222	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
7	222	237	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
8	237	247	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
9	247	262	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
10	262	372	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
11	372	387	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
12	387	397	ROCA	GRANITO	DEP.DELUVIAL
13	397	412	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.FRACTURADO
14	412	699	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.MASIVO
15	699	714	ROCA	GRANITO	MAC.ROC.ALTERADO

RESUMEN CLASIFICACIONES								
ID	RMR	Q	GSI	ROMANA	CLASE_RMR	CLASE_Q	CLASE_GSI	CLASE_ROMANA
1	65	1,56	55	63	CLASE_II_BUENA	MALA	BUENA	CLASE_IIB_BUENA_MEDIA
2	81	63,75	75	79	CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY BUENA
3	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
4	15	0,05	15	13	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
5	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
6	81	63,75	75	79	CLASE_I_MUY_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY BUENA
7	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
8	15	0,05	15	13	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
9	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
10	51	63,75	75	49	CLASE_III_MEDIA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IIA_MEDIA_BUENA
11	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
12	15	0,05	15	13	CLASE_V_MUY_MALA	EXTREMADAMENTE_MALA	POBRE	CLASE_VA_MUY_MALA
13	47	0,45	40	45	CLASE_III_MEDIA	MUY_MALA	REGULAR	CLASE_IIIB_MEDIA_MALA
14	79	63,75	75	77	CLASE_II_BUENA	MUY_BUENA	MUY_BUENA	CLASE_IB_MUY BUENA
15	58	1,56	55	56	CLASE_III_MEDIA	MALA	BUENA	CLASE_IIA_MEDIA_BUENA

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS							
ID	METODO CONSTRUCTIVO	METODO EXCAVACION	SECCION AVANCE	AVANCE MIN	AVANCE MAX	PRESOST	SOSTENIMIENTO
1	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1	4	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
2	PERFORACION_VOLADURA	PERFORACION_VOLADURA	SECCION_COMPLETA	5	5	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
3	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
4	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA	0,5	1	NINGUNO	
5	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
6	PERFORACION_VOLADURA	PERFORACION_VOLADURA	SECCION_COMPLETA	5	5	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
7	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
8	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA	0,5	1	NINGUNO	
9	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
10	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
11	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
12	CUT_AND_COVER	EXCAVACION_ABIERTA	SECCION_COMPLETA	0,5	1	NINGUNO	
13	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	2	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
14	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1	5	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO
15	NATM	PERFORACION_VOLADURA	CALOTA_DESTROZA	1,5	3	NINGUNO	HORMIGON_PROYECTADO