



**Universidad  
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**

**ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**GRADO EN SISTEMAS INDUSTRIALES,  
MENCIÓN EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**EFECTO DE NANOPARTÍCULAS BASE  
CARBONO EN EL COMPORTAMIENTO  
REOLÓGICO DE ACEITES LUBRICANTES**

**Alumno: D. Alberto López Fraile**

**Directores: Dra. Arisbel Cerpa Naranjo**

**Dr. Javier Pérez Piñeiro**

**JUNIO 2022**

Efecto de nanopartículas base carbono en  
el comportamiento reológico de aceites lubricantes



Alberto López Fraile

---

**TÍTULO:** Efecto de nanopartículas base carbono en el comportamiento reológico de aceites lubricantes

**AUTOR:** D. Alberto López Fraile

**DIRECTORES DEL PROYECTO:** Dra. Arisbel Cerpa Naranjo y Dr. Javier Pérez Piñeiro

**FECHA:** 28 de JUNIO de 2022

## Resumen

El estudio de las posibles aplicaciones de las nanopartículas de base carbono en la industria es un tema muy investigado hoy en día. Su estructura atómica única y versatilidad hacen que este tipo de materiales sean muy deseados en el descubrimiento de nuevos materiales o en la mejora de los ya existentes. La aplicación estudiada en este trabajo es la mejoría de las propiedades de los aceites lubricantes de motor comerciales SAE 5W40, 10W40 y 0W30; frente a altas concentraciones de nanoplaquetas de grafeno, nanofibras de carbono y óxidos de grafeno. Además, se estudiará también su comportamiento a diferentes rangos de temperaturas.

**Palabras clave:** nanopartículas, aceites lubricantes, carbono, grafeno

## Abstract

The study of the possible applications of carbon based nanoparticles in the industry is a much researched subject nowadays. Its unique atomic structure and versatility make this kind of materials very desired in the discovery of new materials or the improvement of existing ones. The application studied within this paper is the property improvement of commercial engine lubricant oils SAE 5W40, 10W40 and 0W30; faced with high concentrations of graphene nanoplatelets, carbon nanofibers and graphene oxides. Furthermore, its behaviour at different ranges of temperature will also be studied.

**Key words:** nanoparticles, lubricant oils, carbon, graphene

## Índice

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	17
<b>1.1. HISTORIA DE LA NANOTECNOLOGÍA</b> .....	17
<b>1.2. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA</b> .....	18
<b>1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	19
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b> .....	20
<b>2.1. NANOPARTÍCULAS DE CARBONO</b> .....	20
<b>2.1.1. Nanofibras de carbono</b> .....	20
<b>2.1.2. Nanoplaquetas de grafeno</b> .....	21
<b>2.1.3. Óxido de grafeno</b> .....	21
<b>2.2. ACEITES</b> .....	21
<b>2.3. REOLOGÍA</b> .....	23
<b>2.3.1. Viscosidad</b> .....	23
<b>Capítulo 3. Parte experimental</b> .....	25
<b>3.1. MATERIALES</b> .....	25
<b>3.2. EQUIPAMIENTO</b> .....	27
<b>3.2.1. Reómetro</b> .....	27
<b>3.2.2. Báscula</b> .....	30
<b>3.2.3. Sonificador</b> .....	31
<b>3.2.4. Agitador magnético</b> .....	32
<b>3.2.5. Microscopio electrónico de barrido</b> .....	33
<b>3.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS</b> .....	34
<b>3.4. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	35
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión</b> .....	36
<b>4.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS NANOMATERIALES</b> .....	36
<b>4.2. CURVAS DE FLUJO</b> .....	38
<b>4.3. ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD</b> .....	56
<b>Capítulo 5. Análisis económico</b> .....	64
<b>5.1. COSTE DE MATERIALES Y MANO DE OBRA</b> .....	64

<b>5.2. PRESUPUESTO FINAL .....</b>	<b>65</b>
<b>Capítulo 6. Análisis medioambiental .....</b>	<b>66</b>
<b>6.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE .....</b>	<b>66</b>
<b>6.2. Análisis de inventario .....</b>	<b>66</b>
<b>6.3. EVALUACIÓN DE IMPACTO .....</b>	<b>69</b>
<b>6.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
<b>Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo .....</b>	<b>75</b>
<b>7.1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>7.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....</b>	<b>76</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>77</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>80</b>

## Índice de figuras

Figura 3.1: Aceites utilizados en la parte experimental. ....	25
Figura 3.2: Reómetro Haake Rheostress 6000. ....	27
Figura 3.3: Termostato del reómetro. ....	28
Figura 3.4: Sistema de placa-cono del reómetro. ....	29
Figura 3.5: Báscula de precisión. ....	30
Figura 3.6: Equipo de ultrasonidos. ....	31
Figura 3.7: Placa agitadora. ....	32
Figura 3.8: Microscopio electrónico de barrido del CNME [22]. ....	33
Figura 3.9: Muestras de aceite con diferentes nanopartículas. ....	35
Figura 4.1: Imagen por SEM de CNF. ....	36
Figura 4.2: Imagen por SEM de GNP. ....	37
Figura 4.3: Imagen por SEM de GO. ....	37
Figura 4.4: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 60°C. ....	40
Figura 4.5: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 140°C. ....	40
Figura 4.6: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 60°C. ....	41
Figura 4.7: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 140°C. ....	41
Figura 4.8: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 60°C. ....	42
Figura 4.9: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 140°C. ....	42

Figura 4.10: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 60°C. ....	43
Figura 4.11: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 140°C. ....	43
Figura 4.12: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	44
Figura 4.13: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	44
Figura 4.14: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	45
Figura 4.15: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	45
Figura 4.16: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	46
Figura 4.17: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	46
Figura 4.18: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	47
Figura 4.19: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	47
Figura 4.20: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	48
Figura 4.21: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	48
Figura 4.22: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	49
Figura 4.23: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	49

Figura 4.24: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	50
Figura 4.25: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	50
Figura 4.26: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.....	51
Figura 4.27: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.....	51
Figura 4.28: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.....	52
Figura 4.29: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.....	52
Figura 4.30: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	53
Figura 4.31: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	53
Figura 4.32: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	54
Figura 4.33: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	54
Figura 4.34: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	55
Figura 4.35: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	55
Figura 4.36: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 1,5% de nanomateriales. ....	57
Figura 4.37: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 2,25% de nanomateriales. ....	57

Figura 4.38: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 3% de nanomateriales.....	58
Figura 4.39: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 1,5% de nanomateriales.....	58
Figura 4.40: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 2,25% de nanomateriales.....	59
Figura 4.41: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 3% de nanomateriales.....	59
Figura 4.42: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 1,5% de nanomateriales.....	60
Figura 4.43: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 2,25% de nanomateriales.....	60
Figura 4.44: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 3% de nanomateriales.....	61
Figura 4.45: Viscosidad cinemática frente a concentración de aceites con nanopartículas a 20°C.....	62
Figura 4.46: Viscosidad cinemática frente a concentración de aceites y nanopartículas a 100°C.....	63
Figura 6.1: Gráfico de barras comparativo de la cantidad de kg de CO <sub>2</sub> equivalente que supone cada aceite al 3% CNF.....	69
Figura 6.2: Gráfico de barras comparativo de la cantidad de kg de CO <sub>2</sub> equivalente que supone cada nanomaterial al 3% en aceite 10W40.....	70
Figura 6.3: Gráfico comparativo del porcentaje sobre el total de kg de CO <sub>2</sub> equivalente que supone cada material.....	71
Figura 6.4: Carga ambiental en mPt sobre las categorías de impacto.....	72
Figura 6.5: Carga ambiental en mPt sobre los tres aspectos principales del medioambiente.....	73

Figura A.1: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 20°C y 60°C. ....	80
Figura A.2: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 100°C y 140°C. ....	80
Figura A.3: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.....	81
Figura A.4: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.....	81
Figura A.5: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.....	82
Figura A.6: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.....	82
Figura A.7: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 20°C y 60°C. ....	83
Figura A.8: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 100°C y 140°C. ....	83
Figura A.9: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 60°C. ....	84
Figura A.10: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 140°C. ....	84
Figura A.11: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.....	85
Figura A.12: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.....	85
Figura A.13: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.....	86
Figura A.14: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.....	86

Figura A.15: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 60°C. ....	87
Figura A.16: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 140°C. ....	87
Figura A.17: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 60°C. ....	88
Figura A.18: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 140°C. ....	88
Figura A.19: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.....	89
Figura A.20: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.....	89
Figura A.21: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.....	90
Figura A.22: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.....	90
Figura A.23: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 60°C. ....	91
Figura A.24: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 140°C. ....	91
Figura A.25: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	92
Figura A.26: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	92
Figura A.27: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.....	93
Figura A.28: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.....	93

Figura A.29: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.....	94
Figura A.30: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.....	94
Figura A.31: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	95
Figura A.32: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	95
Figura A.33: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C.....	96
Figura A.34: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C.....	96
Figura A.35: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	97
Figura A.36: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	97
Figura A.37: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.....	98
Figura A.38: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.....	98
Figura A.39: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.....	99
Figura A.40: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.....	99
Figura A.41: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.....	100
Figura A.42: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.....	100

Figura A.43: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	101
Figura A.44: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	101
Figura A.45: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	102
Figura A.46: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	102
Figura A.47: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	103
Figura A.48: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	103
Figura A.49: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	104
Figura A.50: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	104
Figura A.51: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	105
Figura A.52: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	105
Figura A.53: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	106
Figura A.54: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	106
Figura A.55: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	107
Figura A.56: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	107

Figura A.57: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	108
Figura A.58: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	108
Figura A.59: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	109
Figura A.60: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	109
Figura A.61: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	110
Figura A.62: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	110
Figura A.63: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C. ....	111
Figura A.64: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C. ....	111
Figura A.65: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	112
Figura A.66: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	112
Figura A.67: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C. ....	113
Figura A.68: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C. ....	113
Figura A.69: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C. ....	114
Figura A.70: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C. ....	114

Alberto López Fraile

---

Figura A.71: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C. .... 115

Figura A.72: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C. .... 115

## Índice de tablas

Tabla 3.1: Desglose de materiales empleados en la elaboración de las muestras...	26
Tabla 4.1: Valores aproximados de viscosidad cinemática (cSt) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 20°C.....	62
Tabla 4.2: Valores aproximados de viscosidad cinemática (cSt) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 100°C.....	63
Tabla 5.1: Desglose del presupuesto del trabajo.....	65
Tabla 6.1: Tipos y cantidades de reactivos utilizados para sintetizar 88 g de CNF...	67
Tabla 6.2: Tipos y cantidades de reactivos necesarios en la síntesis de 188 g de GO.....	67
Tabla 6.3: Tipos y cantidades de reactivos utilizados en la síntesis de 10,5 g de CNF.....	68
Tabla 6.4: Tipos y densidades de aceites SAE empleados.....	68
Tabla 6.5: Cantidades totales de los materiales empleados en las muestras.....	68
Tabla 6.6: Cantidad equivalente en kg CO <sub>2</sub> de contaminación de los aceites al 3% CNF.....	69
Tabla 6.7: Cantidad equivalente en kg CO <sub>2</sub> de contaminación de los nanomateriales al 3% en aceite 10W40.....	70
Tabla 6.8: Cantidad equivalente en kg CO <sub>2</sub> de contaminación de los materiales.....	71
Tabla A.1: Valores aproximados de viscosidad cinemática (mPa·s) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 20°C.....	116
Tabla A.2: Valores aproximados de viscosidad cinemática (mPa·s) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 100°C.....	116

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. HISTORIA DE LA NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología es descrita como el campo que estudia las diferentes estructuras de la materia con un tamaño nanométrico ( $1 \times 10^{-9}$ ) [1]. A pesar de que existen desde tiempos inmemoriales, el término nanotecnología se usa desde bastante recientemente. Fue introducido en el año 1960 por Richard Feynman, físico teórico ganador del Nobel de Física en 1965, en su charla “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” [2], en la cual hablaba sobre el potencial de materiales de apenas unos átomos de tamaño. A pesar de ello, no fue hasta 1974 que el concepto “*Nanotecnología*” fue propiamente introducido por Norio Taniguchi. El profesor Taniguchi definió la nanotecnología como “*el proceso de separación, consolidación y deformación por un átomo o molécula*” [3].

La época de oro de la nanotecnología se daría en los años 80. En 1985, un equipo liderado por Richard Smalley, descubrió el fullereno [4], una estructura de carbono con forma de tubo (como las usadas en la actualidad) de 60 átomos de carbono, que les llevaría, en 1996, a ganar el Premio Nobel de Química. Sobre la misma época, el físico Eric Drexler comenzó a seguir el trabajo de Feynman y expandir sobre él. En 1986 publicaría un libro titulado “*Engines of creation*”, en el cual hablaría sobre la posibilidad de recrear máquinas y objetos de manufacturación a una escala molecular, los cuales operarían prácticamente igual y servirían para el desarrollo de estructuras a ese nivel [5]. En este libro es donde aparece la primera mención al término nanotecnología tal y como se entiende a día de hoy.

Actualmente la nanotecnología se trata de un campo en constante evolución. Los descubrimientos realizados en el siglo pasado han llevado al desarrollo de nuevas formas de evaluar la calidad de productos alimenticios, avances en la industria farmacéutica, y la aparición de nuevos campos de estudio como la nanomedicina o la nanotoxicología [6]. Dado su gran potencial de aplicación en prácticamente todos los aspectos de la vida cotidiana de los seres humanos, la nanotecnología se ha establecido como un campo líder en la industria del presente y del futuro.

## 1.2. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

Este trabajo supone una continuación a los trabajos “*Estudio reológico de aceites lubricantes 5W40 y 10W40 con nanopartículas base grafeno*” [7] y “*Estudio de lubricidad de aceites lubricantes dopados con nanopartículas*” [8].

Los aceites lubricantes sirven para minimizar el desgaste por rozamiento y fricción de diferentes partes mecánicas. En el caso de este trabajo, se habla de los aceites lubricantes de motores de coche, por lo que se encargarán de lubricar partes metálicas friccionando entre sí a altas temperaturas (o a muy bajas en el arranque). Por tanto, el aceite debe adaptarse a unas condiciones versátiles y exigentes de funcionamiento a lo largo de una vida útil elevada. Por ello, y como ya se ha explicado, la introducción de la nanotecnología en esta área podría mejorar aspectos como las condiciones de trabajo, la vida útil o la eficiencia.

De hecho, estudios recientes demuestran ya la mejoría de propiedades. En “*Understanding the Role of Nano-oil Lubrication*” y “*Scalable fabrication of modified graphene nanoplatelets as an effective additive for engine lubricant oil. Nanomaterials*” [9-10] se habla de la reducción eficaz del coeficiente de fricción. “*Analysis of thermo-physical properties of SAE20W40 engine oil by the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles*” y “*Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive*” [11-12] demuestra el aumento de viscosidad, así como una gran reducción de la conductividad térmica y un ligero incremento de los puntos de ignición y combustión. Otros estudios realizados con nanopartículas de base carbono arrojan resultados similares, como podemos ver en “*Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications*” y “*Improving the tribological performance of a biodegradable lubricant adding graphene nanoplatelets as additives*” [13-14].

Por tanto, la continuación de estos estudios aportará más datos concluyentes acerca de los límites de operación de estas nuevas disoluciones, así como sus beneficios o potenciales desventajas.

### 1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Con este trabajo, se busca evaluar las propiedades reológicas de los aceites SAE 0W30, 5W40 y 10W40 infundidos con diferentes concentraciones de nanopartículas: nanofibras de carbono (CNF), nanoplaquetas de grafeno (GNP) y óxidos de grafeno (GO). Dichas muestras serán evaluadas en un rango de temperaturas de 20°C a 160°C (en saltos de 20°C), considerándose 20°C-80°C baja temperatura (de operación de un motor) y 100°C-160°C alta temperatura.

Dicha evaluación busca proporcionar las curvas de flujo de las diferentes muestras y compararlas frente a las del aceite puro, con el fin de determinar si existe una mejora en las propiedades del aceite.

Por tanto, se establece como objetivo principal:

1. Estudiar el comportamiento reológico de la adición de nanopartículas base carbono a aceites lubricantes.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo, se determinan los siguientes objetivos secundarios que habrá que alcanzar previamente:

2. Establecer el comportamiento de flujo de las suspensiones preparadas, a través de las curvas de flujo y curvas de viscosidad.
3. Determinar la evolución de la viscosidad frente a la temperatura.
4. Analizar la evolución de la viscosidad frente a la concentración de nanopartículas.
5. Determinar el comportamiento de los diferentes aceites frente a una misma concentración de nanopartículas.
6. Estudiar el impacto medioambiental de las suspensiones preparadas.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. NANOPARTÍCULAS DE CARBONO

La RAE define partícula como “*parte pequeña de la materia*”. Por tanto, nanopartícula es toda aquella partícula menor de 100 nanómetros ( $1 \times 10^{-7}$  m). Según su tamaño, propiedades o forma se clasifican en:

- Nanopartículas de carbono
- Nanopartículas de cerámica
- Nanopartículas de metal
- Nanopartículas semiconductoras
- Nanopartículas poliméricas
- Nanopartículas de base lípido

Las tres nanopartículas utilizadas en este trabajo son de base carbono, y poseen diferentes cualidades como se verá a continuación.

#### 2.1.1. Nanofibras de carbono

En inglés *Carbon Nanofibers* (CNF), se trata de estructuras con forma cilíndrica compuestas por capas de grafeno dispuestas de múltiples maneras. En el caso de que estas se coloquen de manera perfectamente cilíndrica, se los denomina nanotubos de carbono.

Estas partículas tienen un tamaño de entre 50 y 200 nanómetros, y sus propiedades dependen de la forma de obtención y tratamiento final al que sean sometidas. Principalmente, se trata de conductores térmicos y térmicos excelentes, con una gran flexibilidad y resistencia a la tracción elevada (inversamente relacionada con el diámetro de la fibra).

Además, su reducida densidad las hace ideales para aplicaciones biomédicas como la administración de productos farmacéuticos en áreas afectadas por infecciones o como estructura para el crecimiento de cultivos de células [15].

### **2.1.2. Nanoplaquetas de grafeno**

Denominadas Graphene Nanoplatelets (GNP), son un tipo de nanopartículas de carbono en forma de plaqueta que se agrupan entre sí dando lugar a láminas, que se forman pequeñas agrupaciones (se amontonan unas sobre otras). Tienen un grosor de entre 5 y 10 nanómetros, y al igual que las nanofibras son muy buenos conductores de la electricidad y del calor.

Su forma característica ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de otros materiales con los que se mezcle, como la rigidez, la resistencia al impacto, el retardo a combustión o la dureza [[16-17](#)].

### **2.1.3. Óxido de grafeno**

Llamado en inglés *Graphene Oxide* (GO), se trata de una lámina monoatómica de carbono, como las capas de los GNP, pero con compuestos oxigenados intercalados.

Dichos compuestos otorgan a la partícula diferentes propiedades, como la mejora de la resistencia a fatiga o la dureza [[18](#)]. La principal ventaja del GO es su capacidad de dispersión en cualquier fluido, haciéndolo muy fácil de trabajar con él.

## **2.2. ACEITES**

Los aceites lubricantes son sustancias líquidas que se encargan de reducir la fricción existente entre dos partes en contacto. Reduciendo dicha fricción, conseguiremos también disminuir la temperatura de la pieza (ya que ya no se calentará por fricción) y su desgaste, por lo que aumentaremos considerablemente su vida útil. Además los aceites lubricantes pueden actuar como refrigerantes, agentes de limpieza o selladores.

Alberto López Fraile

---

Existen dos tipos principales de aceite lubricante dependiendo de su origen: el mineral y el sintético. El aceite mineral, como su propio nombre indica, proviene directamente del refinado del crudo de petróleo. Por otro lado, el aceite sintético proviene del aceite base que ha sido refinado del crudo de petróleo, pero se le añaden aditivos para mejorar determinadas propiedades. Si bien esto encarece el aceite, le confiere unas propiedades superiores y un rendimiento más elevado, incluso en condiciones más exigentes [19]. Los tres aceites estudiados en este trabajo son aceites sintéticos.

Los aditivos que se pueden añadir al aceite pueden mejorar las siguientes propiedades:

- Antioxidantes
- Anticorrosivos
- Mejoradores del índice de viscosidad (MIV)
- Antidesgastantes
- De extrema presión
- Detergentes
- Dispersantes
- Antiespumantes
- Modificadores de la fricción
- Demulsificantes
- Emulsificantes
- Bactericidas

Los aceites tienen varias clasificaciones como la API (*American Petroleum Institute*) o la SAE (*Society of Automotive Engineers*) para determinar sus diferentes usos. Para este trabajo se usará la clasificación SAE, que separa los aceites por viscosidad tanto en frío como en caliente. Los aceites tienen una denominación de “nº1 W nº2”, siendo la W la palabra *Winter*, y los números unos indicativos de la temperatura de trabajo del aceite. El primer número se refiere a la temperatura de arranque en invierno, por lo que un número inferior será mejor. Por otro lado, el segundo número está relacionado con la temperatura de operación global del motor y la capacidad del aceite de protegerlo, por lo que un número elevado es lo que se busca.

Como ya se ha mencionado, se usarán para la realización de las mediciones los aceites 0W30, 5W40 y 10W40.

## 2.3. REOLOGÍA

La reología fue definida como “*el estudio de la deformación y el flujo de materia*” por el profesor Eugene C. Bingham en su libro “*Fluidity and Plasticity*” en 1922 [20].

Para medir la reometría de los fluidos se usa un reómetro, un aparato que aplica variaciones de tensión y temperatura, y obtiene valores de viscosidad dinámica y esfuerzo cortante frente a un gradiente de tiempo. Estos valores se pueden agrupar como una tendencia lineal, en cuyo caso se determina que el fluido es de tipo newtoniano; o pueden agruparse en diferentes formas, por lo que son considerados fluidos no newtonianos. Esto ocurre cuando la viscosidad del fluido no se mantiene constante al variar el esfuerzo cortante. Dentro de esta última clasificación encontramos los Plásticos de Bingham, llamados así por el anteriormente mencionado profesor, que propuso su modelo matemático.

Dados los resultados obtenidos en otros estudios [7-8], el modelo que se espera obtener en estas disoluciones es un modelo newtoniano, pero se corroborará al realizar las mediciones.

### 2.3.1. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que se relaciona con su resistencia a fluir o deformarse. Tiende a disminuir con la temperatura. Con una alta viscosidad obtenemos fluidos muy poco deformables, mientras que con una baja viscosidad el fluido será deformable incluso por la acción de la gravedad (sin necesidad de otras fuerzas).

Existen dos tipos de viscosidad: la dinámica y la cinemática.

#### Dinámica

Se define como viscosidad dinámica ( $\mu$ ) a la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y el gradiente de velocidad (siendo  $dv$  un diferencial de velocidad y  $dy$  un diferencial de altura entre la pared y el centro de la tubería estudiada) (Ec. 2.1).

$$\tau = \mu\gamma = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

### Cinemática

Se define viscosidad cinemática ( $\nu$ ) como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido ( $\rho$ ) (Ec. 2.2).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \rightarrow \mu = \nu\rho = \nu \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

## Capítulo 3. Parte experimental

### 3.1. MATERIALES

Para la realización de este trabajo se han empleado tres aceites de motor comerciales: 0W30 (Eni i-Sint Tech), 5W40 (Shell Helix HX7) y 10W40 (Total Classic).



*Figura 3.1: Aceites utilizados en la parte experimental.*

También usaremos tres tipos de nanopartículas de base carbono: nanofibras de carbono (CNF), nanoplaquetas de grafeno (GNP) y óxido de grafeno (GO). Dado que las muestras emplearan diferentes concentraciones en masa de nanopartículas, deberemos calcular dicha cantidad (Ec. 3.1). Dicho cálculo es independiente del tipo de nanopartícula.

Alberto López Fraile

$$wt_{nano} = \frac{m_{nano}}{m_{Total}} = \frac{m_{nano}}{m_{nano} + m_{aceite}} \rightarrow m_{nano} = wt_{nano}(m_{nano} + m_{aceite})$$

$$\rho_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{V_{aceite}} \rightarrow m_{aceite} = \rho_{aceite}V_{aceite}$$

$$m_{nano} = wt_{nano}m_{nano} + wt_{nano}\rho_{aceite}V_{aceite}$$

$$m_{nano}(1 - wt_{nano}) = wt_{nano}\rho_{aceite}V_{aceite}$$

$$m_{nano} = \frac{wt_{nano}\rho_{aceite}V_{aceite}}{1 - wt_{nano}} \quad (3.1)$$

Tabla 3.1: Desglose de materiales empleados en la elaboración de las muestras.

Muestra	Nanomaterial	Concentración de sólidos	Masa Nanomaterial (g)	Tipo de aceite	Volumen de aceite (mL)
1	GNP	0,75%	0,128	0W30	20
2		1,5%	0,2579	0W30	
3		2,25%	0,3898	0W30	
4		3%	0,5237	0W30	
5		1,5%	0,2593	5W40	
6		2,25%	0,3919	5W40	
7		3%	0,5266	5W40	
8		1,5%	0,2619	10W40	
9		2,25%	0,3958	10W40	
10		3%	0,5318	10W40	
11	GO	1,5	0,2593	5W40	20
12		2,25%	0,3919	5W40	
13		3%	0,5266	5W40	
14		1,5%	0,2619	10W40	
15		2,25%	0,3958	10W40	
16		3%	0,5318	10W40	
17	CNF	0,75%	0,128	0W30	20
18		1,5%	0,2579	0W30	
19		2,25%	0,3898	0W30	
20		3%	0,5237	0W30	
21		1,5%	0,2593	5W40	
22		2,25%	0,3919	5W40	
23		3%	0,5266	5W40	
24		1,5%	0,2619	10W40	
25		2,25%	0,3958	10W40	
26		3%	0,5318	10W40	

## 3.2. EQUIPAMIENTO

### 3.2.1. Reómetro

Para la realización de nuestras pruebas de viscosidad y esfuerzo usaremos un reómetro, un aparato que aplica fuerza a un fluido y evalúa dichos parámetros. En nuestro caso se trata del modelo “*Haake Rheostress 6000*”, un reómetro rotacional. Este modelo en particular permite alcanzar una temperatura de hasta 500°C, lo cual lo cualifica para operar con las muestras del estudio que alcanzarán los 160°C.



*Figura 3.2: Reómetro Haake Rheostress 6000.*

Alberto López Fraile

---

Para poder alcanzar las temperaturas previamente discutidas, se usa un termostato que contiene silicona líquida como fluido calefactor, ya que permite alcanzar las temperaturas necesarias para los experimentos.



*Figura 3.3: Termostato del reómetro.*

Alberto López Fraile

---

Dada la naturaleza fluida de las muestras, se usarán los elementos de placa-cono. Este sistema nos ayudará a contener las muestras para su correcto estudio.



*Figura 3.4: Sistema de placa-cono del reómetro.*

Alberto López Fraile

---

### 3.2.2. Báscula

La masa de nanopartículas deberá ser medida, y dado el bajo volumen de las muestras, para adecuar la concentración se necesitará de una gran precisión. Por ello usaremos una báscula “Mettler Toledo AB204”. Esta balanza alcanza una precisión de 0,1 mg, por lo que será perfecta para nuestro experimento.



*Figura 3.5: Báscula de precisión.*

Alberto López Fraile

---

### 3.2.3. Sonicador

Con el fin de homogeneizar las muestras se utilizará un sonicador o equipo de ultrasonidos “*JP Selecta Ultasons*”. Este instrumento se usa añadiendo un volumen de agua suficiente para cubrir parte del recipiente de la muestra, pero teniendo cuidado de no excederse ya que haría que flotara. Con dicha agua introducida se procede a determinar el tiempo de 1-15 minutos de baño de ultrasonidos a alta frecuencia (40 KHz). Si este tiempo no ha sido suficiente para descomponer las posibles deposiciones de soluto, se puede hacer otra ronda. Se debe vigilar la temperatura del agua si se hacen múltiples baños seguidos ya que las vibraciones elevarán su temperatura, y con esta se elevará la temperatura de la muestra, distorsionando así posibles medidas a temperatura ambiente que se realicen en el momento.

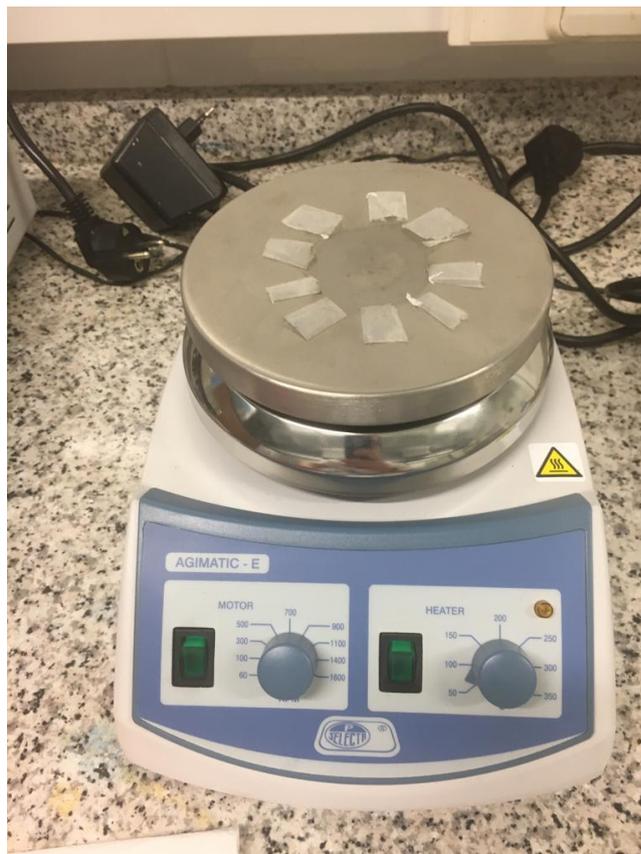


Figura 3.6: Equipo de ultrasonidos.

### 3.2.4. Agitador magnético

La última pieza de equipamiento que usaremos será la placa magnética “Agimatic-E”. Dicha placa produce un campo magnético rotatorio en el centro de la placa que provoca que los imanes que se coloquen en dicha posición giren. La velocidad de giro viene determinada por el usuario, y puede llegar a las 1600 rpm. Se introducirá dicho imán en las muestras para realizar la fase de mezclado.

El equipo también posee una funcionalidad de calentador, pero que no se usará en este caso.



*Figura 3.7: Placa agitadora.*

### 3.2.5. Microscopio electrónico de barrido

La técnica de microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM) aporta información acerca de la estructura y composición de un gran número de materiales, a una escala desde micrométrica a nanométrica. Para este trabajo usaremos el “*Microscopio JEOL JSM 6335F*” del Centro Nacional de Microscopía Electrónica (CNME) de la Universidad Complutense de Madrid.

Funciona emitiendo un haz de electrones altamente energéticos que se concentran mediante un sistema de lentes. Dicho haz será dirigido mediante un sistema automatizado para ir formando la imagen punto a punto [21].



Figura 3.8: Microscopio electrónico de barrido del CNME [22].

### 3.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la elaboración de las muestras se mezclarán los diferentes aceites y nanopartículas a diferentes concentraciones. Se empezará añadiendo 20 mL de aceite a un vaso de precipitado. En paralelo, se pesará en nuestra balanza la cantidad correspondiente de nanopartícula con un papel de pesar como soporte. Dicha cantidad habrá sido calculada previamente en base a la densidad del aceite y a la concentración de la muestra cómo se verá más adelante. Una vez hecho esto, se vierten las nanopartículas con cuidado en el vaso de precipitado. Se debe vigilar, sobretodo, que no se pierda muestra fuera del vaso o pegada a las paredes interiores.

A continuación, se comenzará la fase de mezcla. Para ello se usará el agitador magnético y el sonicador. Primero, se introducirá delicadamente un imán (lo más grande posible dadas las medidas del vaso de precipitado) en el centro de la mezcla y se colocará centrado sobre el agitador. Se aumentará de manera suave la velocidad de giro hasta las 1600 rpm, y así se dejará durante una hora. Tras finalizar este periodo, se retirará el imán extrayendo la menor cantidad de muestra posible, y se llevará la muestra a un baño de sonicación. Aquí estará otros quince minutos.

Una vez finalizados todos los pasos, la muestra estará lista para ser almacenada y/o medida. Cabe destacar que lo más conveniente es preparar las muestras a medida que se vayan midiendo, para así disminuir los problemas por sedimentación y medir todas las muestras a un mismo tiempo aproximado de envejecimiento.

El procedimiento de medida en el reómetro es el siguiente: el sistema recogerá 100 datos de creciente velocidad de giro (gradiente de velocidad) desde 0 hasta  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Después, mantendrá la velocidad de giro durante otras 100 medidas. Finalmente, recogerá 100 datos decrecientes de velocidad de giro desde 1000 hasta  $0 \text{ s}^{-1}$ . Se harán diferentes ensayos variando la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  y de  $100^{\circ}\text{C}$  a  $160^{\circ}\text{C}$  en intervalos de  $20^{\circ}\text{C}$  (exceptuando las muestras de aceite 0W30, que se harán en intervalos de  $40^{\circ}\text{C}$ ). Se presentan dos tipos de curvas: las de esfuerzo y las de viscosidad.

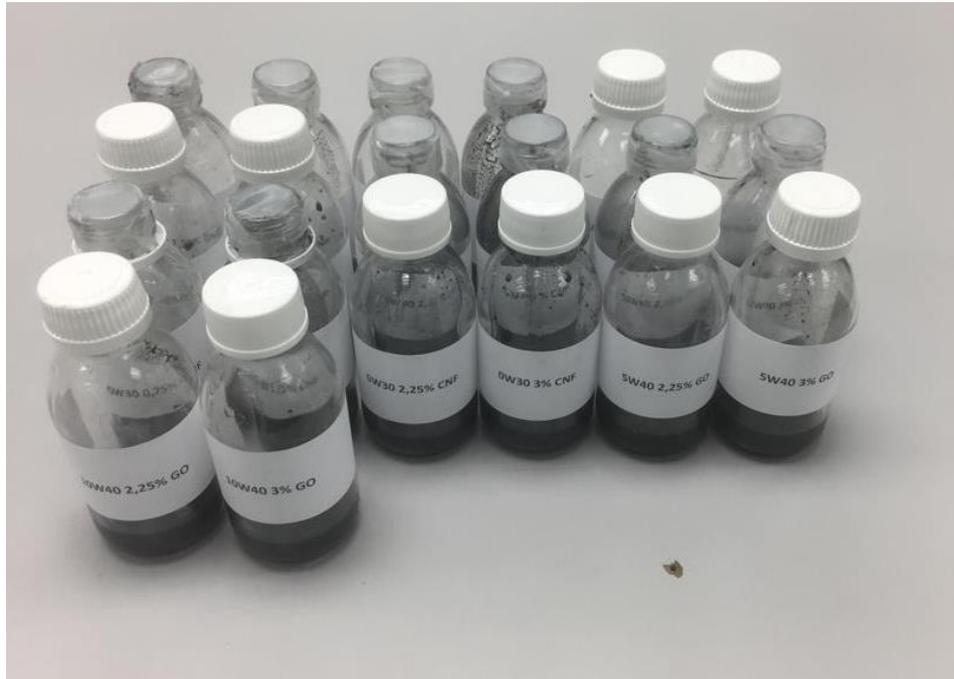


Figura 3.9: Muestras de aceite con diferentes nanopartículas.

### 3.4. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

El programa de adquisición de datos utilizado es el “*RheoWin Job Manager*”; que realiza los gráficos de esfuerzo y viscosidad y presenta una tabla de los datos obtenidos durante la medida en el programa “*RheoWin Data Manager*”. Estos gráficos servirán para una primera evaluación visual de los resultados en la que se compruebe que la medida se ha realizado sin ninguna irregularidad; pero el sistema no permite editarlos para una correcta evaluación y comparación de estos. Por ello se usará la tabla de datos obtenida en otro programa, el “*OriginPro 2021*”. Dicho programa nos permitirá aunar datos de diferentes medidas, y obtener gráficos adicionales de temperatura y concentración.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS NANOMATERIALES

Mediante la técnica SEM se obtienen imágenes de cada uno de los nanomateriales en polvo y se comprueba lo establecido en el apartado teórico: las CNF tienen forma tubular o de fibra (Figura 4.1), las GNP se presentan en forma de múltiples capas (5) de grafeno (Figura 4.2), y el GO tiene forma de lámina transparente de grafeno aislada (Figura 4.3).

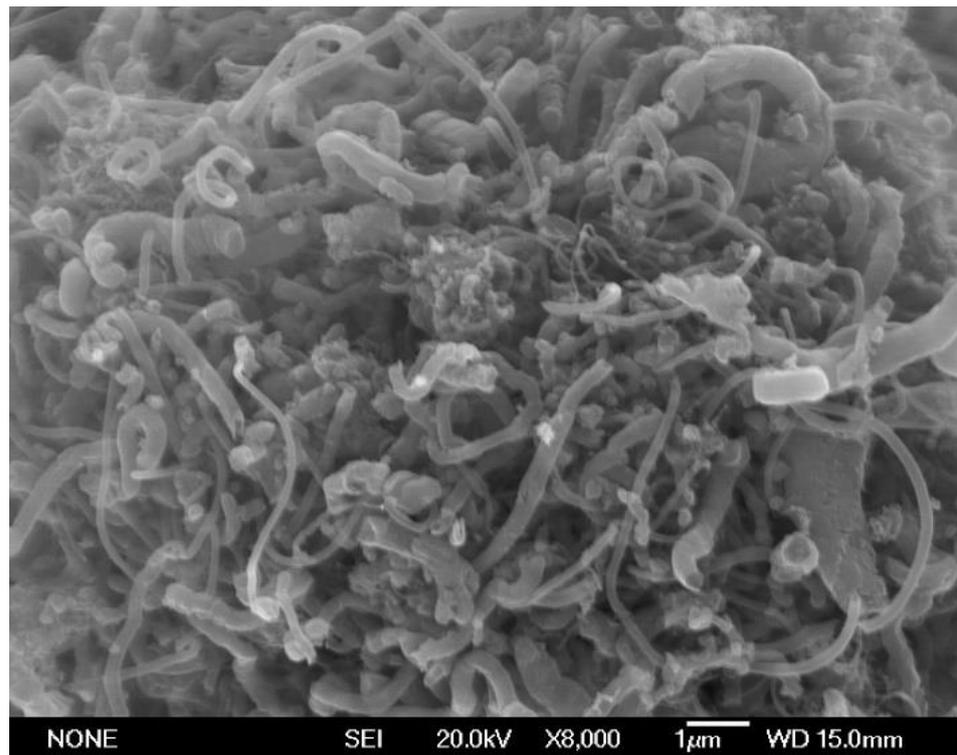
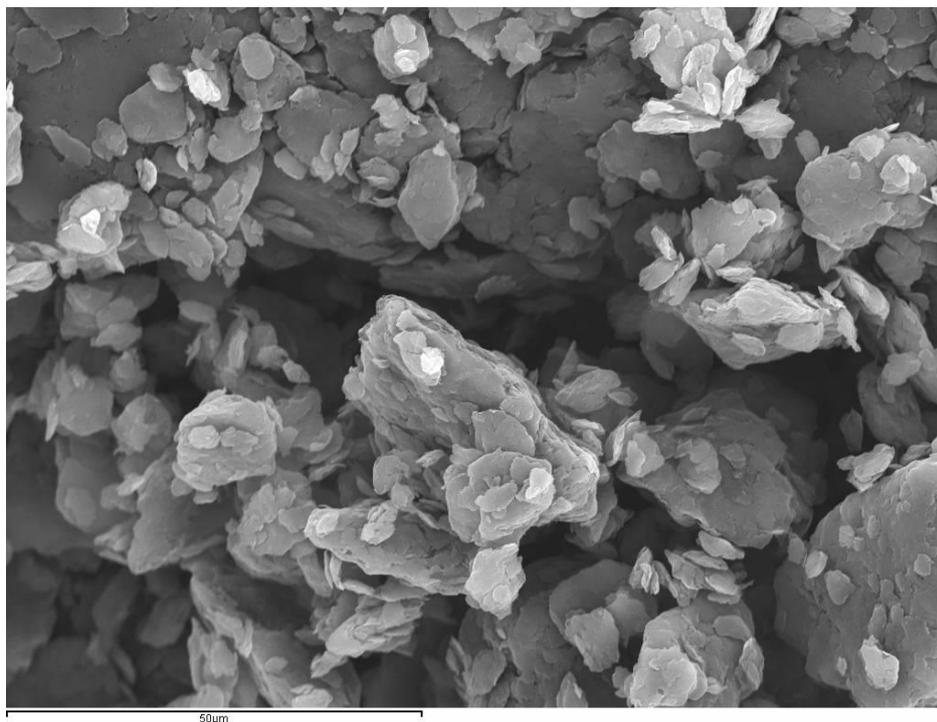
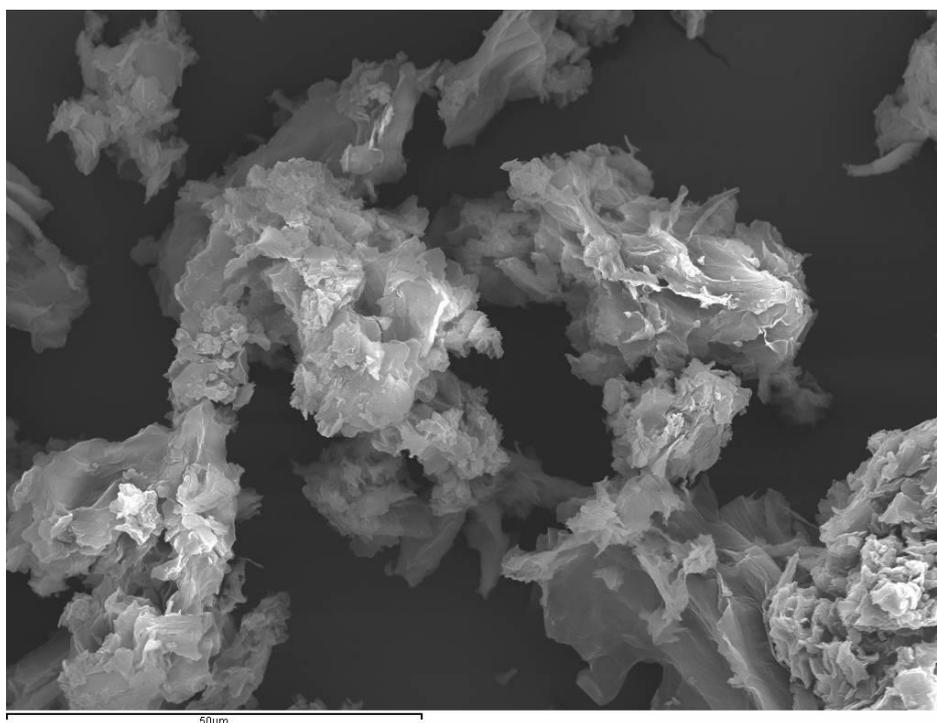


Figura 4.1: Imagen por SEM de CNF



*Figura 4.2: Imagen por SEM de GNP*



*Figura 4.3: Imagen por SEM de GO*

## 4.2. CURVAS DE FLUJO

Las curvas de esfuerzo comparan el esfuerzo cortante que se produce al girar el sistema placa-cono del reómetro (Pa), frente al gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ). Dichas medidas serán comparadas con su homóloga para el aceite puro; permitiendo así comparar la diferencia entre ambas. Se espera que las muestras sean, al igual que los aceites puros, fluidos newtonianos; por lo que se espera que sean rectas cuyo origen sea el 0 y que crezcan con una pendiente superior a la del aceite puro. Cabe destacar que dicha pendiente, dada la Ley de Newton (Ecuación 2.1), será la viscosidad dinámica de la muestra en cuestión.

Las curvas de viscosidad comparan la viscosidad dinámica (mPa·s) frente al gradiente de velocidad. Como ya ha sido explicado en el párrafo anterior, y siguiendo la Ley de Newton, se espera obtener un valor constante a lo largo de toda la medida. Se debe mencionar que los valores próximos al gradiente 0 se consideran una desviación de la realidad y no serán tenidos en cuenta.

Se representan en este apartado los valores de viscosidad obtenidos en la medición de las muestras con aceites 0W30, 5W40 y 10W40 a concentración 2,25% de nanomateriales CNF, GNP y GO. Las muestras de aceite 0W30 con GO no han sido analizadas debido al fin de existencias de este nanomaterial durante la realización del trabajo. El resto de muestras (a concentraciones 1,5% y 3%, y además 0,75% para el aceite 0W30) se encuentran en el anexo al final de este trabajo.

Las curvas de flujo expuestas en el apartado de resultados, corresponden a 2,25% en concentración en masa, el valor intermedio entre el rango de concentraciones de sólidos estudiado (1,5%-3%). Existen ciertas irregularidades o desvíos de la media de los datos, como en la muestra de aceite 0W30 2,25% CNF a 140°C; pero se tratan de desviaciones menores que se omiten, y que se atribuyen principalmente a la sedimentación de las muestras.

Los resultados obtenidos en las curvas de flujo (Figura 4.4 a Figura 4.35) son los esperados, ya que demuestran que la viscosidad de las muestras de aceite con nanomaterial serán más viscosas que el aceite puro, independientemente de la combinación de aceite con nanomaterial o de la temperatura. Por supuesto, también se confirma el hecho de que existe una reducción de la viscosidad con el aumento de la temperatura (de 150,05 a 4,98 mPa·s de 20 a 160°C en las Figuras 4.14 y 4.15); aunque eso se analizará en profundidad más adelante. También se puede ver que a

Alberto López Fraile

---

medida que incrementamos la temperatura, la diferencia de viscosidad entre las muestras y el aceite puro se reduce.

Si se observa de manera individual en las gráficas, se puede observar que existen diferencias notables en los cambios de viscosidad dependiendo del nanomaterial usado. Las CNF consiguen un gran aumento de la viscosidad en cualquiera de los aceites, llegando a aumentarla unos 40 mPa·s a 20°C (Figura A.63), pero aumentándola también a altas temperaturas 5 mPa·s a 100°C (Figura A.63). Los GO tienen un efecto similar a las CNF a bajas temperaturas, grandes aumentos en viscosidad (alrededor de 35 mPa·s en las Figuras 4.14 y 4.22; y Figuras 4.26 y 4.34); pero a medida que se aumenta la temperatura esta diferencia disminuye hasta aproximadamente la mitad de la de las CNF (unos 2,4 mPa·s en las Figuras 4.15 y 4.23; y Figuras 4.27 y 4.35). Por último, si se analizan las gráficas de GNP, se detecta que, aunque existente, el aumento de viscosidad es muy bajo (entre 5 y 10 mPa·s a 20°C.).

Por lo tanto, se concluye que las CNF aumentarán la viscosidad en todos los rangos de temperatura; seguidas por los GO, que serán menos efectivos al subir la temperatura; y terminando con las GNP, que no aumentan la viscosidad prácticamente nada. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el trabajo de referencia [7], en el cual las CNF y GNP se comportaban de la misma manera, aunque el GO no afectaba antes a la viscosidad, y ahora sí lo hace. Esto se debe al aumento de las concentraciones de estudio, como se puede ver a partir de la Figuras A.35, A.36, A.59 y A.60 (en el anexo); y hasta las Figuras A.47, A.48, A.71 y A.72.

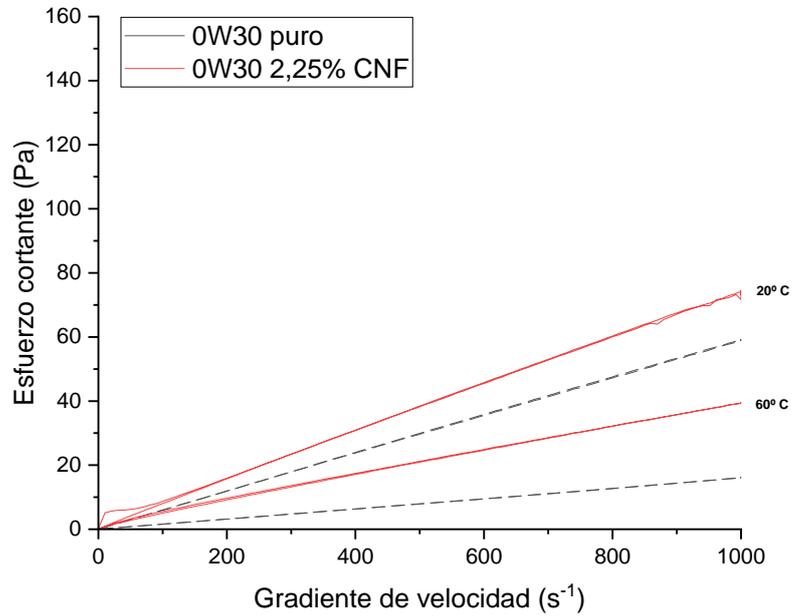


Figura 4.4: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

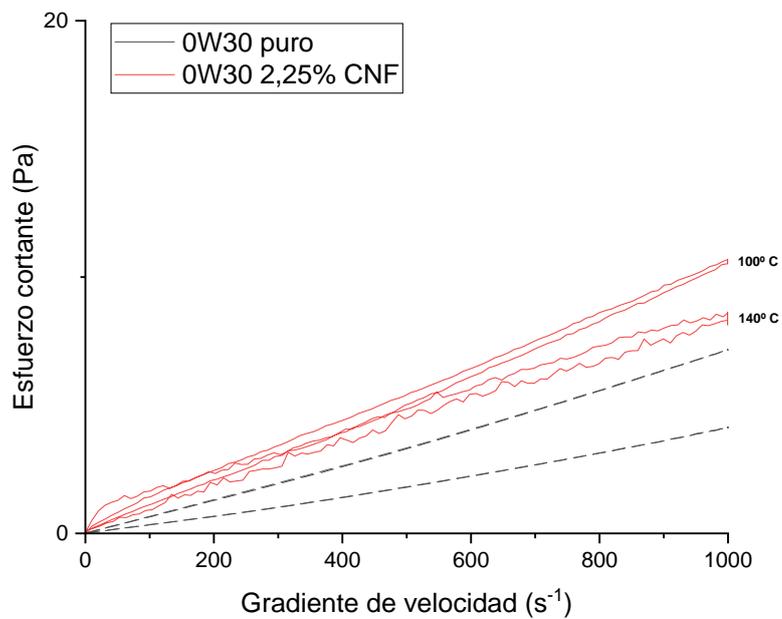


Figura 4.5: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

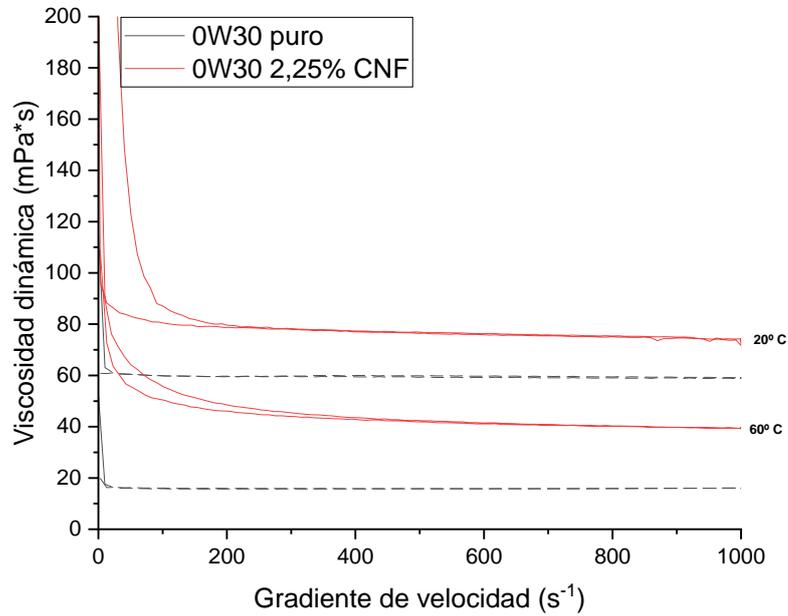


Figura 4.6: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

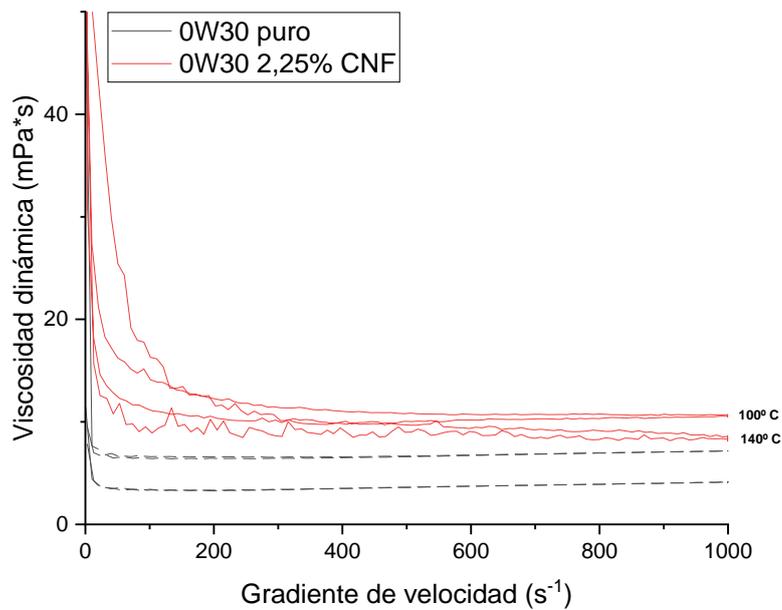


Figura 4.7: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

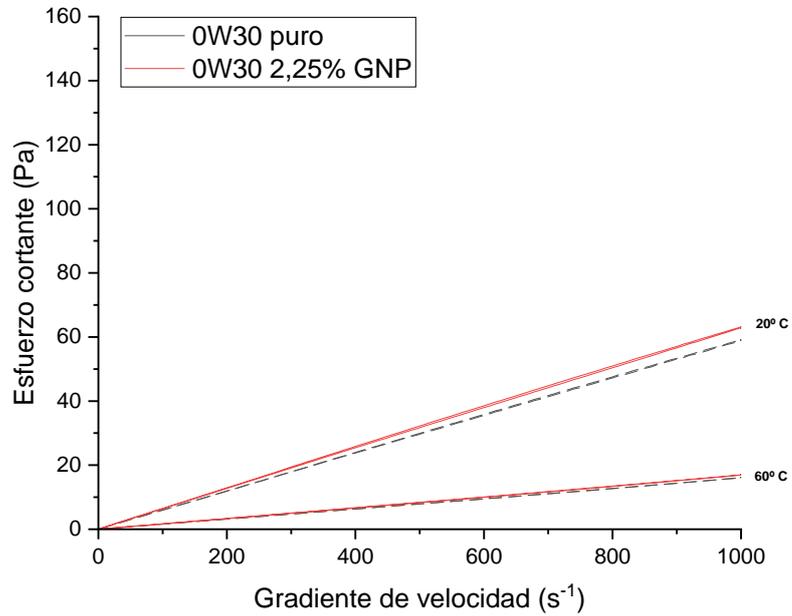


Figura 4.8: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

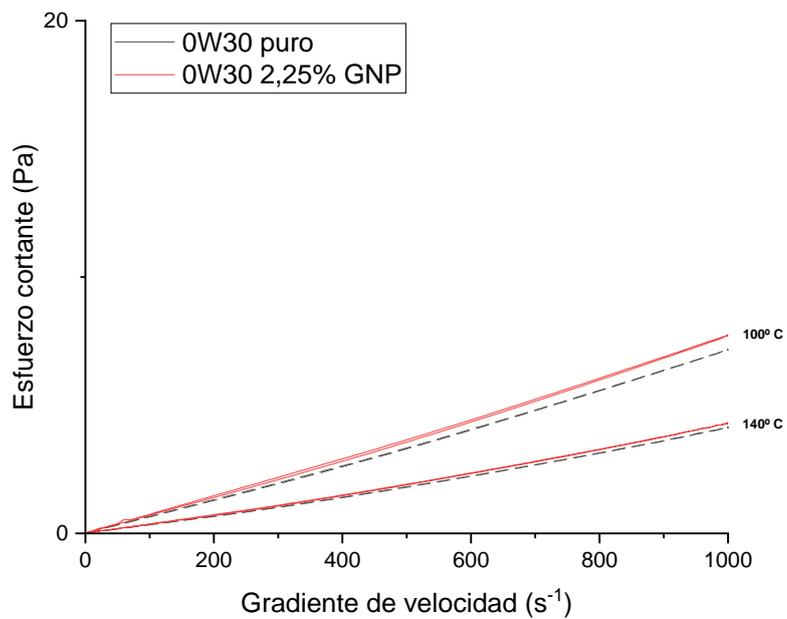


Figura 4.9: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

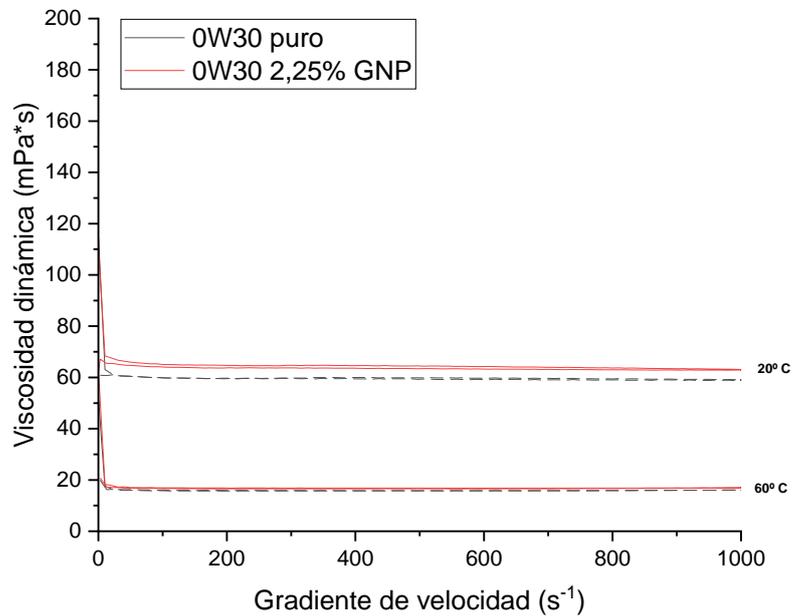


Figura 4.10: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

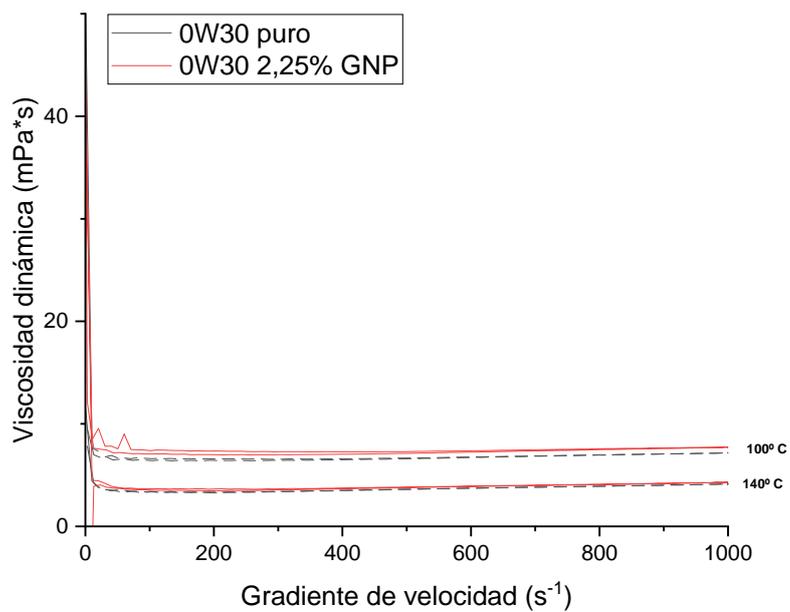


Figura 4.11: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

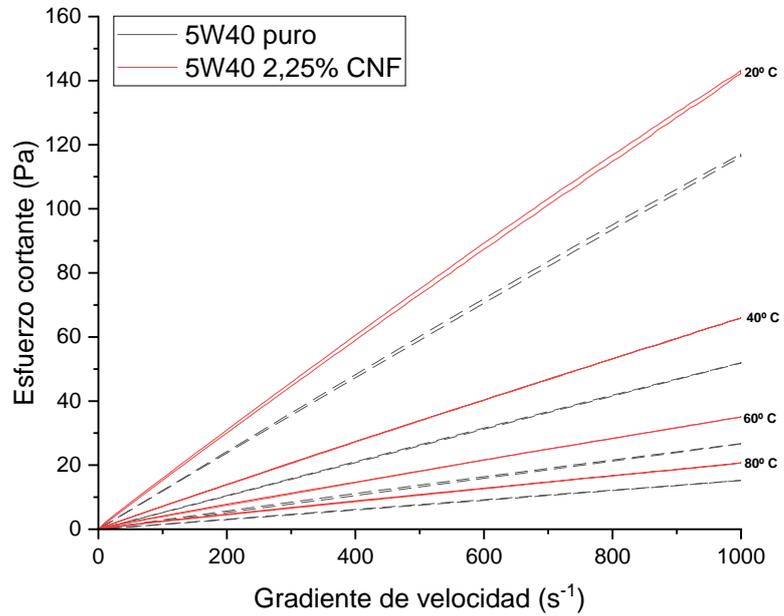


Figura 4.12: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

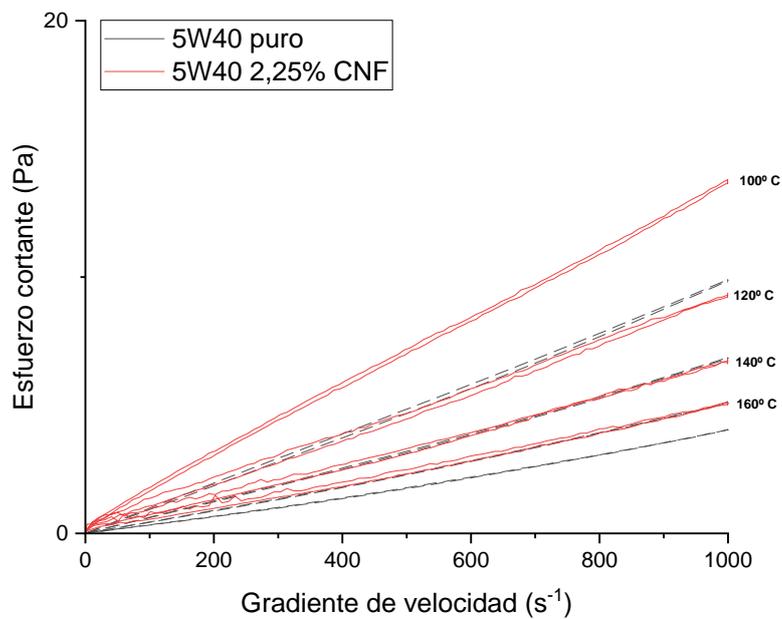


Figura 4.13: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

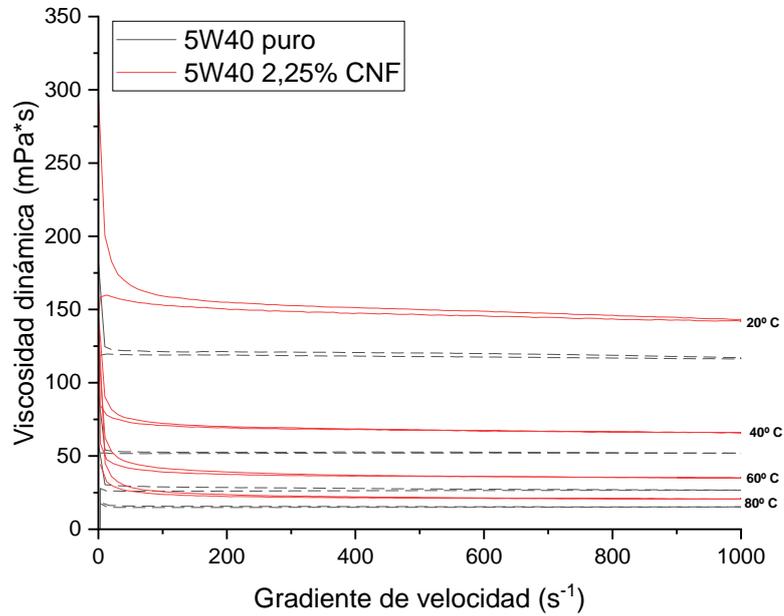


Figura 4.14: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

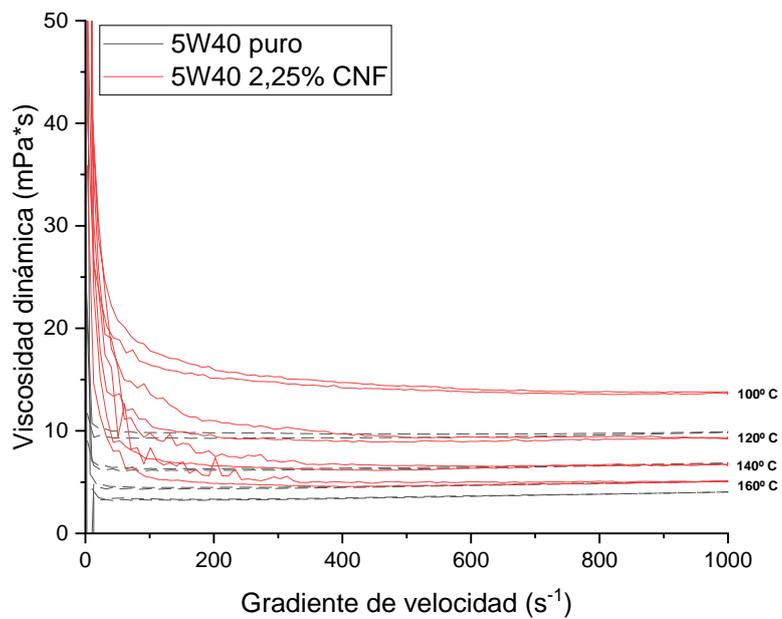


Figura 4.15: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

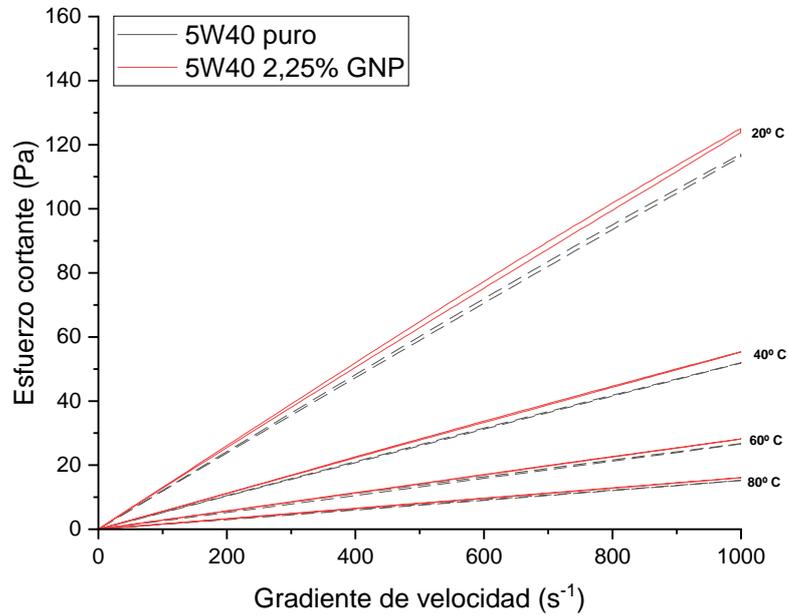


Figura 4.16: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

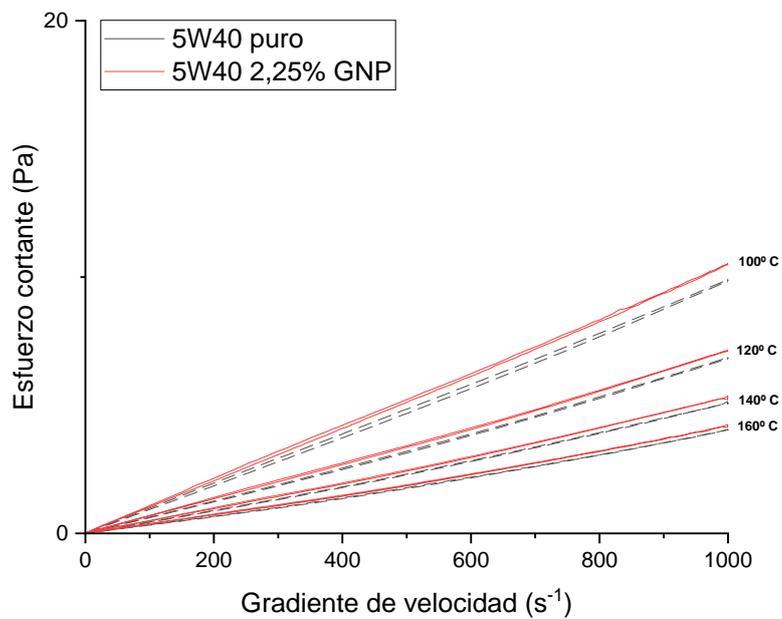


Figura 4.17: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

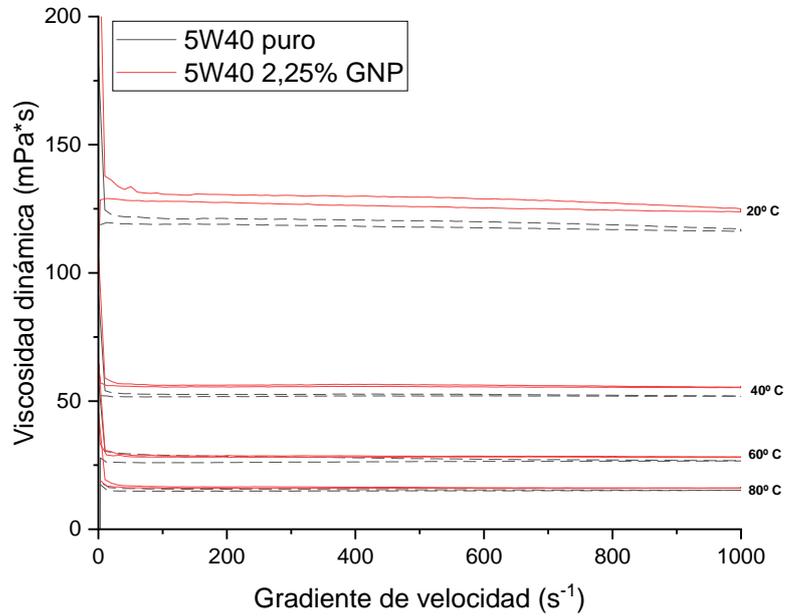


Figura 4.18: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

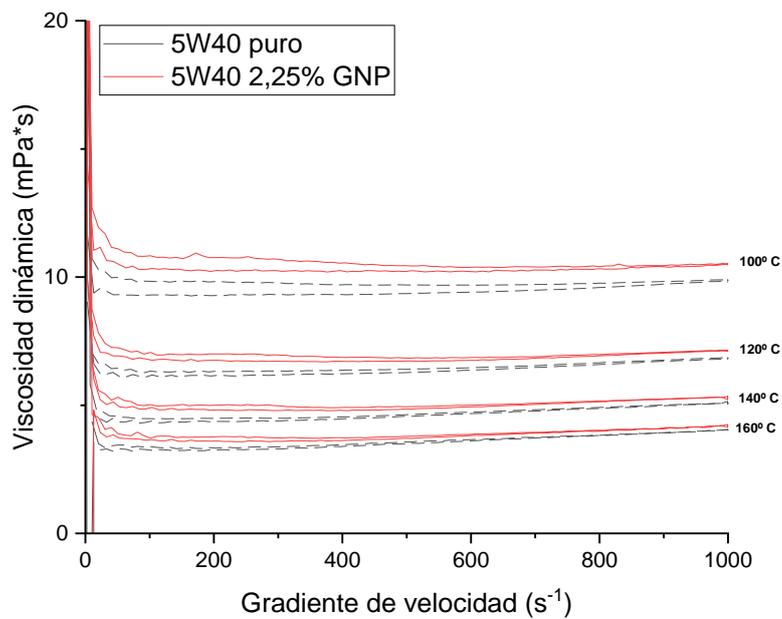


Figura 4.19: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

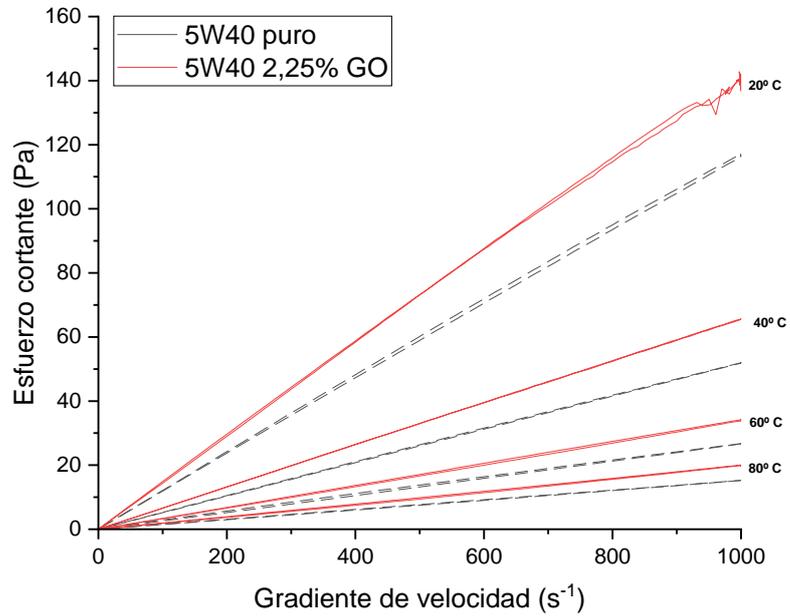


Figura 4.20: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

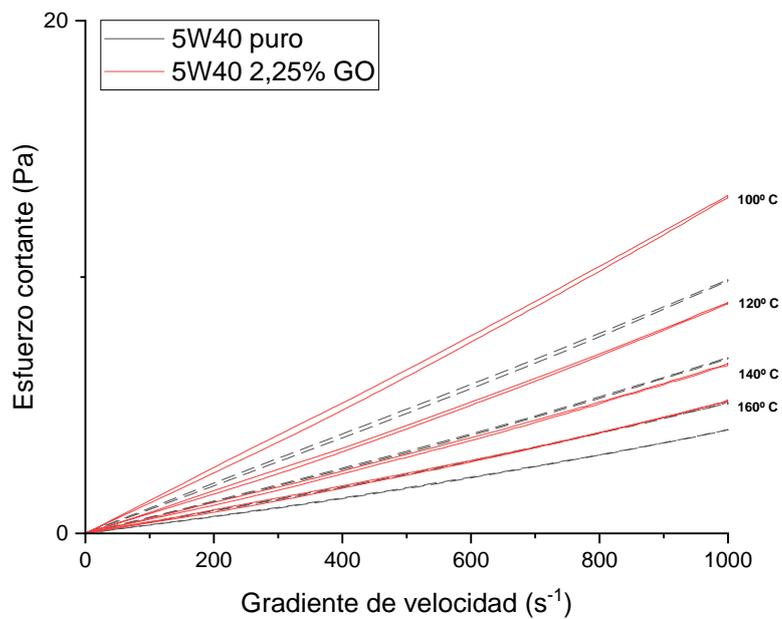


Figura 4.21: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

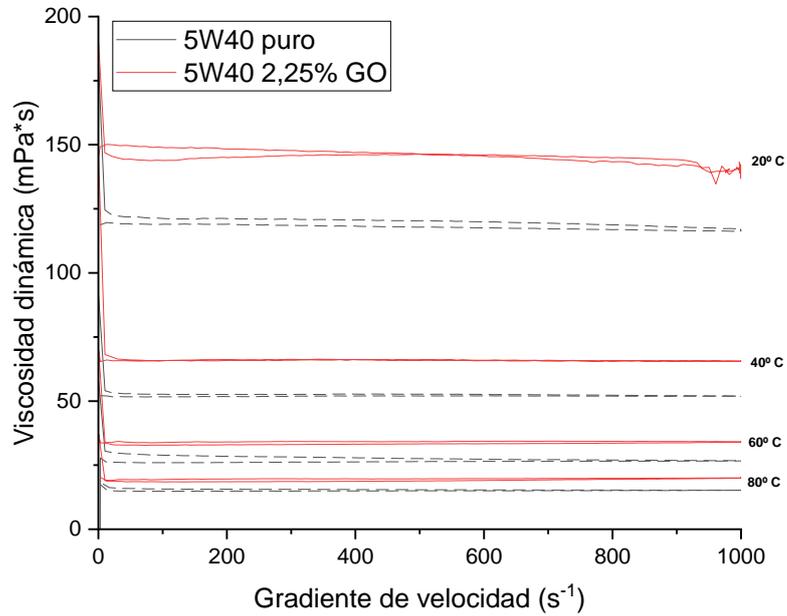


Figura 4.22: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

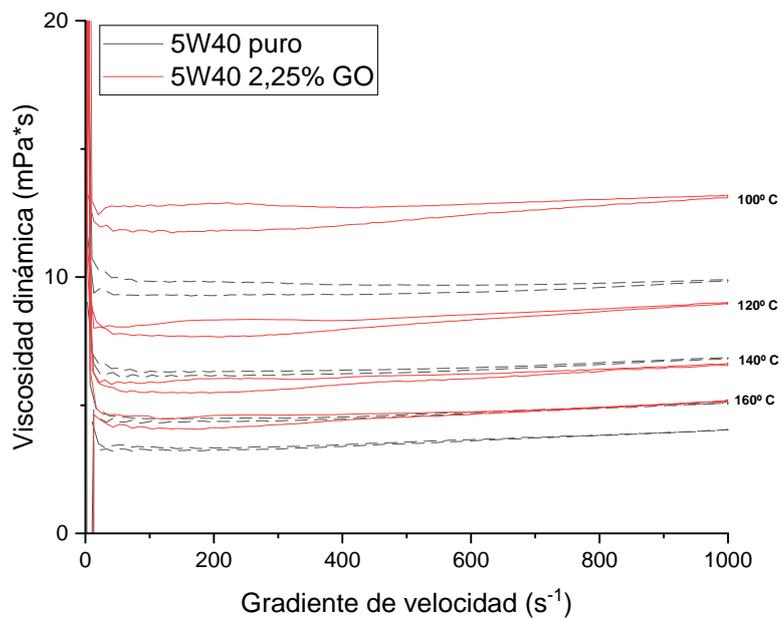


Figura 4.23: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

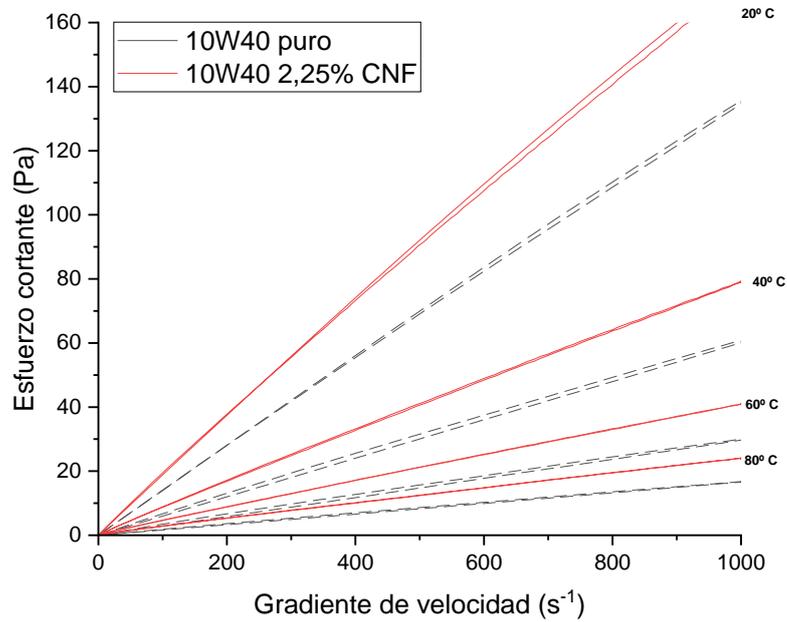


Figura 4.24: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

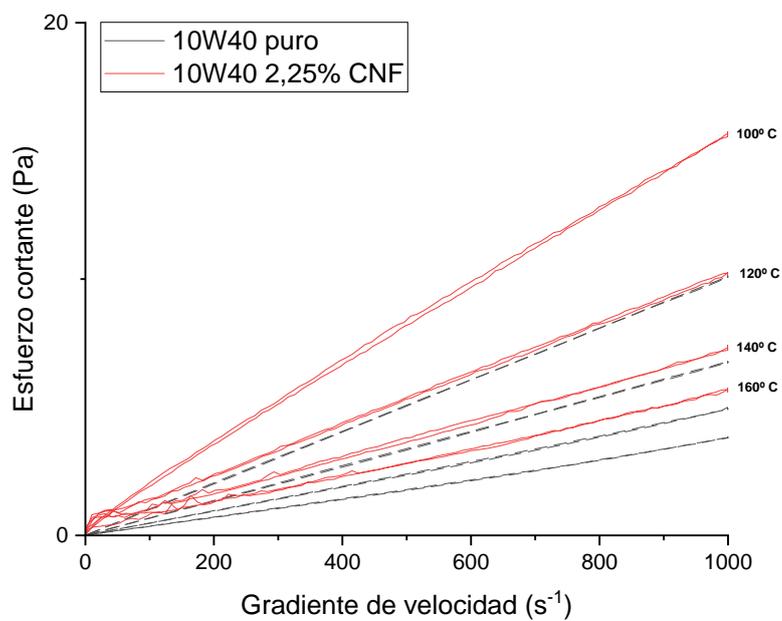


Figura 4.25: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

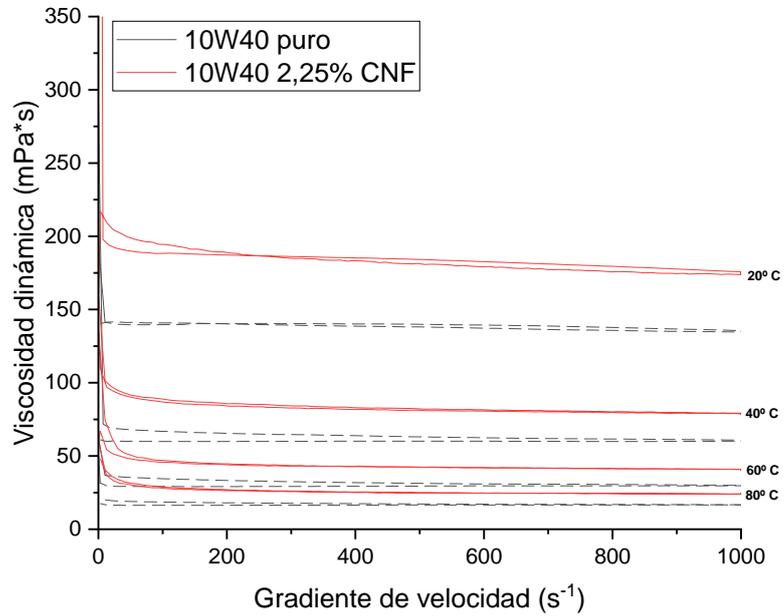


Figura 4.26: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

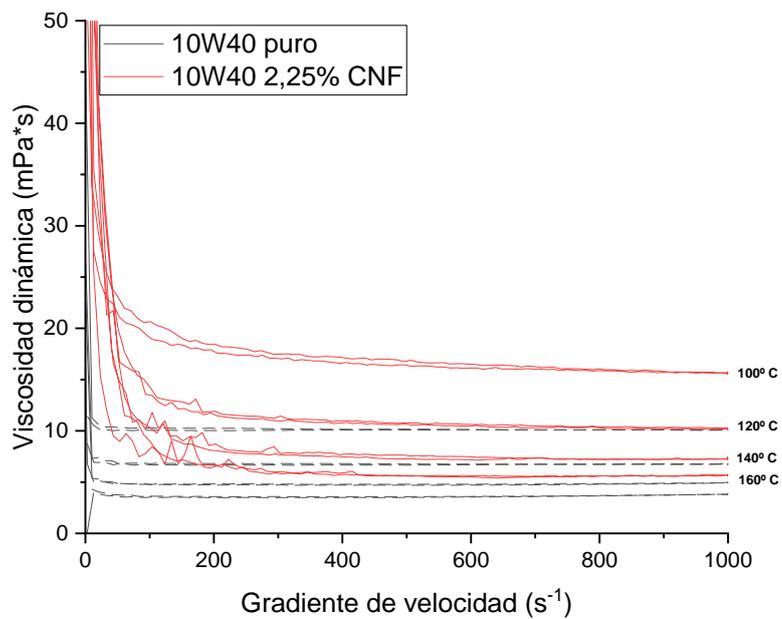


Figura 4.27: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

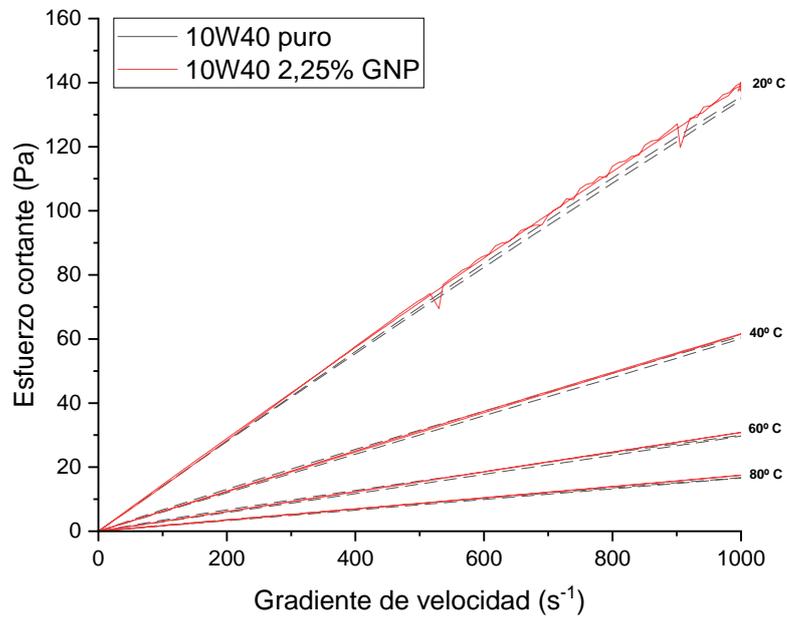


Figura 4.28: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

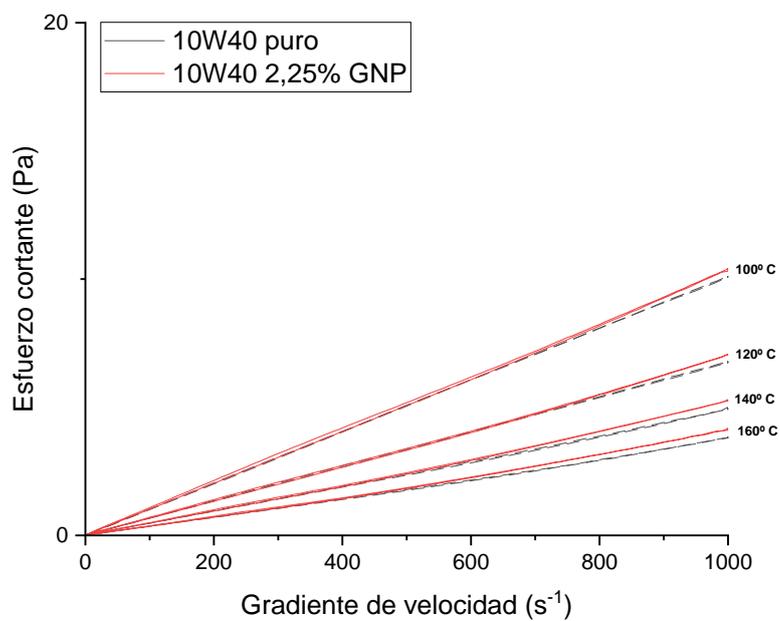


Figura 4.29: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

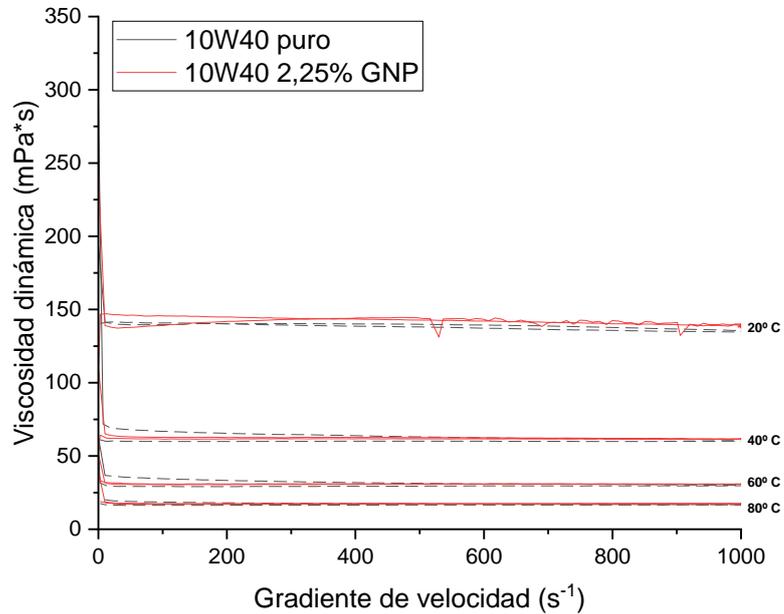


Figura 4.30: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

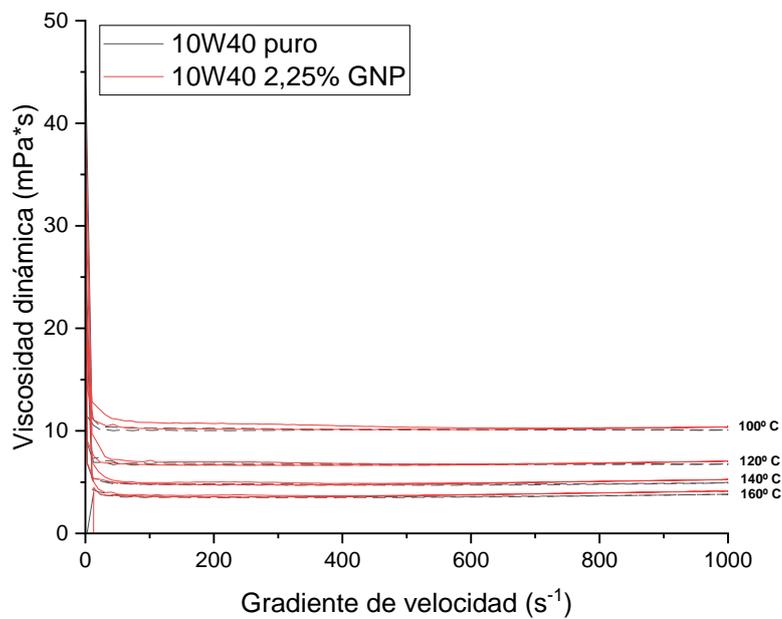


Figura 4.31: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

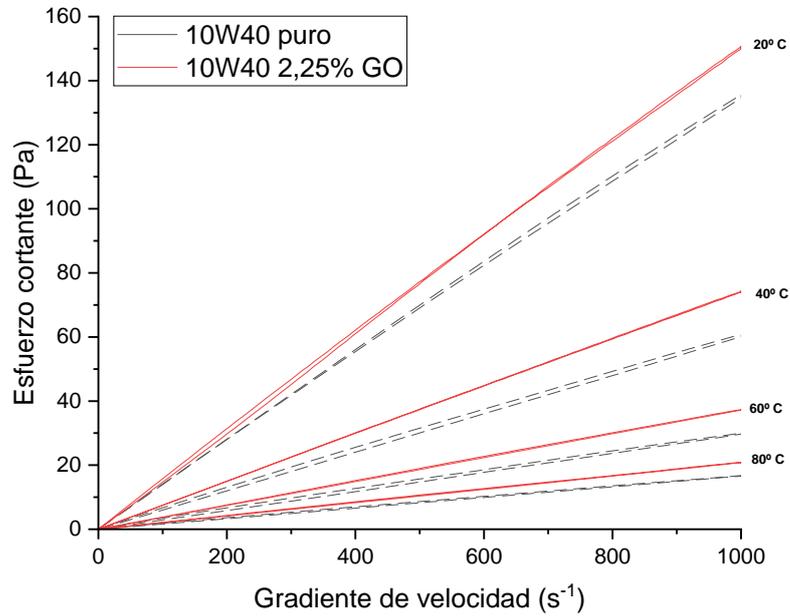


Figura 4.32: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

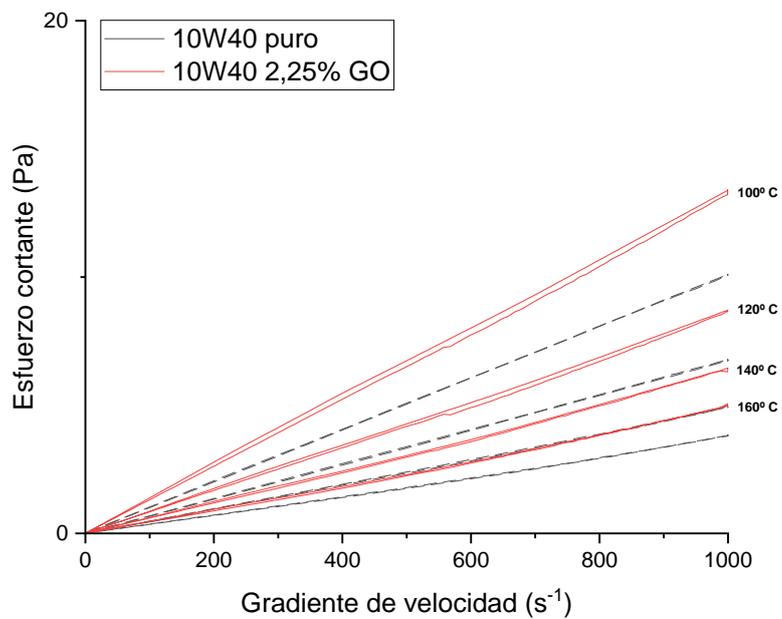


Figura 4.33: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

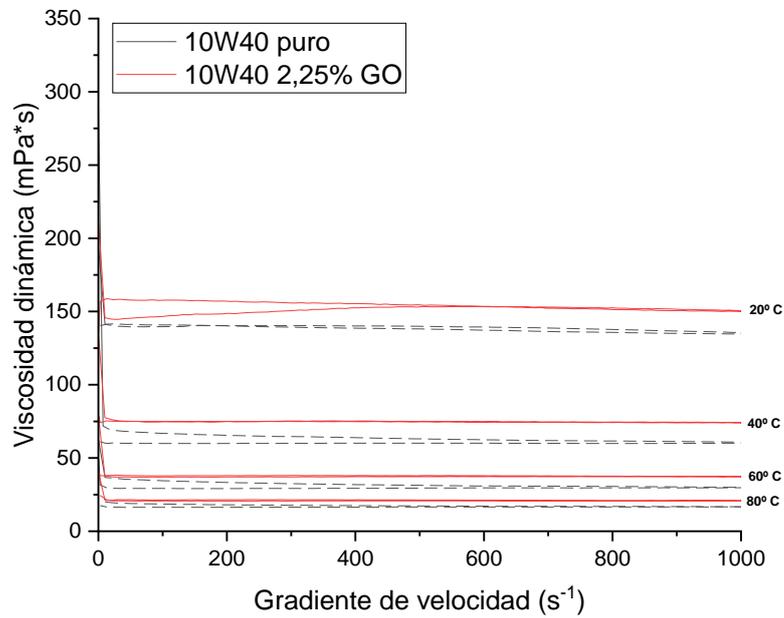


Figura 4.34: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

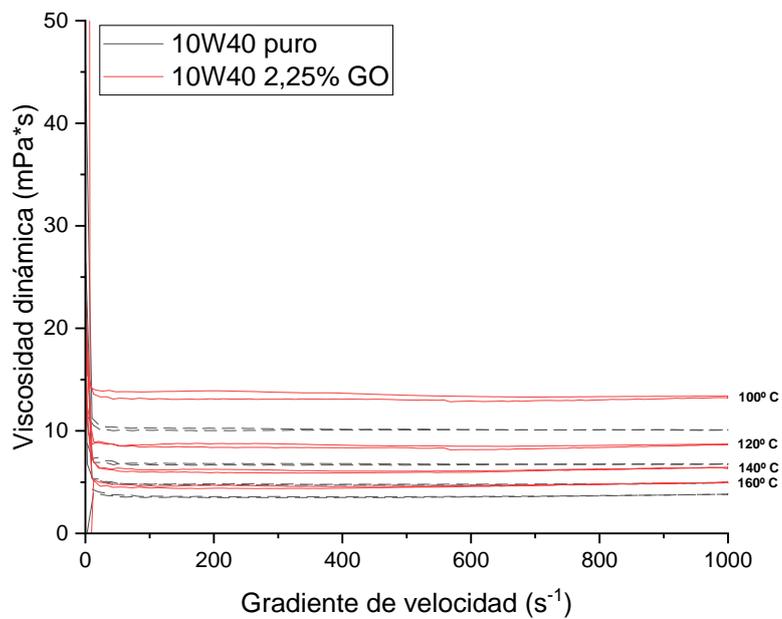


Figura 4.35: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

### 4.3. ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD

Una vez obtenidos los resultados de viscosidad, se puede hacer una nueva comparativa de estos datos frente a la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para ello tomaremos los datos de viscosidad a gradiente de velocidad de  $500 \text{ s}^{-1}$  y, usando la Ecuación 2.2, obtener la viscosidad cinemática (cSt). Estas comparativas permiten analizar las diferencias de viscosidad entre el aceite puro y las muestras de ese mismo aceite con una concentración fija de nanomaterial. De este modo lo que se consigue es analizar las diferencias en viscosidad entre los materiales en un rango de temperaturas.

Se espera ver curvas descendientes en viscosidad a medida que aumente la temperatura, así como una disminución de las diferencias de viscosidad entre nanomateriales.

Se representan en este apartado los valores de viscosidad cinemática frente a temperaturas de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $160^{\circ}\text{C}$  en incrementos de  $20^{\circ}\text{C}$  (excepto los aceites 0W30 que usan incrementos de  $40^{\circ}\text{C}$ ) para aceites 0W30, 5W40 y 10W40 para concentraciones 1,5%, 2,25% y 3% de nanomateriales CNF, GNP y GO.

En las curvas de viscosidad en función de la temperatura (Figura 4.36 a Figura 4.44) se corroboran las conclusiones acerca de las GNP, en las que la viscosidad prácticamente no varía respecto a la del aceite puro (2 cSt en la Figura 4.41). En algún caso (Figuras 4.39 y 4.42) se observa que la viscosidad a  $20^{\circ}\text{C}$  es ligeramente inferior (9 cSt) a la del aceite puro; pero esto se debe, como ya ha sido comentado, a la precipitación de las muestras durante la medida o el calentamiento del reómetro. Respecto al resto de nanomateriales, se confirma lo ya establecido: las CNF son las que más aumentan la viscosidad, seguidas por los GO, y por último las GNP. Cabe destacar que se aprecia un aumento de viscosidad para la muestra de aceite 10W40 al 3% de GNP, por lo que podría tratarse de un indicador de que a partir del 3% en concentración se comenzarían a ver aumentos más notables en la viscosidad. Esto requiere de más investigación.

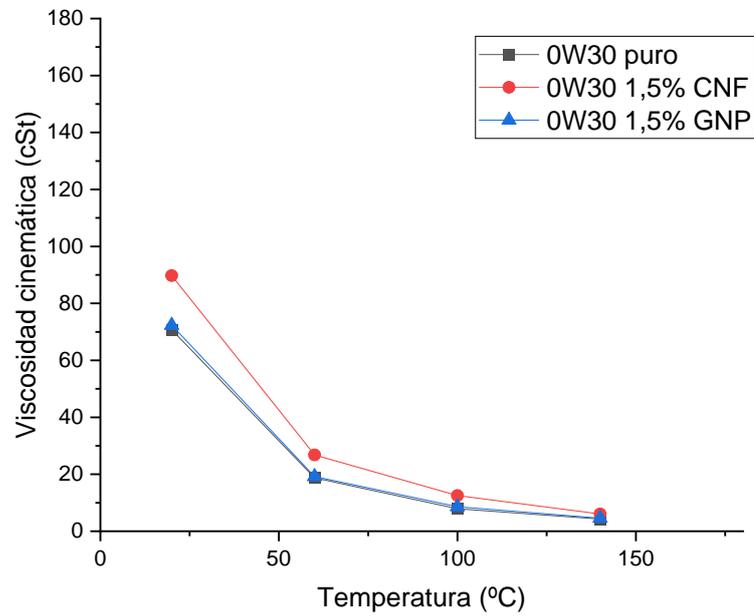


Figura 4.36: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 1,5% de nanomateriales.

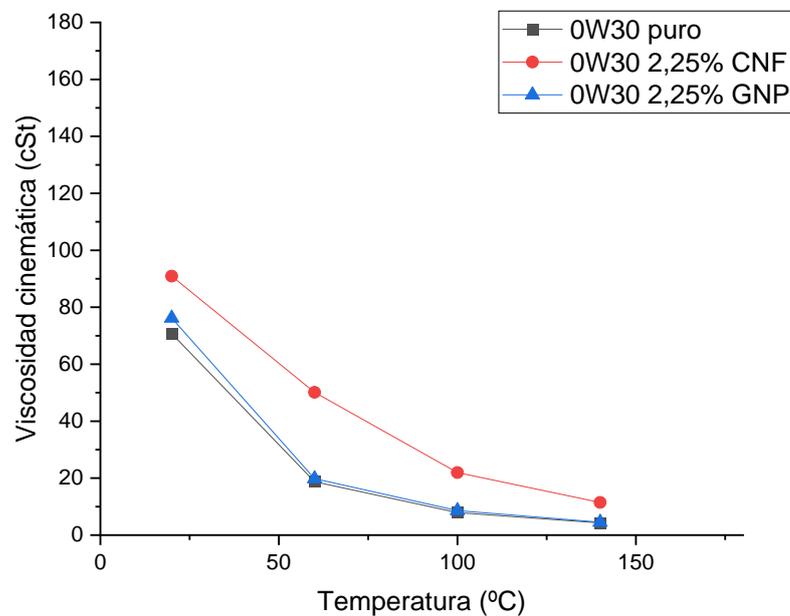


Figura 4.37: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 2,25% de nanomateriales.

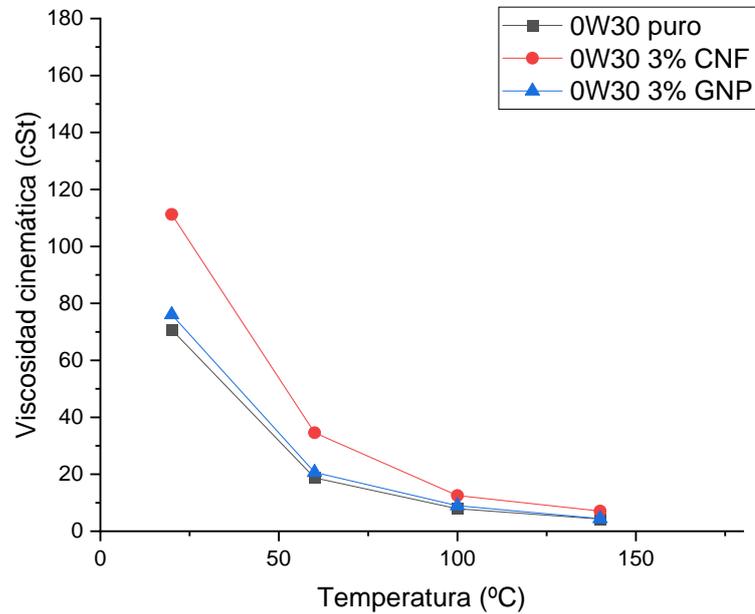


Figura 4.38: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 0W30 a concentración 3% de nanomateriales.

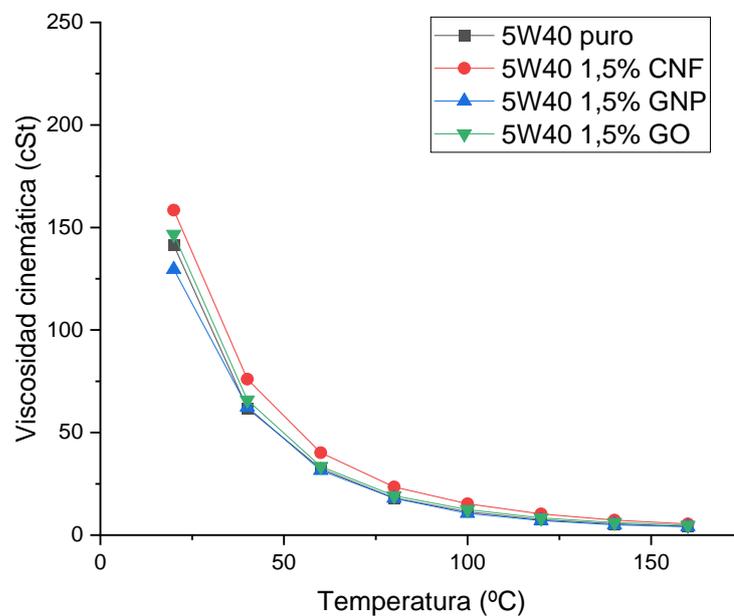


Figura 4.39: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 1,5% de nanomateriales.

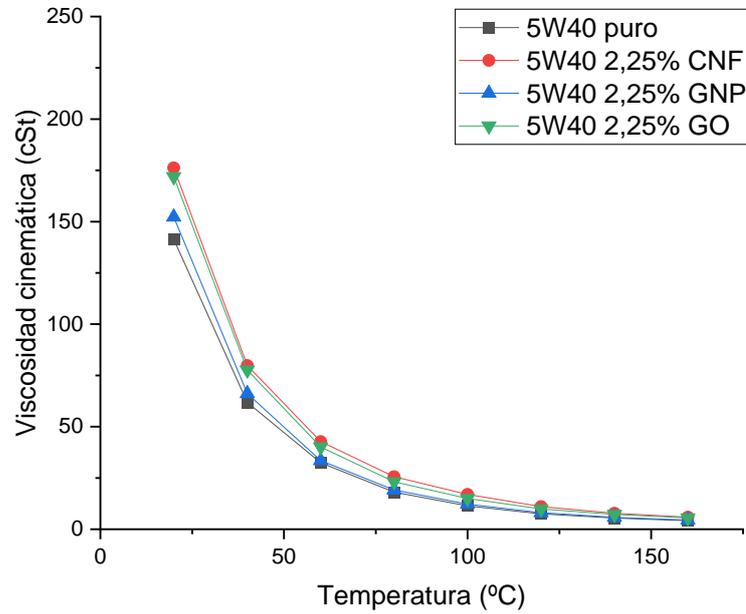


Figura 4.40: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 2,25% de nanomateriales.

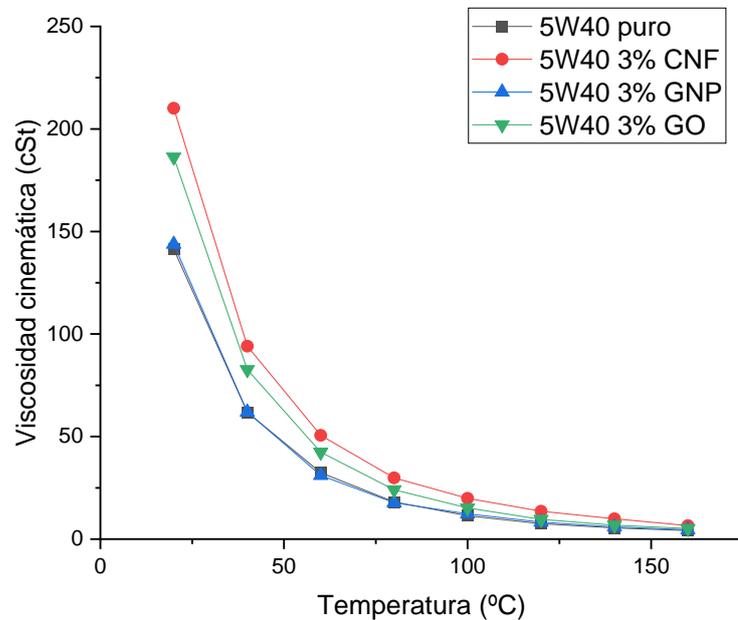


Figura 4.41: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 5W40 a concentración 3% de nanomateriales.

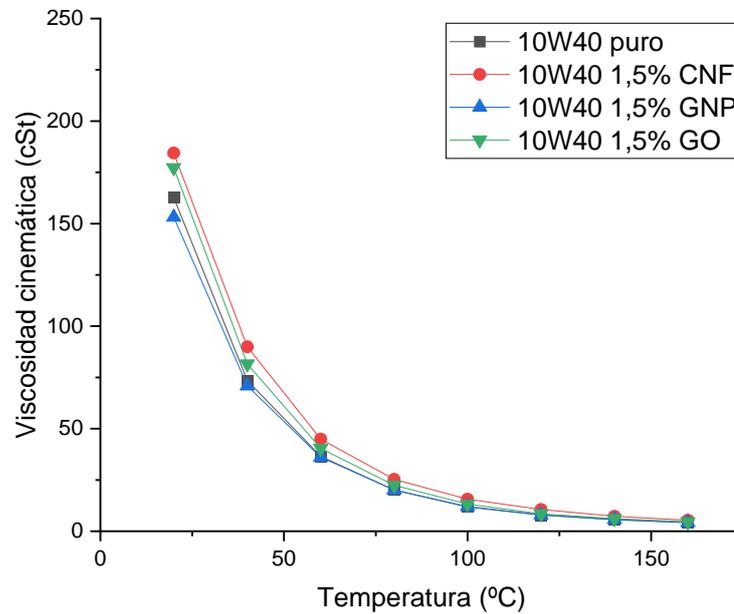


Figura 4.42: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 1,5% de nanomateriales.

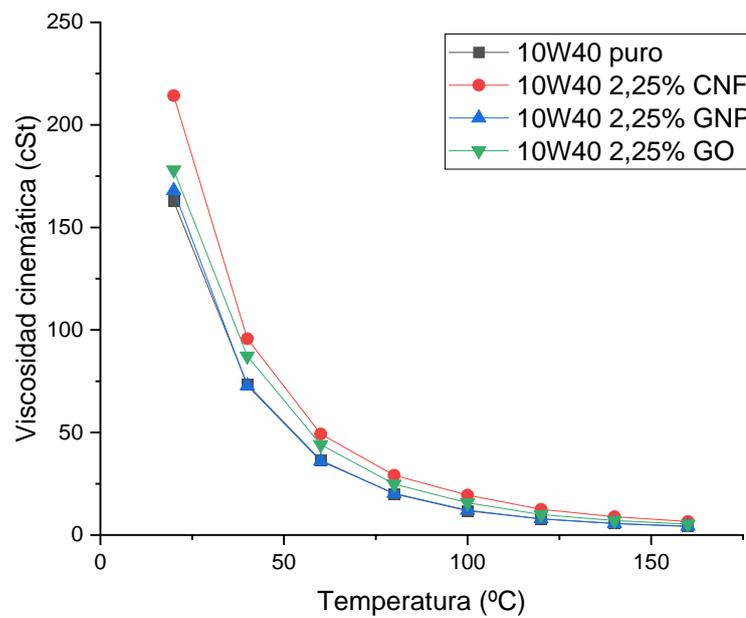


Figura 4.43: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 2,25% de nanomateriales.

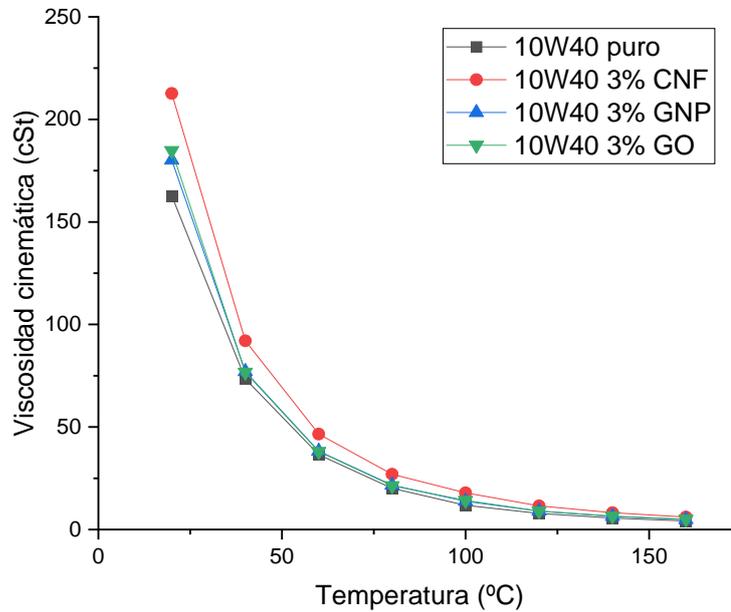


Figura 4.44: Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestras de aceite 10W40 a concentración 3% de nanomateriales.

Para finalizar, se representa la viscosidad cinemática empleada en las gráficas anteriores en función de la concentración (%). Dicha gráfica mostrará la evolución de la viscosidad con la concentración a una temperatura fija.

En esta parte se representará la viscosidad de las diferentes combinaciones de aceites 0W30, 5W40 y 10W40 con nanopartículas CNF, GNP y GO frente al porcentaje de nanopartícula en masa, a temperaturas fijas de 20°C y 100°C.

Con las gráficas de viscosidad frente a concentración (Figura 4.45 y Figura 4.46), se analiza la evolución de los diferentes nanomateriales al ir aumentando su concentración en 0,75%. La mayoría de datos siguen una tendencia lineal creciente, como esperado; pero destacan algunas curvas que hacen un máximo en concentración 2,25%. Esto se debe, como ya ha sido mencionado a problemas de sedimentación de las muestras en la realización de la medida.

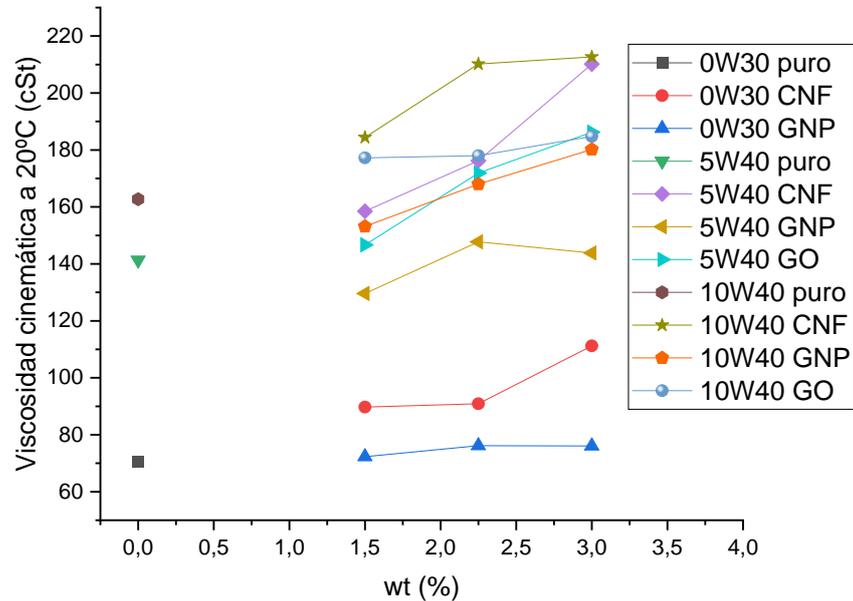


Figura 4.45: Viscosidad cinemática frente a concentración de aceites con nanopartículas a 20°C.

Tabla 4.1: Valores aproximados de viscosidad cinemática (cSt) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 20°C.

Muestras	Concentraciones	Puro	CNF	GNP	GO
0W30	0	70,74	-	-	-
	1,5	-	89,74	72,32	-
	2,25	-	90,92	76,19	-
	3	-	111,23	76,06	-
5W40	0	141,33	-	-	-
	1,5	-	158,47	129,59	146,65
	2,25	-	176,24	147,76	171,89
	3	-	210,12	143,84	186,25
10W40	0	162,72	-	-	-
	1,5	-	184,43	153,12	177,25
	2,25	-	210,17	168,00	178,01
	3	-	212,68	180,17	184,77

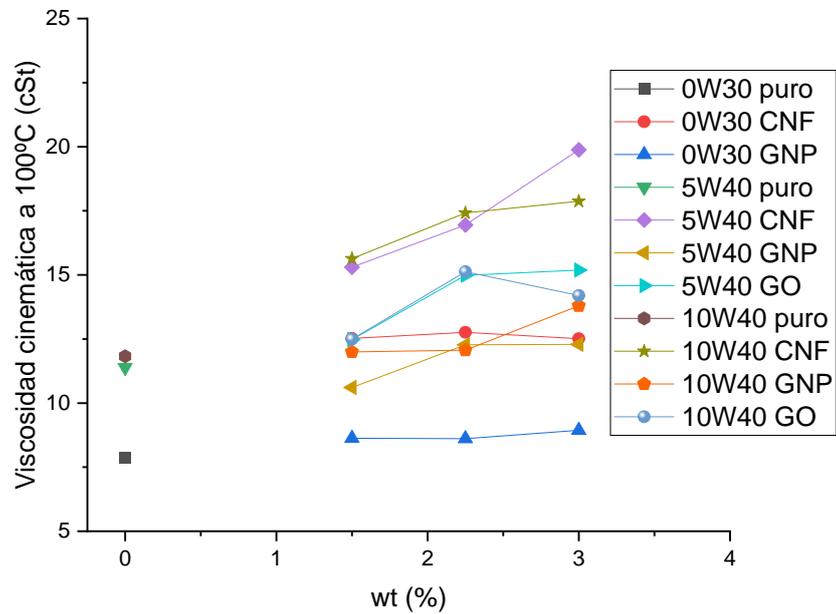


Figura 4.46: Viscosidad cinemática frente a concentración de aceites y nanopartículas a 100°C.

Tabla 4.2: Valores aproximados de viscosidad cinemática (cSt) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 100°C.

Muestras	Concentraciones	Puro	CNF	GNP	GO
<b>0W30</b>	0	7,87	-	-	-
	1,5	-	12,52	8,63	-
	2,25	-	12,76	8,61	-
	3	-	12,51	8,94	-
<b>5W40</b>	0	11,39	-	-	-
	1,5	-	15,30	10,61	12,48
	2,25	-	16,95	12,27	14,98
	3	-	19,88	12,29	15,19
<b>10W40</b>	0	11,83	-	-	-
	1,5	-	15,63	11,99	12,49
	2,25	-	17,42	12,06	15,12
	3	-	17,88	13,80	14,19

## Capítulo 5. Análisis económico

### 5.1. COSTE DE MATERIALES Y MANO DE OBRA

A continuación se calcula el coste de mano de materiales y mano de obra con el fin de obtener el presupuesto de este trabajo.

Para calcular el coste de mano de obra nos basaremos en los datos recogidos en el Boletín Oficial del Estado (BOE) del 7 de julio de 2021, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo general de la industria química [23]. En él se determina que la mano de obra se clasifica como grupo 6 (determinado en el *Artículo 22. Definición de los grupos profesionales*), cuyas actividades son semejantes a la realización de funciones técnicas a nivel académico medio, que consisten en colaborar en trabajos de investigación, control de calidad, estudios, vigilancia o control en procesos industriales o en servicios profesionales o científicos de asesoramiento.

Por tanto, y según el *Artículo 32. Tabla de Salarios Mínimos Garantizados por Grupo Profesional.*, el salario anual correspondiente al grupo 6 en 2022 es de 28.417,30 €. Asumiendo las horas mínimas de trabajo determinadas por el Artículo 5 del BOE [24], 1696 h/año, obtendríamos una remuneración de 16,7873 €/h.

Dadas estas cifras, y estimando las horas de trabajo en el laboratorio en 170, se calcula entonces un costo de mano de obra de 2853,84 €.

Para el coste de los materiales se tiene en cuenta el coste de adquisición, que es de 897 € para los nanomateriales, y de 99,61 € para los aceites.

## 5.2. PRESUPUESTO FINAL

Si se juntan todos los costes individuales, se obtiene un presupuesto final de 3850,45 € (Tabla 5.1)

Tabla 5.1: Desglose del presupuesto del trabajo.

Material	Cantidad	Coste (€)
CNF	25 g	147,00
GNP	10 g	50,00
GO	10 g	700,00
0W30	5 L	45,99
5W40	5 L	30,95
10W40	5 L	22,67
Mano de obra	170 h	2853,84
<b>Total</b>		3850,45

Si bien el coste principal es el de mano de obra, destaca el elevado precio de los GO. Esto se debe al complejo y caro proceso de obtención de este material.

## Capítulo 6. Análisis medioambiental

### 6.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE

Con este análisis se busca estudiar el impacto medioambiental que produce en todos los aspectos (teniendo en cuenta la salud humana, el ecosistema y los recursos utilizados) la síntesis tanto de los aceites lubricantes como de los nanomateriales basados en el carbono que se emplean en este trabajo. Para ello, se aplicará la metodología de Análisis de Ciclo de Vida a la parte de sintetizado de los materiales, sin tener en cuenta otras fases como el transporte o el tratamiento de residuos. Se trata de un área de gran interés debido al creciente uso de nanomateriales en investigación e implementación en la vida diaria de las personas.

Para realizar este análisis se usará el software SimaPro versión 9.2.0.1. Este programa nos permitirá realizar múltiples análisis de diferentes parámetros dependiendo del método de evaluación escogido. En este trabajo, el análisis se centrará en el método IPCC a 20 años, que proporciona la huella de carbono; y en el método ReCiPe, método global que aporta un análisis de los niveles de afectación en distintas categorías de impacto, como pueden ser eutrofización marina, uso de la tierra, o afectación a la salud humana por el calentamiento global.

### 6.2. Análisis de inventario

Para elaborar el análisis, primero se deben concretar los análisis de inventario, que permiten establecer una referencia de las cantidades de diferentes elementos que conforman cada uno de los elementos que se van a someter a estudio.

Para ello, las cantidades utilizadas se basan en la síntesis de los nanomateriales recogidas en la bibliografía. Para determinar la cantidad de CNF se empleará “*Pilot plant scale study of the influence of the operating conditions in the production of carbon nanofibers*”, de la Universidad de Castilla-La Mancha [25]. En el caso del GNP se usará “*Mechanochemical Synthesis of Graphene Nanoplatelets from Expanded Graphite Compound*”, de la Universidad Técnica Estatal de Tombov, Rusia [26]. Para el estudio del GO se basará en “*Preparation of graphitic oxide*”, de Baroid Division National Lead Company [27].

Alberto López Fraile

---

Cabe destacar que, debido a la imposibilidad de acceder a la información de la síntesis de los aceites comerciales (dado que se trata de información restringida o patentada por las empresas), se ha escogido un aceite de motor genérico, el que figura en la base de datos SimaPro, y simplemente se ha tenido en cuenta la densidad del aceite utilizado [28]. Dicho aceite no tiene en cuenta los aditivos habituales que suelen llevar (antioxidantes, reductores de fricción, antiespumantes, etc.), ya que tampoco se ha podido acceder a la información de composición.

### **Nanofibras de carbono (CNF) 88g**

*Tabla 6.1: Tipos y cantidades de reactivos utilizados para sintetizar 88 g de CNF.*

<b>Reactivos</b>	<b>Cantidad</b>
NiSiO <sub>2</sub>	5 g
H <sub>2</sub>	2,25 g
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	117,8 g
Helio	4,46 g
Agua	10 Kg
Ácido Fluorhídrico	13,92 g

### **Óxido de Grafeno (GO) 188 g**

*Tabla 6.2: Tipos y cantidades de reactivos necesarios en la síntesis de 188 g de GO.*

<b>Reactivos</b>	<b>Cantidad</b>
Grafito	100 g
Nitrato Sódico	50 g
Ácido Sulfúrico	4,209 Kg
Permanganato potásico	300 g
Agua	4,6 Kg
Agua caliente	14 Kg
Peróxido de Hidrógeno	0,609 Kg

Alberto López Fraile

---

### **Nanoplaquetas de Grafeno (GNP) 10,5g**

Tabla 6.3: Tipos y cantidades de reactivos utilizados en la síntesis de 10,5 g de CNF.

Reactivos	Cantidad
Grafito	5 g
Persulfato de amonio	6,67 g por 1g de grafito (33,35g)
Ácido Sulfúrico	98 g
Carbamida	60 g
Glicerol	100 g por 5g de grafito (100g)
Agua	250 g

### **Aceites**

Tabla 6.4: Tipos y densidades de aceites SAE empleados.

Aceite	Densidad (g/mL)
0W30	0,8467
10W40	0,8598
5W40	0,8514

Una vez especificado el análisis de inventario para cada material de este trabajo, se añaden al programa estos datos y los datos concretos de las cantidades utilizadas en los procesos experimentales que figuran en la siguiente tabla.

### **Cantidad total utilizada**

Tabla 6.5: Cantidades totales de los materiales empleados en las muestras.

Nanomaterial / Aceite	Cantidad
GNP	3,6667 g
GO	3,6667 g
CNF	2,3673 g
0W30	160 mL
5W40	180 mL
10W40	180 mL

### 6.3. EVALUACIÓN DE IMPACTO

Como se ha comentado anteriormente los métodos de evaluación que se van a aplicar son el IPCC y el ReCiPe.

Por un lado, podemos analizar con el método IPCC y obtener los kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente de cada uno de los tres aceites con un 3% de CNF, y de las tres nanopartículas al 3% en el aceite 10W40. También tendremos una comparativa del porcentaje del total que aporta cada uno de los materiales a la huella de carbono. Se mostrará también una comparativa sobre el 100% del material más contaminante para ayuda a la visualización de los resultados, dada la proximidad de los resultados entre sí.

Tabla 6.6: Cantidad equivalente en kg CO<sub>2</sub> de contaminación de los aceites al 3% CNF.

Categoría de impacto	Unidad	CNF 3% 0W30	CNF 3% 10W40	CNF 3% 5W40
IPCC GWP 20a	kg CO <sub>2</sub> eq	0.0257	0.0261	0.0258

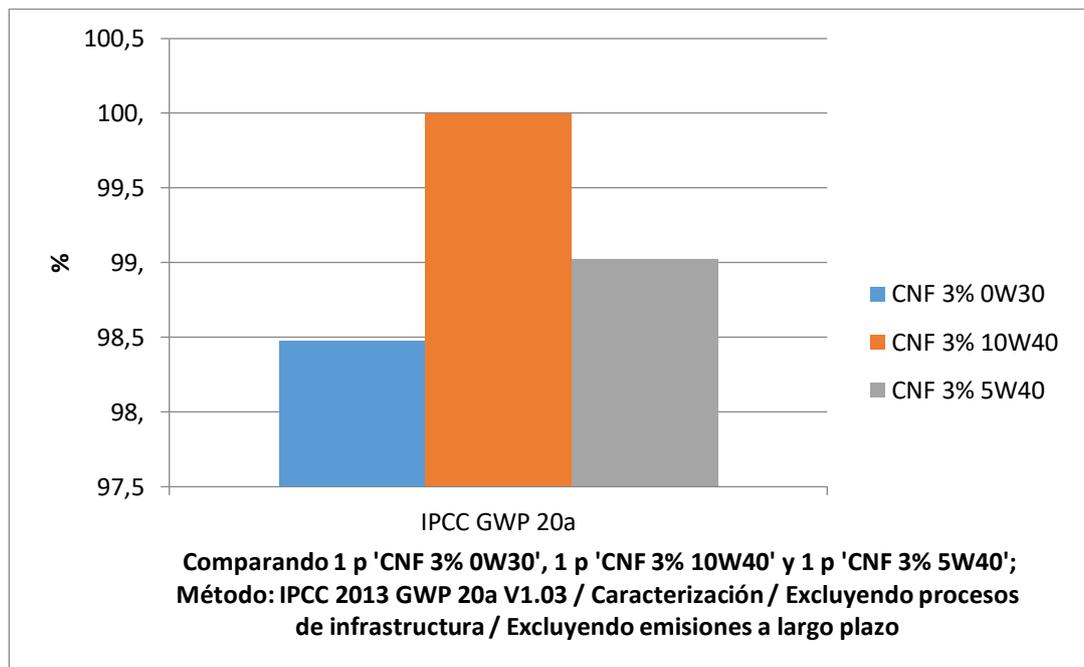


Figura 6.1: Gráfico de barras comparativo de la cantidad de kg de CO<sub>2</sub> equivalente que supone cada aceite al 3% CNF.

Alberto López Fraile

Podemos observar en la Figura 6.1 y Tabla 6.1 que en cuanto a los aceites: el 10W40 es el más contaminante, seguido por el 5W40 y el 0W30. Podría deducirse que existe una relación proporcional entre la viscosidad y la huella de carbono; a mayores números (de arranque en frío y funcionamiento en caliente), mayor huella de carbono, pero realmente son valores prácticamente iguales.

Tabla 6.7: Cantidad equivalente en kg CO<sub>2</sub> de contaminación de los nanomateriales al 3% en aceite 10W40.

Categoría de impacto	Unidad	CNF 3% 10W40	GNP 3% 10W40	GO 3% 10W40
IPCC GWP 20a	kg CO <sub>2</sub> eq	0.0261	0.0529	0.0323

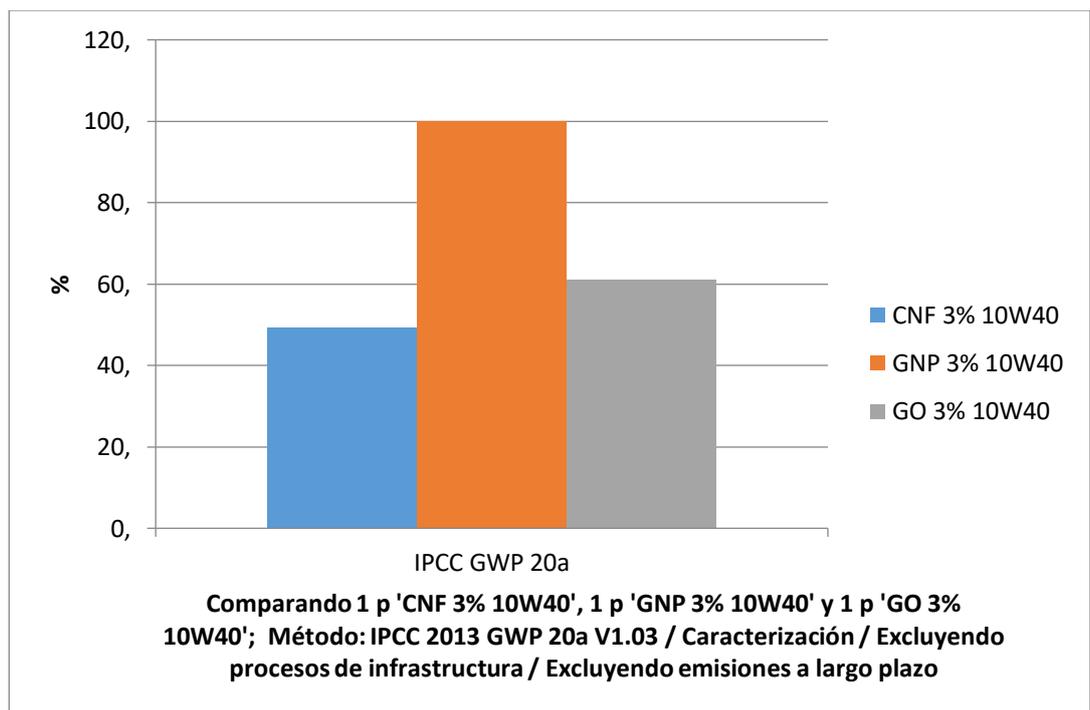


Figura 6.2: Gráfico de barras comparativo de la cantidad de kg de CO<sub>2</sub> equivalente que supone cada nanomaterial al 3% en aceite 10W40.

Alberto López Fraile

En cuanto a las nanopartículas, podemos concluir de la Tabla 6.2 y de la Figura 6.2 que existe una clara mayor huella en las GNP que en las otras dos (prácticamente la misma que la combinación de ambas).

Tabla 6.8: Cantidad equivalente en kg CO<sub>2</sub> de contaminación de los materiales.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Aceite de motor 0W30	Aceite de motor 10W40	Aceite de motor 5W40
IPCC GWP 20a	kg CO <sub>2</sub> eq	0.87	0.19	0.22	0.22

CNF Carbon Nanofibers	GNP Graphene Nanoplatelets	GO Graphene Oxide
0.01	0.2	0.04

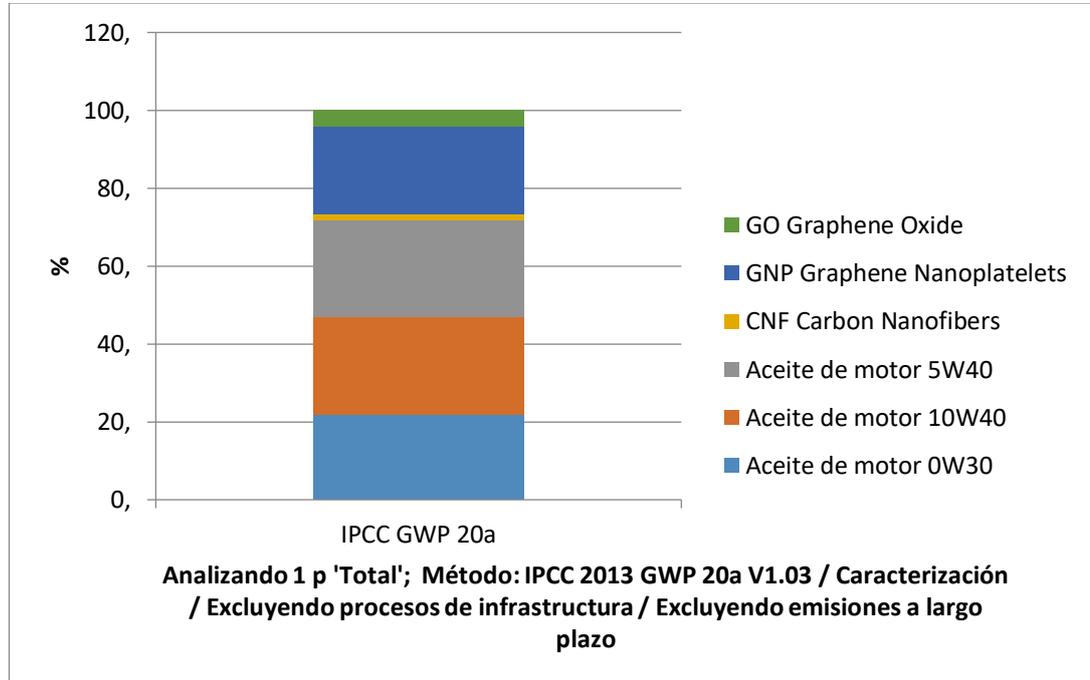


Figura 6.3: Gráfico comparativo del porcentaje sobre el total de kg de CO<sub>2</sub> equivalente que supone cada material.

Alberto López Fraile

En lo respectivo a la Figura 6.3 podemos observar una comparativa del porcentaje total de huella de carbono que supondrá cada material por separado. Destaca el hecho de que los tres aceites tienen valores similares, que se debe a la variación en masa entre ellos, pero no en composición (dado que se ha usado la misma base de aceite lubricante). También destaca el porcentaje ocupado por las GNP, que siendo las partículas más contaminantes se sitúan a un nivel similar de contaminación que el aceite, a pesar de ser una masa muy inferior la usada. De esto, podemos concluir que el material más contaminante de los que usamos es con diferencia las GNP.

Por otro lado, obtenemos con el método ReCiPe una evaluación de la afectación a cada uno de los grupos principales del medioambiente (salud humana, ecosistema y recursos); así como a los subgrupos (categorías de impacto) que los componen. La evaluación se hace en milipuntos (mPt), siendo la carga ambiental anual media de un ciudadano europeo de 100 puntos (Pt).

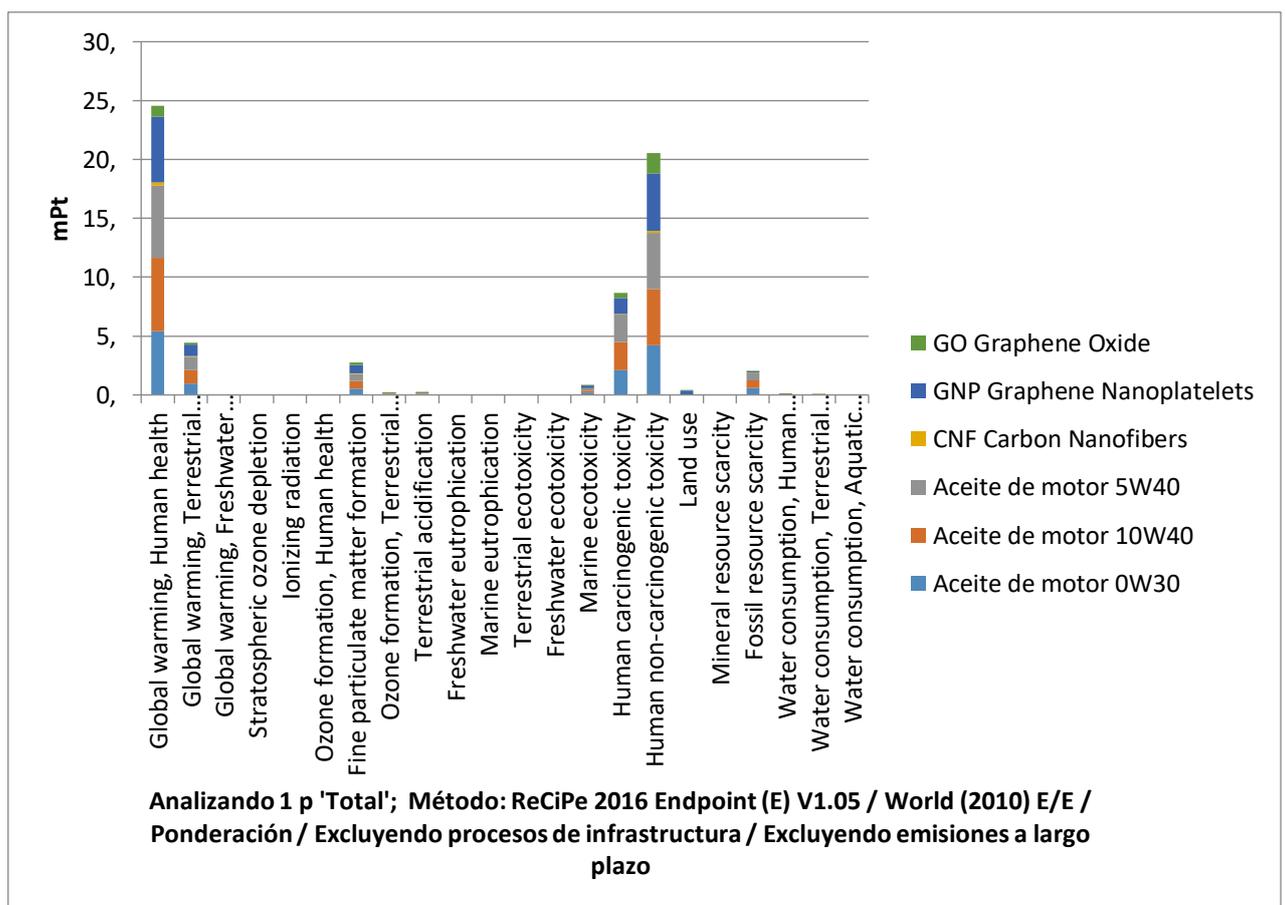


Figura 6.4: Carga ambiental en mPt sobre las categorías de impacto.

Alberto López Fraile

---

Si analizamos estos resultados del análisis ReCiPe, podemos determinar de la Figura 6.4 que las subcategorías que se verán más afectadas serán: salud humana por calentamiento global (24,5 mPt), toxicidad humana no carcinogénica (20,5 mPt), y toxicidad humana carcinogénica (8,5 mPt). Al igual que antes, las categorías que más peso tienen son los aceites y la GNP, reiterando las conclusiones ya obtenidas. A estas categorías las siguen: ecosistemas terrestres por calentamiento global, formación de materia de partículas finas, ecotoxicidad marina, y escasez de recursos fósiles; todas ellas apreciables pero inferiores a las 5 mPt. El resto de categorías son despreciables en comparación.

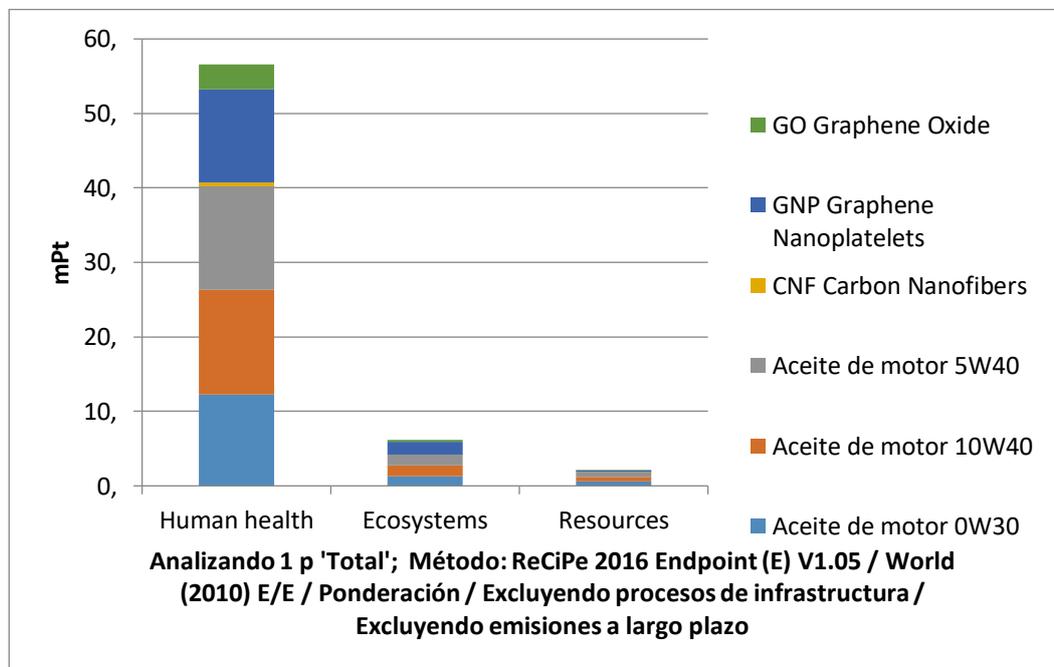


Figura 6.5: Carga ambiental en mPt sobre los tres aspectos principales del medioambiente.

En la Figura 6.5 apreciamos las subcategorías agrupadas en las tres principales categorías medioambientales. Se puede observar claramente que la mayor afectación de las muestras sería al componente humano con unas 56,5 mPt. La afectación a ecosistemas o recursos se encuentra por debajo de 10 mPt.

## 6.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Comenzando por los resultados de la huella de carbono obtenidos con el método IPCC a 20 años, se puede concluir que en cuanto a los aceites, el 10W40 es el más contaminante, seguido por el 5W40 y el 0W30, aunque hay que destacar que los valores de Kg CO<sub>2</sub> son muy similares en los tres. Por tanto, independientemente del aceite seleccionado, el impacto medioambiental será prácticamente el mismo.

En cuanto a las nanopartículas, como se ha comentado anteriormente, existe una clara mayor huella de carbono en las GNP que en las otras dos (prácticamente la misma que la combinación de ambas). Esto se debe a que la obtención de uno de los reactivos necesarios para sintetizar las GNP, el glicerol, es bastante contaminante. Por lo tanto, la elección del nanomaterial afectará al impacto medioambiental ocasionado.

Comparando los aceites con los nanomateriales, se observa que las GNP se sitúan a un nivel similar de contaminación que el aceite a pesar de ser una masa muy inferior la usada. Se interpreta, entonces, que el material más contaminante de los que usamos es las GNP.

Si analizamos ahora los resultados obtenidos con el método ReCiPe, se determina que las categorías de impacto más afectadas son: salud humana por calentamiento global, toxicidad humana no carcinogénica, y toxicidad humana carcinogénica. Al igual que se observó con la huella de carbono, los materiales que más impacto medioambiental producen son los aceites y las GNP, reiterando las conclusiones ya obtenidas.

Por último, en la agrupación de las categorías de impacto en los tres grandes grupos se observa que el principal componente afectado sería el grupo que afecta a la salud humana. Pero dado que el límite anual es muy superior a lo obtenido, la elaboración, manipulación y uso de estas muestras no suponen ningún riesgo significativo medioambiental debido a que se han utilizado cantidades muy pequeñas de nanomateriales y de aceites.

## Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

### 7.1. CONCLUSIONES

Una vez evaluados los resultados del trabajo, así como realizados los estudios medioambiental y económico; podemos concluir:

- La presencia de nanopartículas de base carbono CNF, GNP y GO en los aceites lubricantes no cambian su comportamiento reológico. Se mantienen como fluidos newtonianos.
- Los aceites lubricantes en presencia de CNF, GNP y GO cumplen la ley de Newton, siendo la viscosidad constante en función del gradiente de velocidad.
- La viscosidad disminuye para todas las suspensiones estudiadas a medida que aumenta la temperatura, de 150 a 5 mPa·s (se repite el comportamiento para todas las concentraciones).
- La viscosidad de las suspensiones en presencia de nanofibras de carbono aumenta en la medida que aumenta la concentración de sólido, en el rango de 1,5%-3% en masa, a 20°C. Los valores de viscosidad obtenidos van de 158 a 210 cSt. Este comportamiento se repite para todas las temperaturas ensayadas.
- La viscosidad de las suspensiones en presencia de óxido de grafeno aumenta en la medida que aumenta la concentración de sólido, en el rango de 1,5%-3% en masa, a 20°C. Los valores de viscosidad obtenidos van de 147 a 186 cSt. Este comportamiento se repite para todas las temperaturas ensayadas.
- Las suspensiones en presencia de GNP, no tienen un efecto significativo en los cambios de viscosidad, en el rango de 1,5%-3% en masa, a 20°C. Los valores de viscosidad obtenidos van de 130 a 144 cSt. Este comportamiento se repite para todas las temperaturas ensayadas.
- A temperaturas superiores a 100°C las diferencias en valores de viscosidad no son apreciables, al ser utilizadas nanopartículas. Por lo tanto, la elección de la nanopartícula a utilizar dependerá de otros parámetros.

Alberto López Fraile

---

- El presupuesto total obtenido es 3850,45 €.
- De acuerdo al estudio medioambiental realizado, los elementos más contaminantes son los aceites y las nanoplaquetas de carbono. De todas las suspensiones estudiadas, los aceites en presencia de GNP serán las más contaminantes.
- El aspecto medioambiental más afectado es la salud humana, pero se encuentra muy por debajo de los límites de peligro europeos, por lo que las muestras no suponen un peligro medioambiental.

## 7.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Con el fin de completar los datos de este trabajo, y avanzar la investigación en el campo de las aplicaciones de las nanopartículas, se sugiere continuar con las siguientes líneas de trabajo:

- Completar los datos restantes de la investigación analizando el aceite 0W30 con GO.
- Añadir al estudio el aceite 0W40, el cual serviría para añadir más datos al estudio; además de ser de interés de estudio por sus posibles aplicaciones automovilísticas (incluido el Fórmula UEM).
- Realizar estudios de fricción que determinen la viabilidad de uso de las muestras estudiadas, y que confirme que no se produce ningún problema por su aumento en viscosidad.
- Investigar formas de estabilizar las muestras, de tal manera que se reduzcan los problemas de sedimentación.
- Hacer un estudio de envejecimiento de las muestras con el fin de establecer su vida útil y asegurar que no existirá un deterioro del aceite lubricante a largo plazo debido a la adición de los nanomateriales.
- Continuar el estudio con un rango de concentraciones más elevado; y comprobar si las GNP comienzan a mostrar resultados más favorables.

## Bibliografía

1. Poole Jr, C. P., & Owens, F. J. (2003). *Introduction to nanotechnology*. John Wiley & Sons.
2. Feynman, R. (1991). There's plenty of room at the bottom. *Science*, 254(5036), 1300-1301.
3. Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of nanotechnology. *Proceeding of the ICPE*.
4. Smalley, R. E. (1997). Discovering the fullerenes. *Reviews of Modern Physics*, 69(3), 723.
5. Fanfair, D., Desai, S., & Kelty, C. (2007). The early history of nanotechnology. *Connexions*, 6, 1-15.
6. Hulla, J. E., Sahu, S. C., & Hayes, A. W. (2015). Nanotechnology: History and future. *Human & experimental toxicology*, 34(12), 1318-1321.
7. Gómez González, A., Cerpa Naranjo, A., & Rodríguez Mayo, L. (2019). Estudio reológico de aceites lubricantes 5W40 y 10W40 con nanopartículas base grafeno. *Universidad Europea*.
8. Nejari, H., & Lapuerta Amigo, M. (2020). Estudio de lubricidad de aceites lubricantes dopados con nanopartículas. *Universidad de Castilla-La Mancha*.
9. Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., & Kim, S. H. (2009). Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication. *Tribology Letters*, 35(2), 127-131.
10. La, D. D., Truong, T. N., Pham, T. Q., Vo, H. T., Tran, N. T., Nguyen, T. A., ... & Nguyen, D. D. (2020). Scalable fabrication of modified graphene nanoplatelets as an effective additive for engine lubricant oil. *Nanomaterials*, 10(5), 877.
11. Desai, N., Nagaraj, A. M., & Sabnis, N. (2021). Analysis of thermo-physical properties of SAE20W40 engine oil by the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5646-5651.

12. Ahmadi, H., Rashidi, A., Mohtasebi, S. S., & Alaei, M. (2013). Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 1-6.
13. Eswaraiah, V., Sankaranarayanan, V., & Ramaprabhu, S. (2011). Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications. *ACS applied materials & interfaces*, 3(11), 4221-4227.
14. del Río, J. M. L., Guimarey, M. J., Prado, J. I., Lugo, L., López, E. R., & Comuñas, M. J. (2022). Improving the tribological performance of a biodegradable lubricant adding graphene nanoplatelets as additives. *Journal of Molecular Liquids*, 345, 117797.
15. Nicu, R., Ciolacu, F., & Ciolacu, D. E. (2021). Advanced Functional Materials Based on Nanocellulose for Pharmaceutical/Medical Applications. *Pharmaceutics*, 13(8), 1125.
16. Biswas, S., Fukushima, H., & Drzal, L. T. (2011). Mechanical and electrical property enhancement in exfoliated graphene nanoplatelet/liquid crystalline polymer nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(4), 371-375.
17. Poutrel, Q. A., Wang, Z., Wang, D., Soutis, C., & Gresil, M. (2017). Effect of pre and post-dispersion on electro-thermo-mechanical properties of a graphene enhanced epoxy. *Applied Composite Materials*, 24(2), 313-336.
18. Lin, D., Liu, C. R., & Cheng, G. J. (2014). Single-layer graphene oxide reinforced metal matrix composites by laser sintering: Microstructure and mechanical property enhancement. *Acta materialia*, 80, 183-193.
19. Pirro, D. M., Webster, M., & Daschner, E. (2016). *Lubrication fundamentals, revised and expanded*. CRC Press.
20. Bingham, E. C. (1922). *Fluidity and plasticity* (Vol. 2). McGraw-Hill.
21. Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018, November). Scanning electron microscopy (SEM): A review. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania* (pp. 7-9).

22. Centro Nacional de Microscopía Electrónica. Microscopio JEOL JSM 6335F [Fotografía]. <https://cnme.es/index.php/microscopios/microscopios-sem/jeol-ism-6335f>
23. Resolución de 7 de julio de 2021, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo general de la industria química. *Boletín Oficial del Estado*, 171, de 19 de julio de 2021. [https://www.boe.es/eli/es/res/2021/07/07/\(7\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2021/07/07/(7))
24. Resolución de 14 de febrero de 2022, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Acuerdo marco de Sidenor Aceros Especiales, SLU, y Sidenor Investigación y Desarrollo, SA. *Boletín Oficial del Estado*, 49, de 26 de febrero de 2022. [https://www.boe.es/eli/es/res/2022/02/14/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2022/02/14/(3))
25. Jiménez, V., Nieto-Márquez, A., Díaz, J. A., Romero, R., Sánchez, P., Valverde, J. L., & Romero, A. (2009). Pilot plant scale study of the influence of the operating conditions in the production of carbon nanofibers. *Industrial & engineering chemistry research*, 48(18), 8407-8417.
26. Melezhik, A. V., Pershin, V. F., Memetov, N. R., & Tkachev, A. G. (2016). Mechanochemical synthesis of graphene nanoplatelets from expanded graphite compound. *Nanotechnologies in Russia*, 11(7), 421-429.
27. Hummers Jr, W. S., & Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the american chemical society*, 80(6), 1339-1339.
28. Paar, A.. *Viscosity of Engine Oil*. Anton Paar Wiki. Recuperado el 15 febrero 2022 de <https://wiki.anton-paar.com/es-es/aceite-de-motor/>

## Anexos

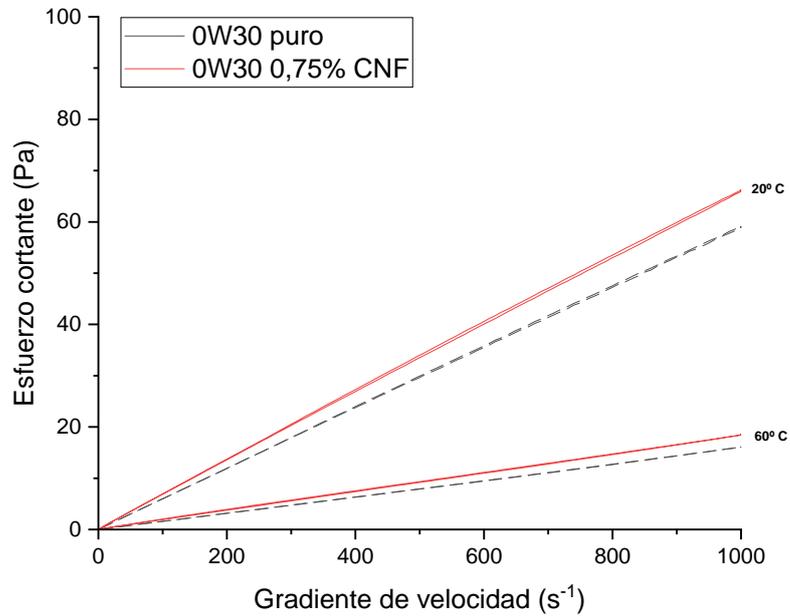


Figura A.1: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

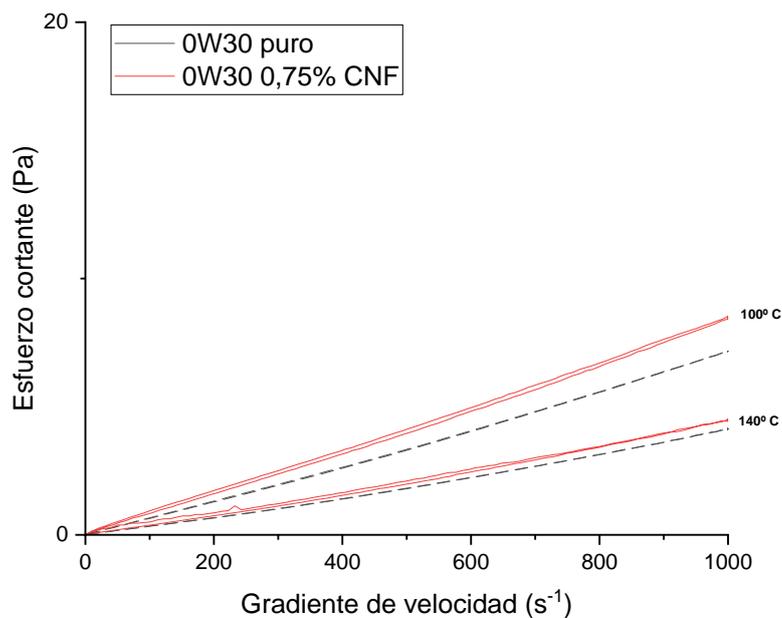


Figura A.2: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

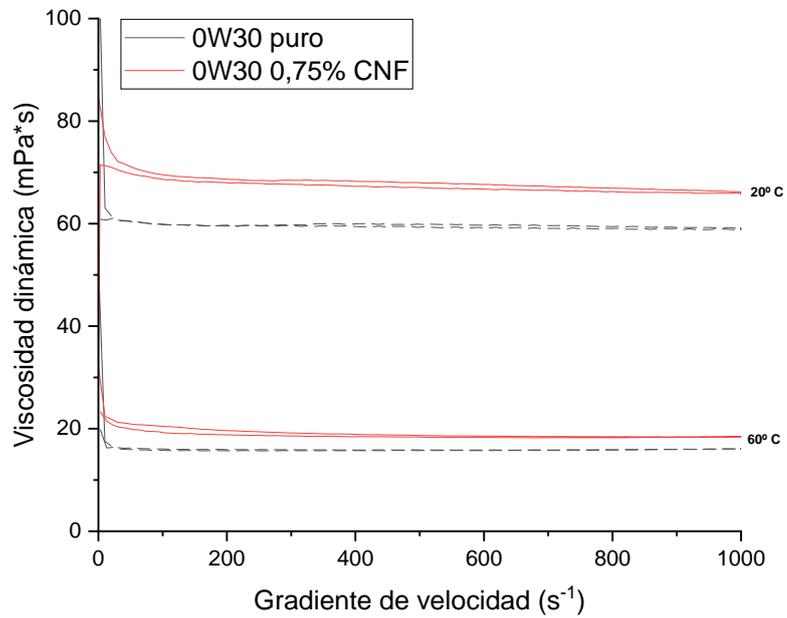


Figura A.3: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

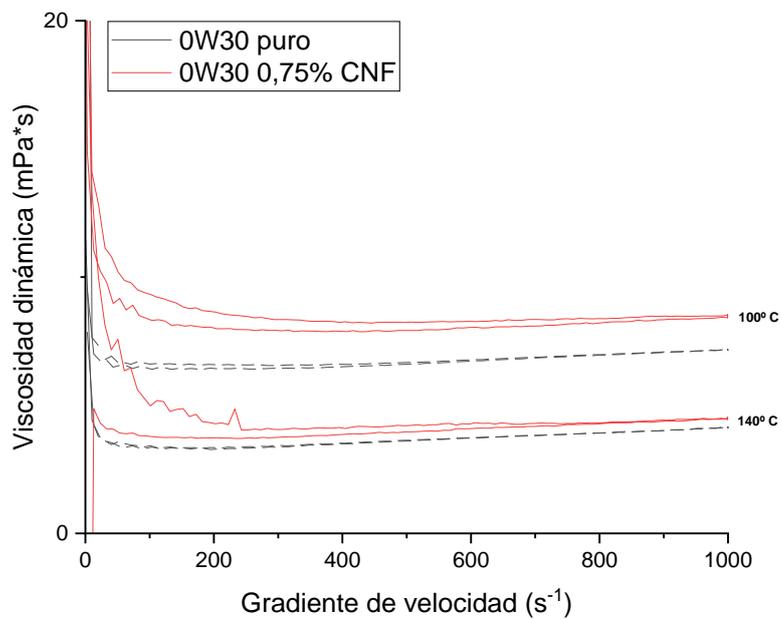


Figura A.4: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

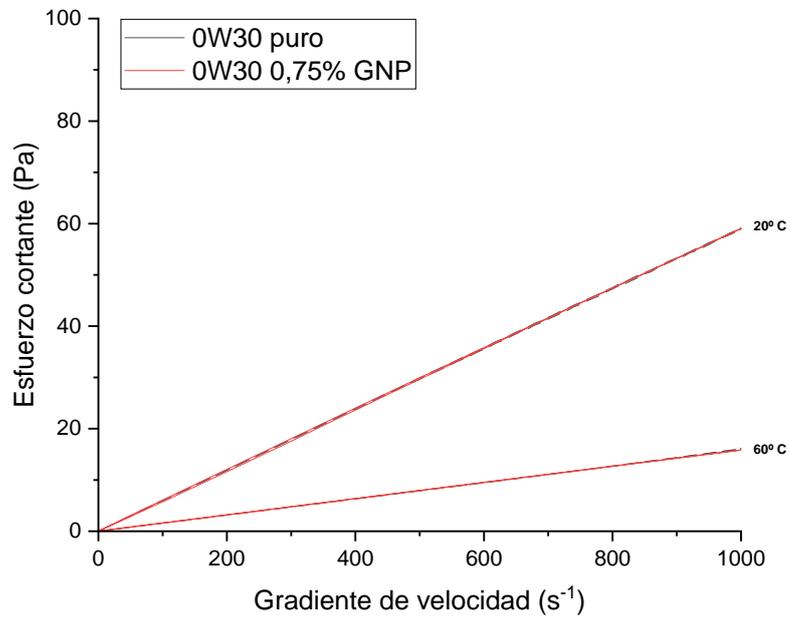


Figura A.5: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

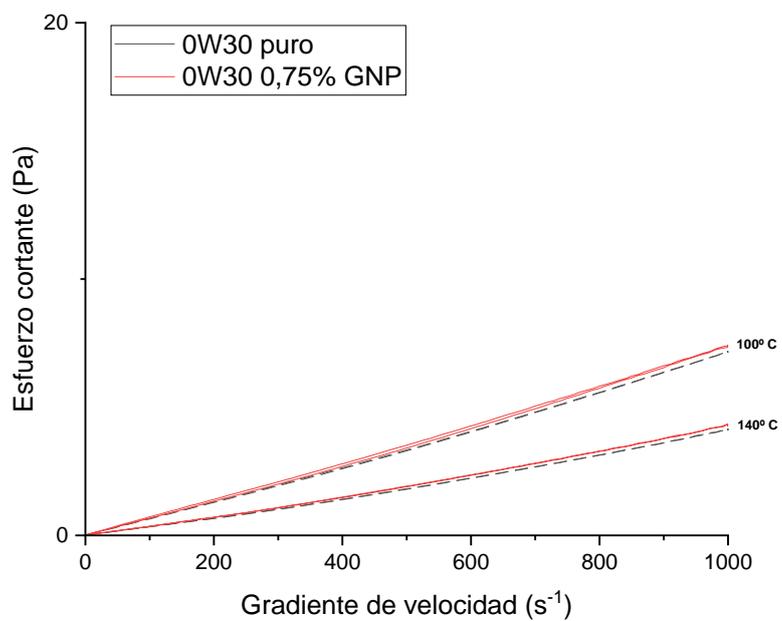


Figura A.6: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

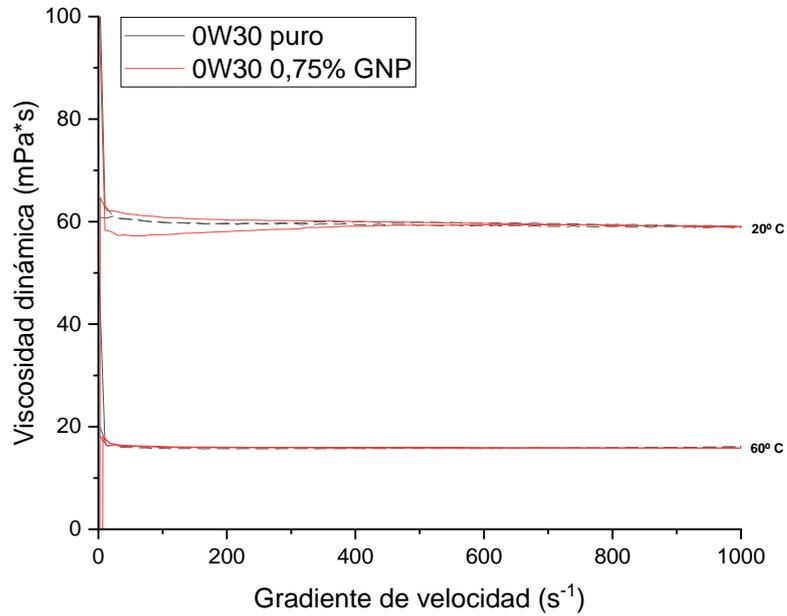


Figura A.7: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

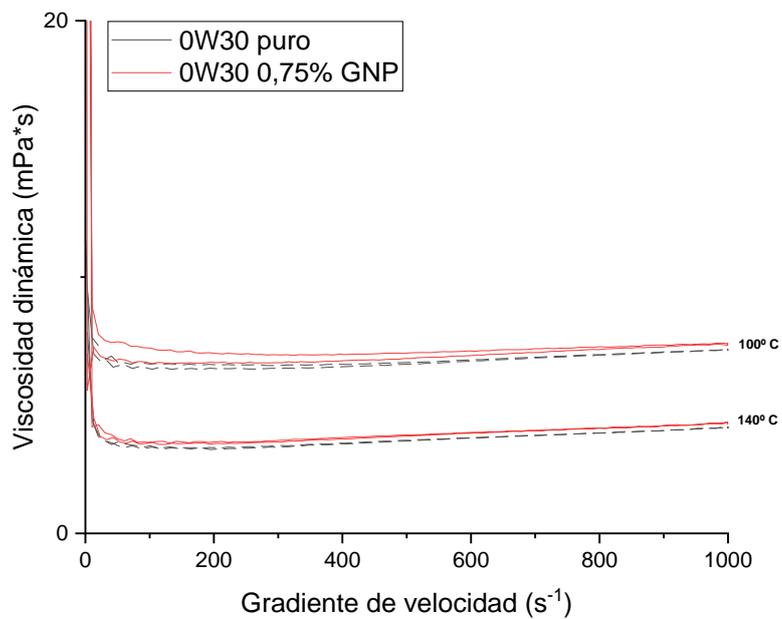


Figura A.8: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 0,75% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

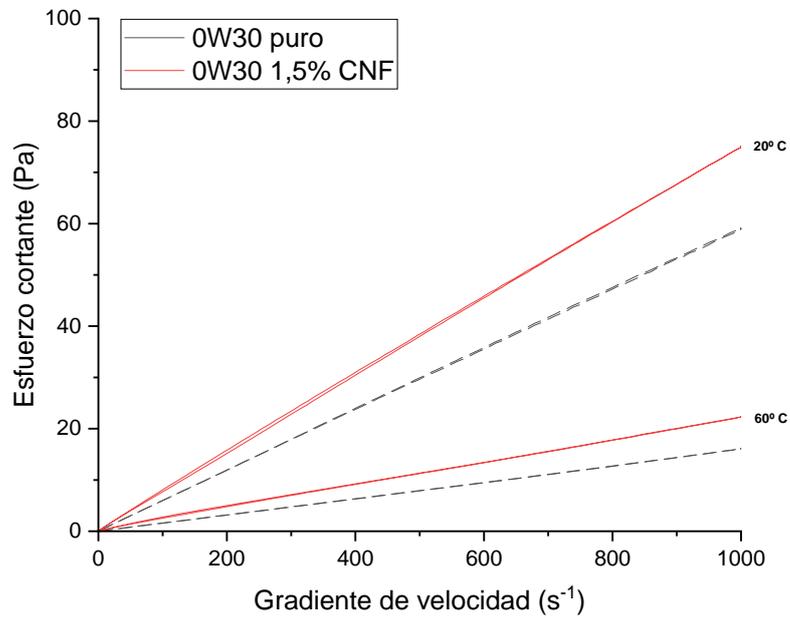


Figura A.9: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

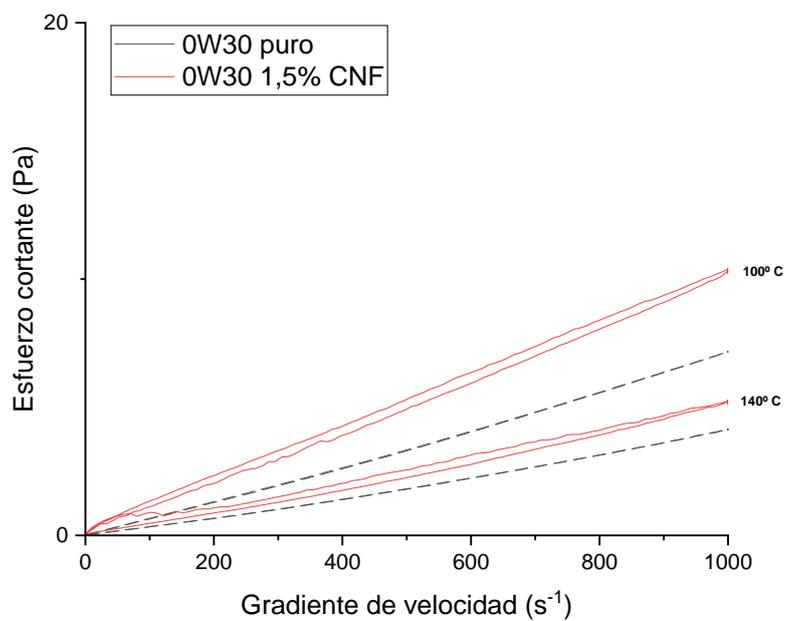


Figura A.10: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

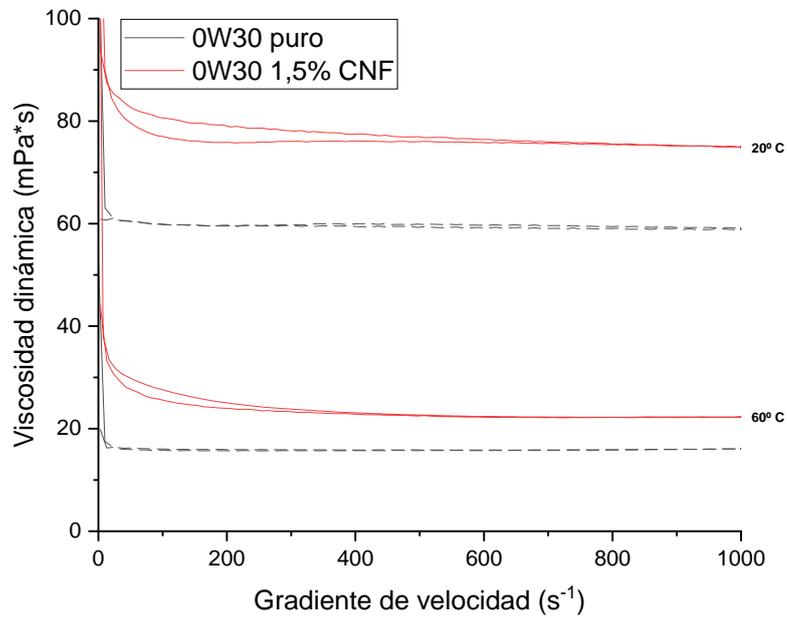


Figura A.11: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

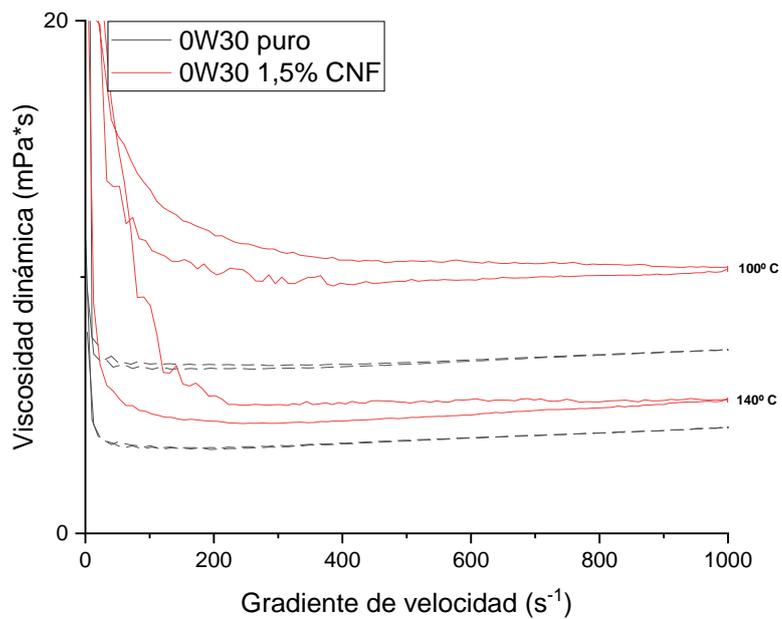


Figura A.12: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

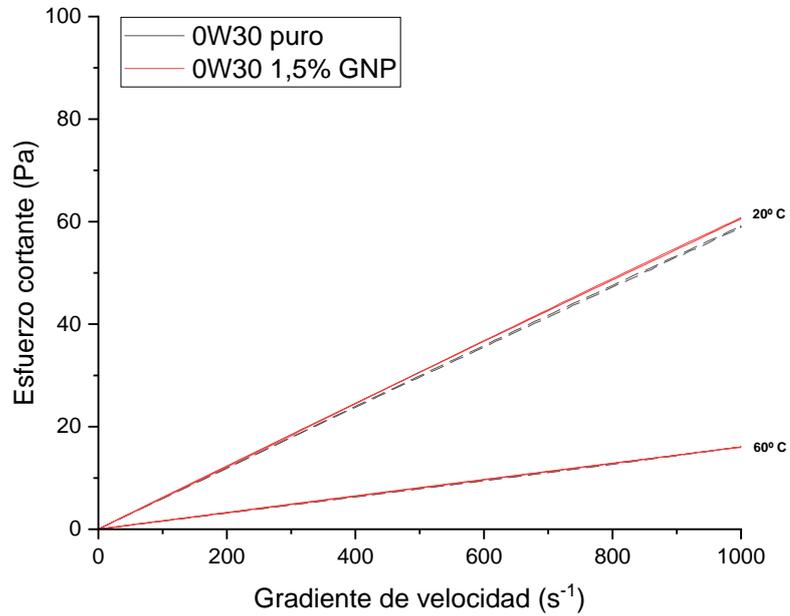


Figura A.13: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

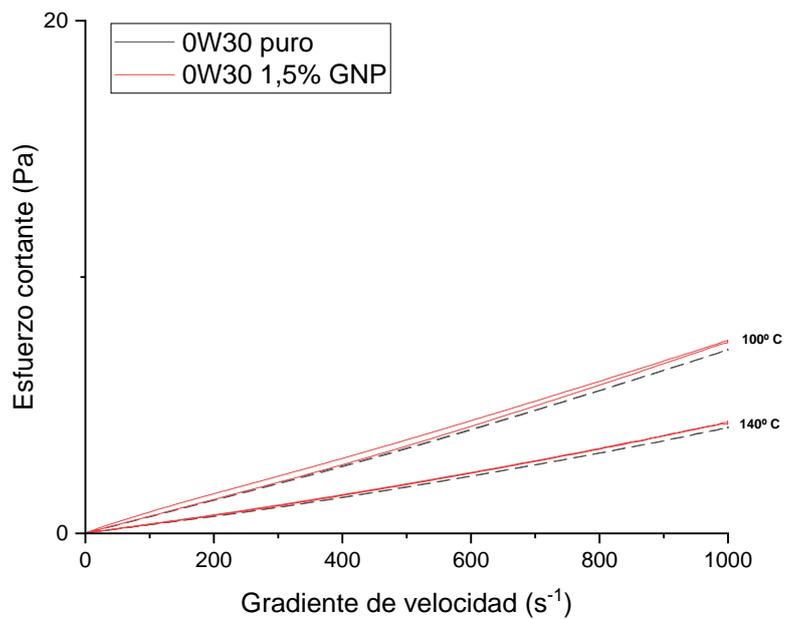


Figura A.14: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

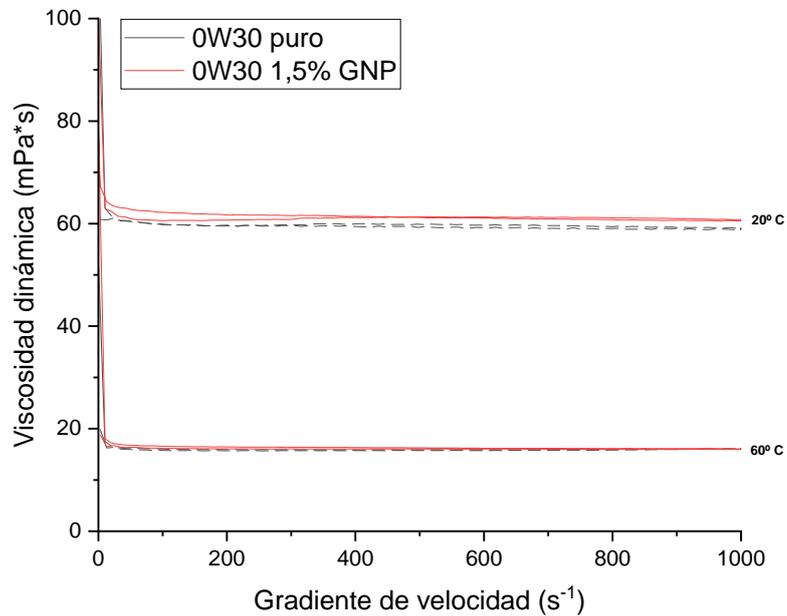


Figura A.15: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

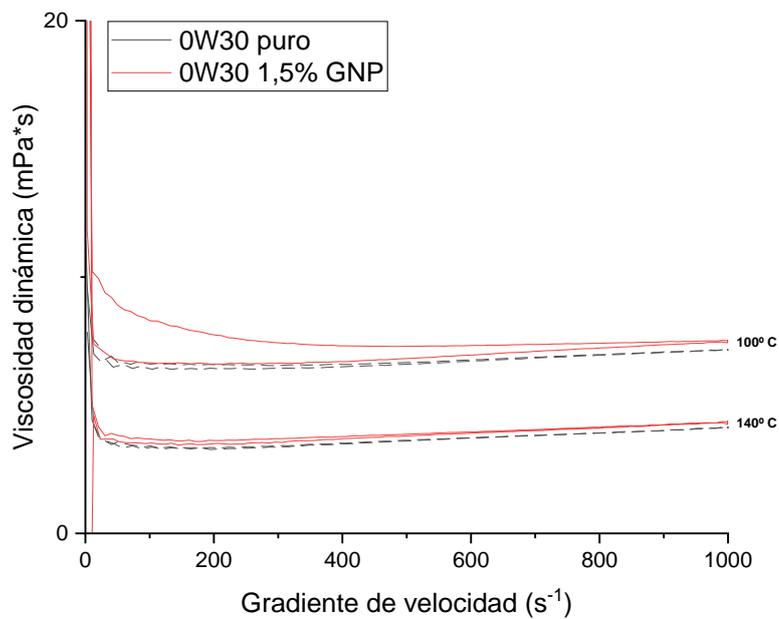


Figura A.16: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

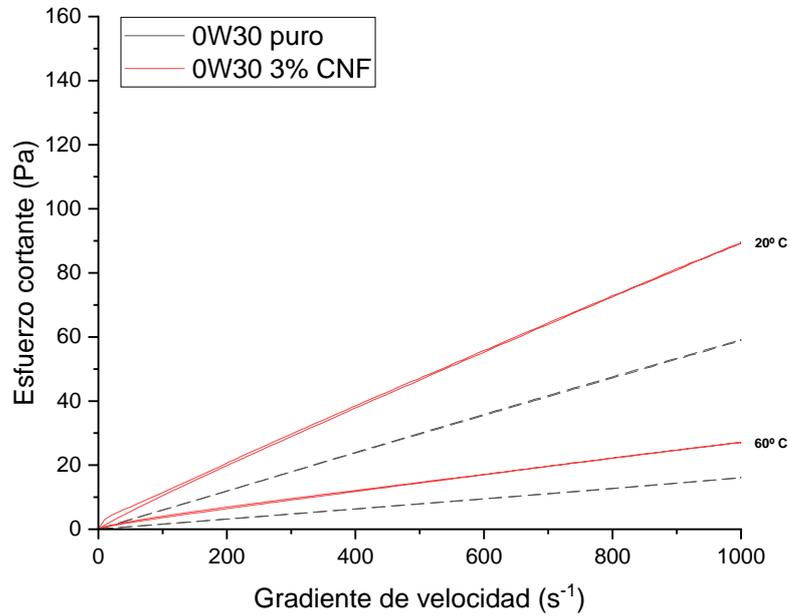


Figura A.17: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

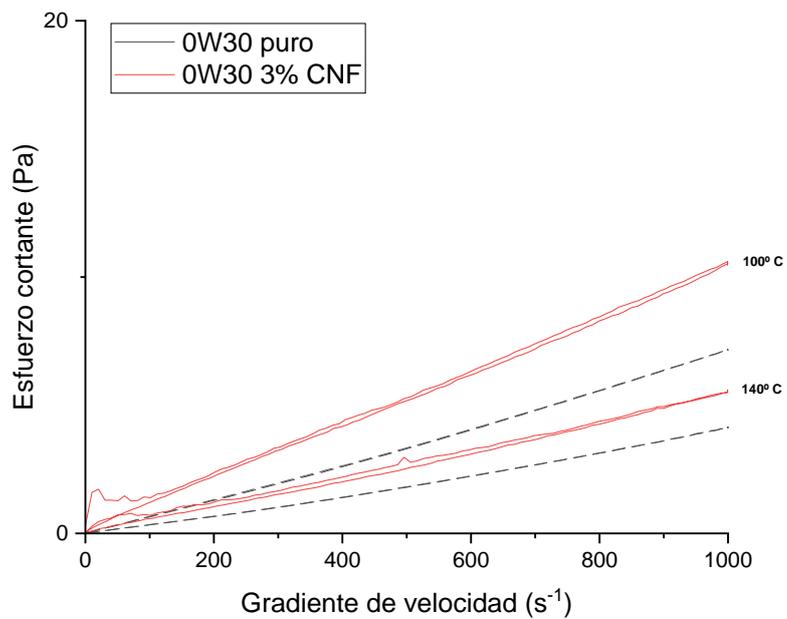


Figura A.18: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

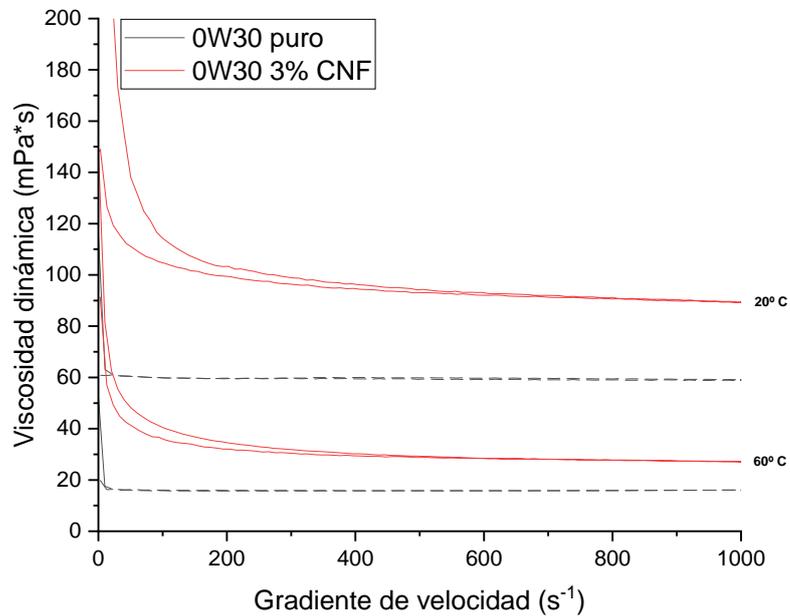


Figura A.19: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 60°C.

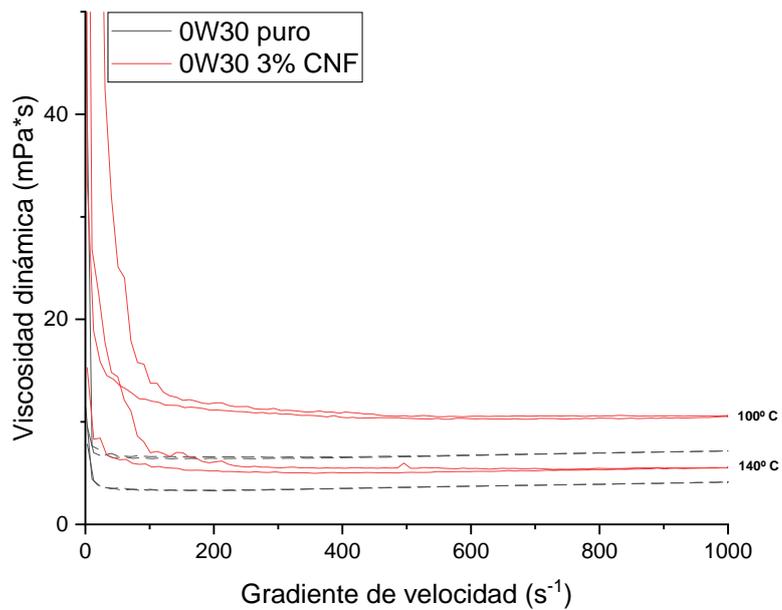


Figura A.20: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 140°C.

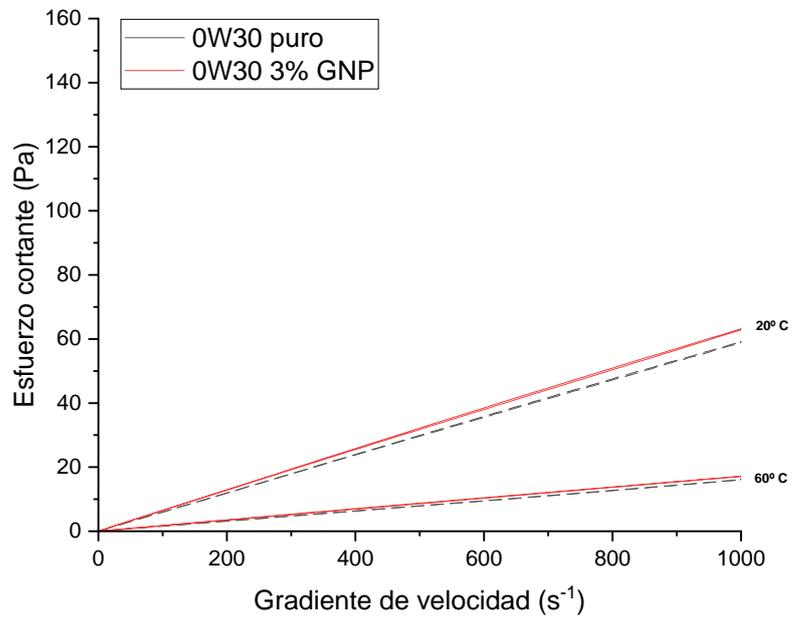


Figura A.21: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

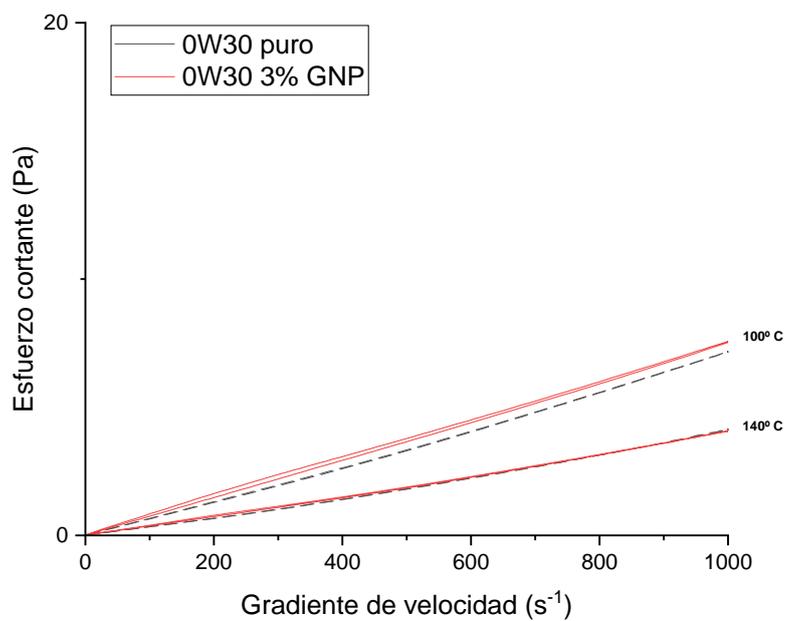


Figura A.22: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

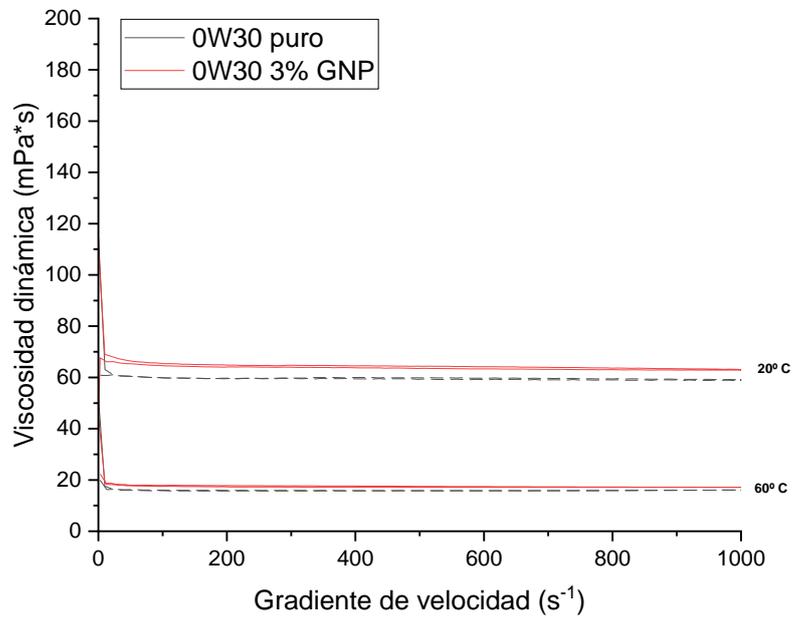


Figura A.23: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 60°C.

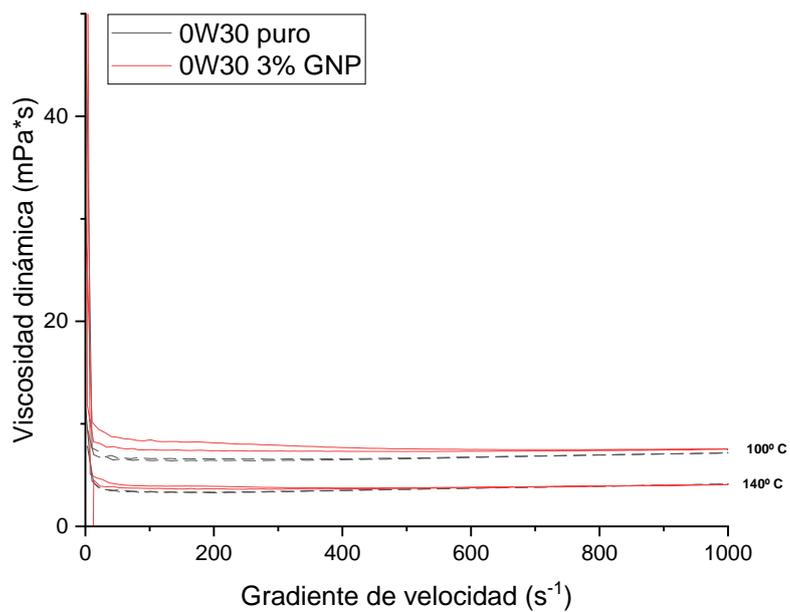


Figura A.24: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 0W30 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 140°C.

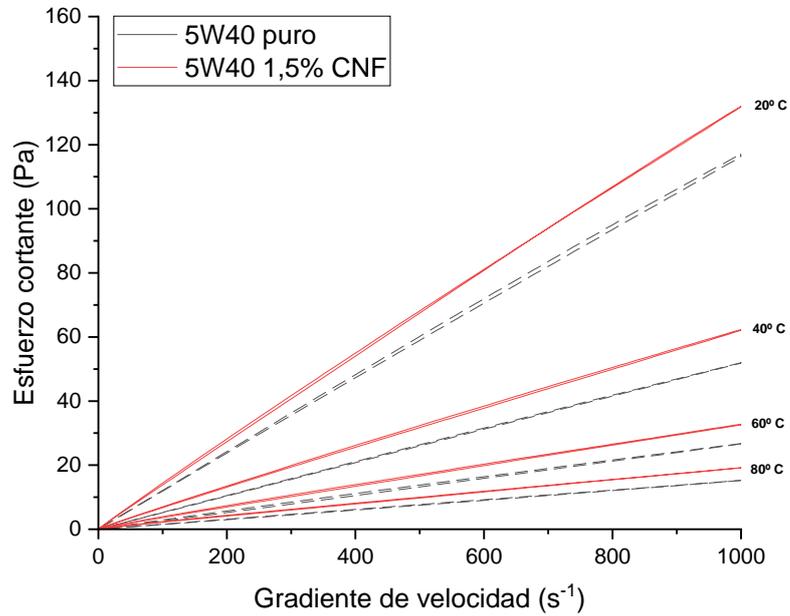


Figura A.25: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

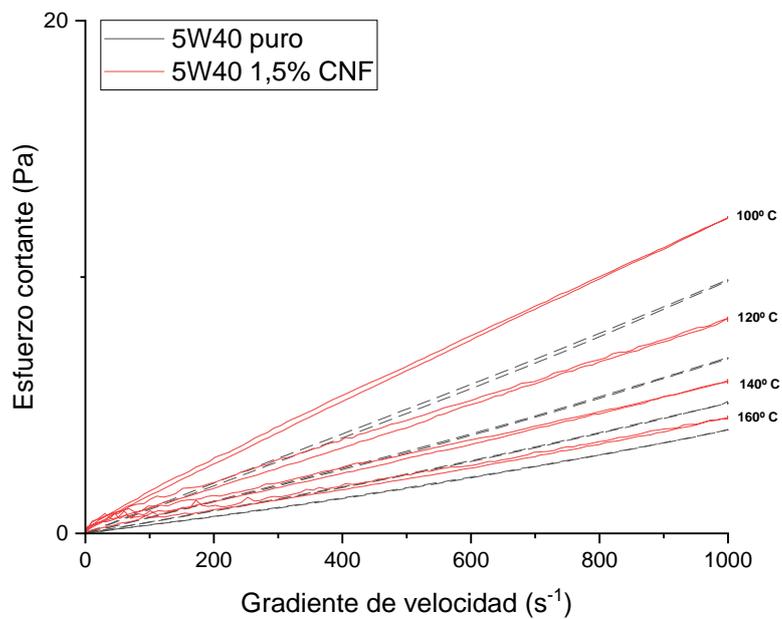


Figura A.26: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

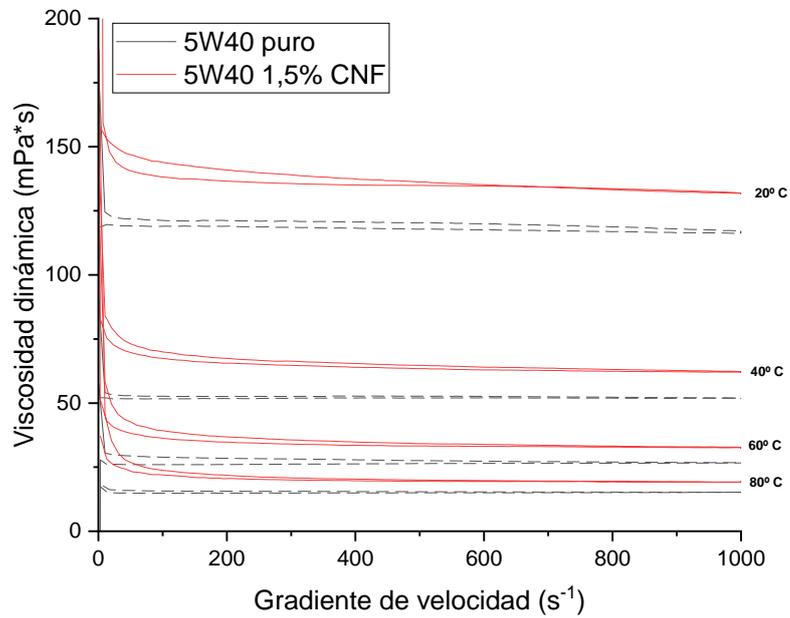


Figura A.27: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

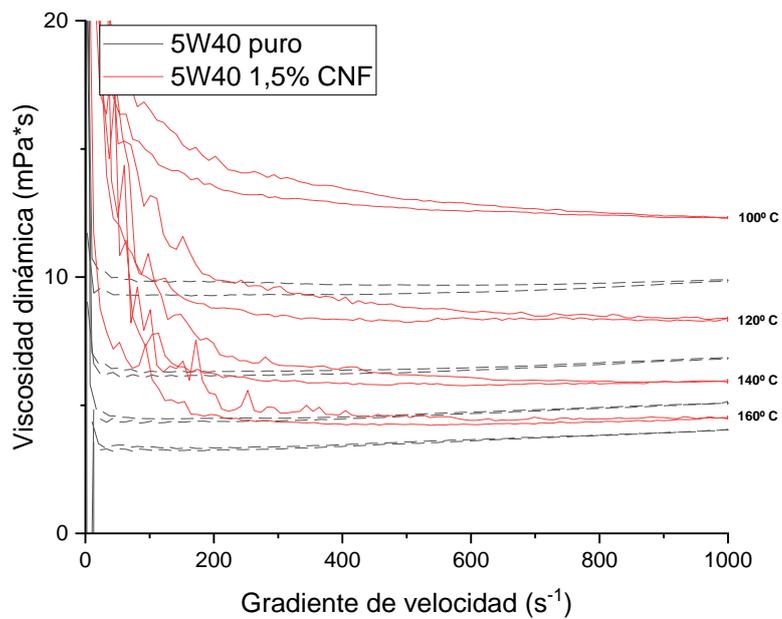


Figura A.28: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

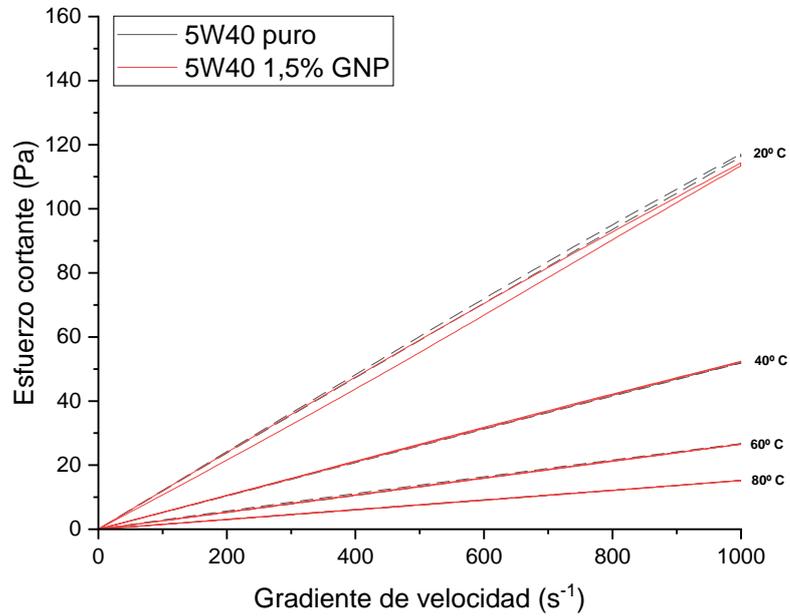


Figura A.29: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

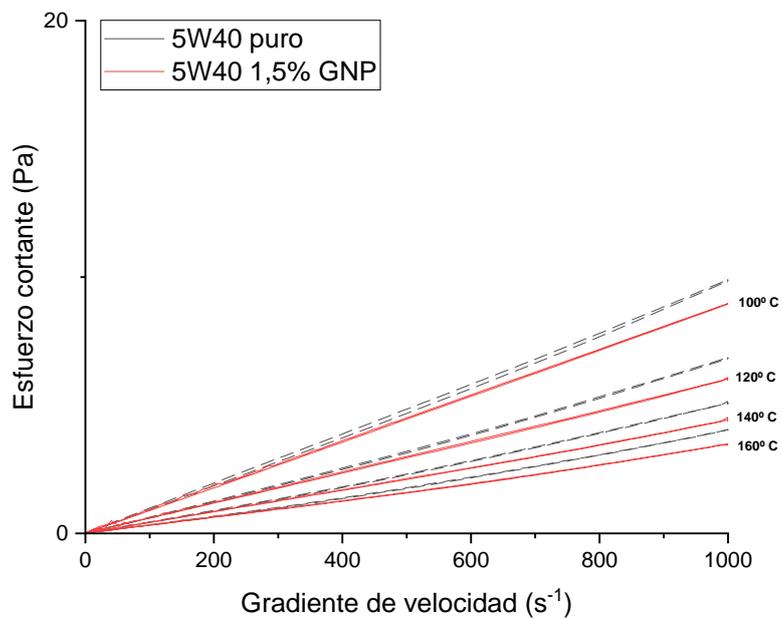


Figura A.30: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

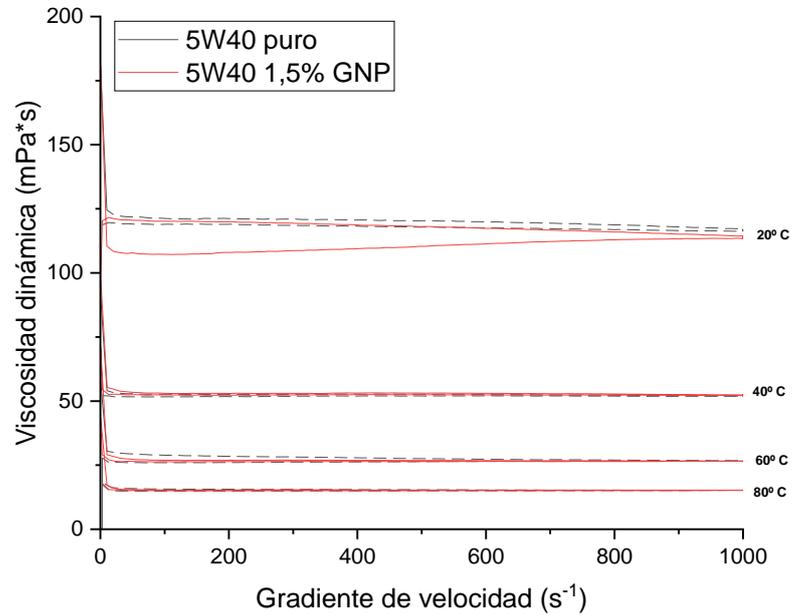


Figura A.31: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

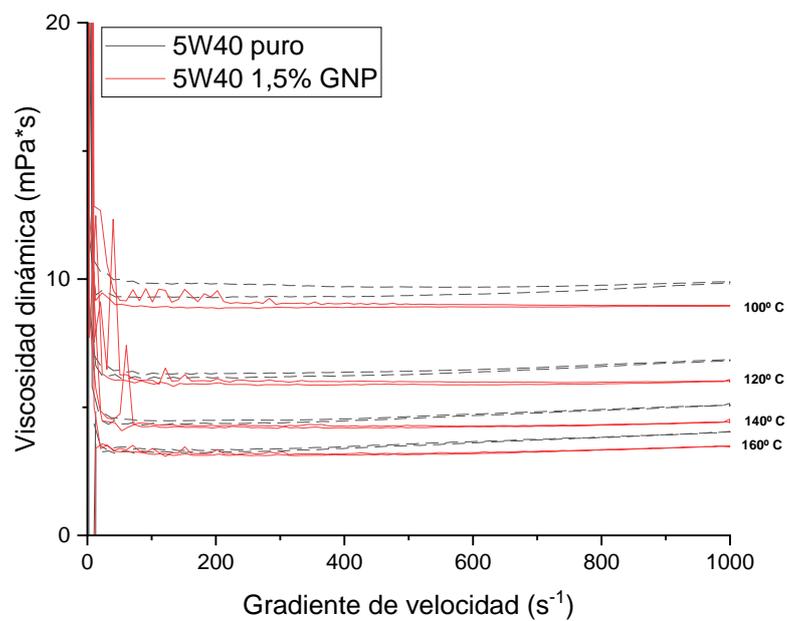


Figura A.32: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

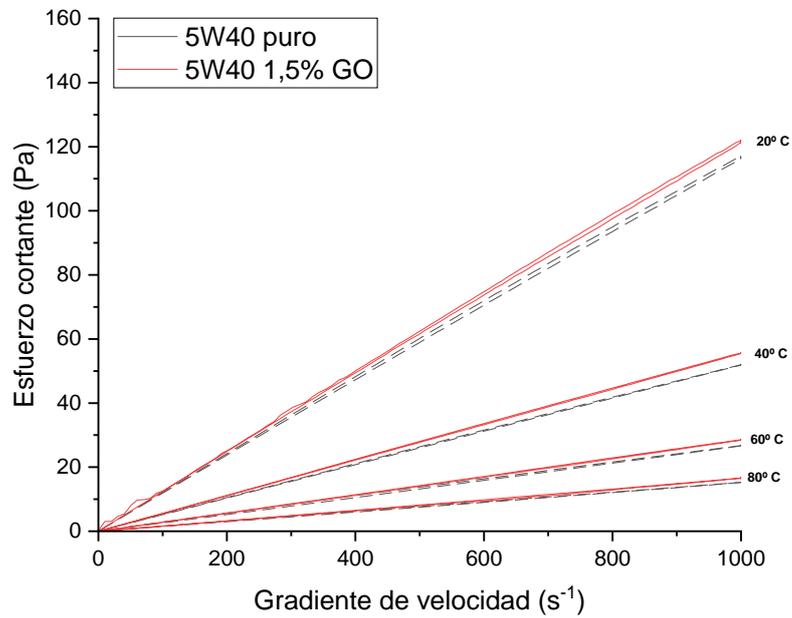


Figura A.33: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

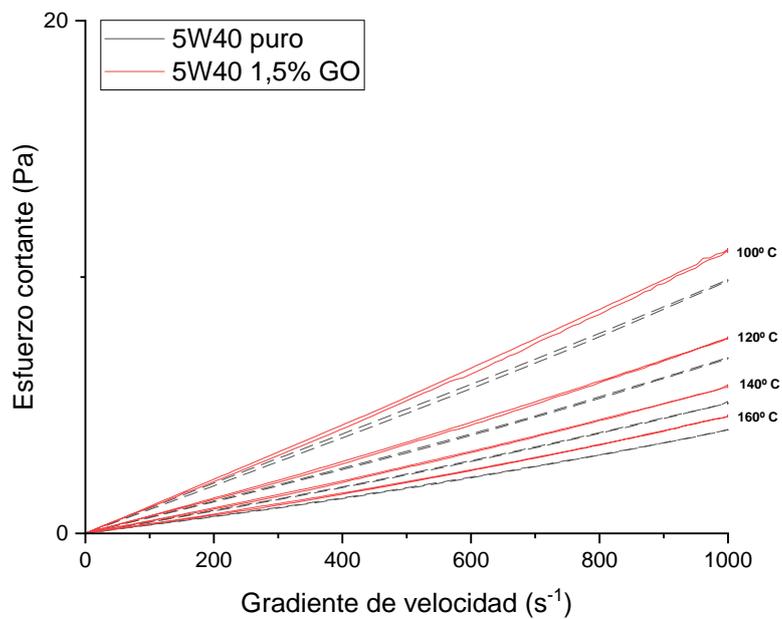


Figura A.34: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

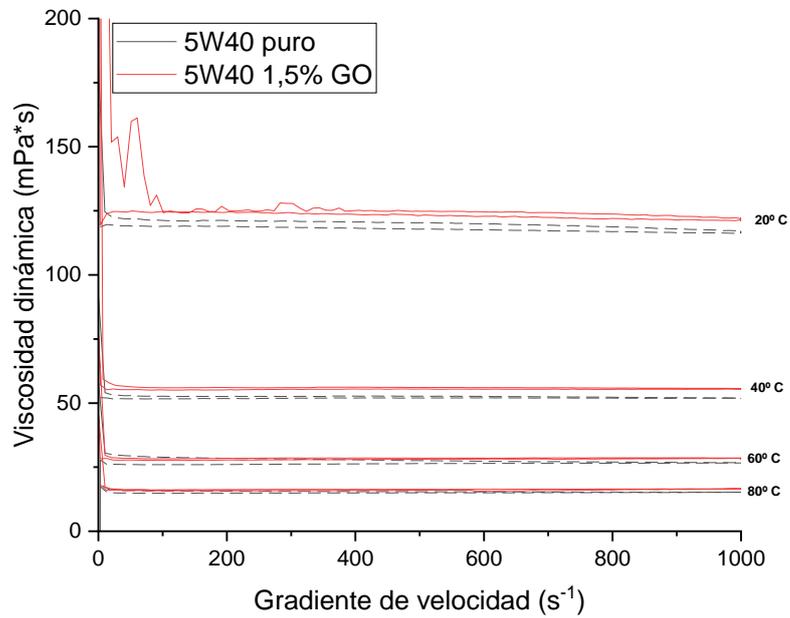


Figura A.35: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

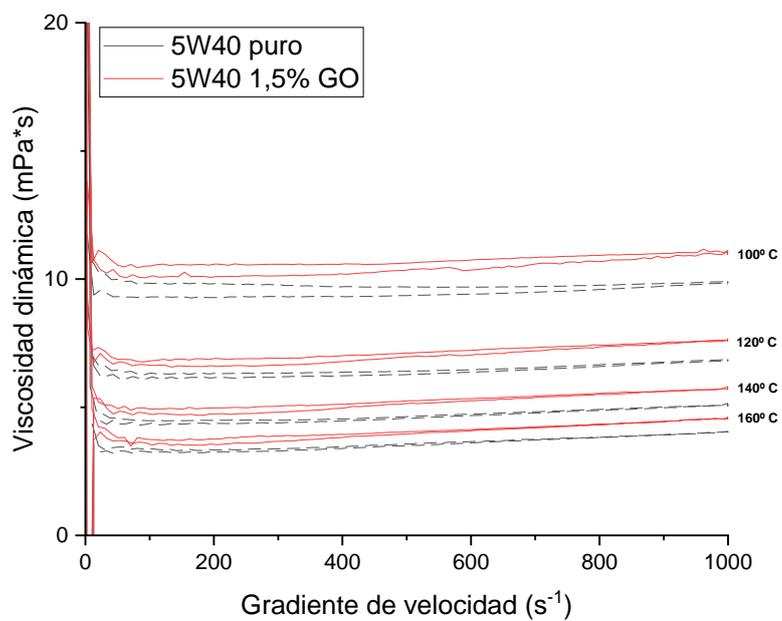


Figura A.36: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

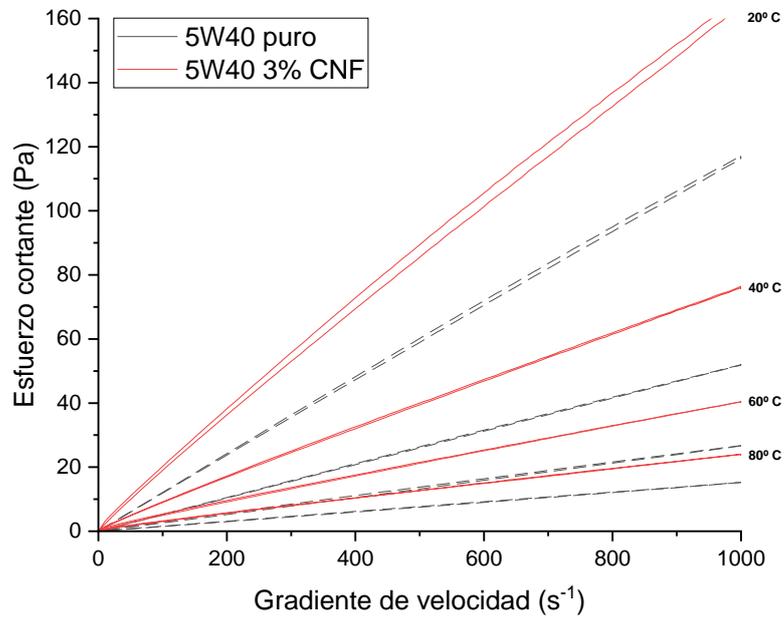


Figura A.37: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

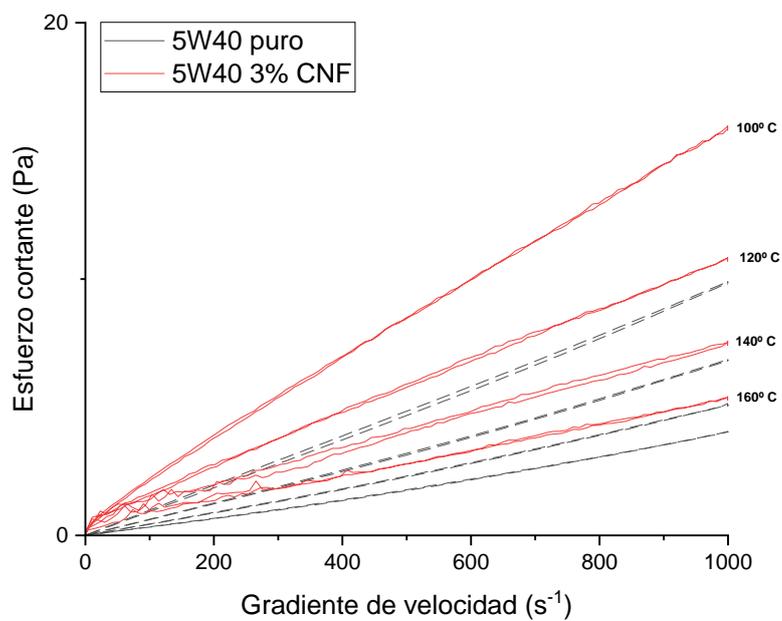


Figura A.38: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

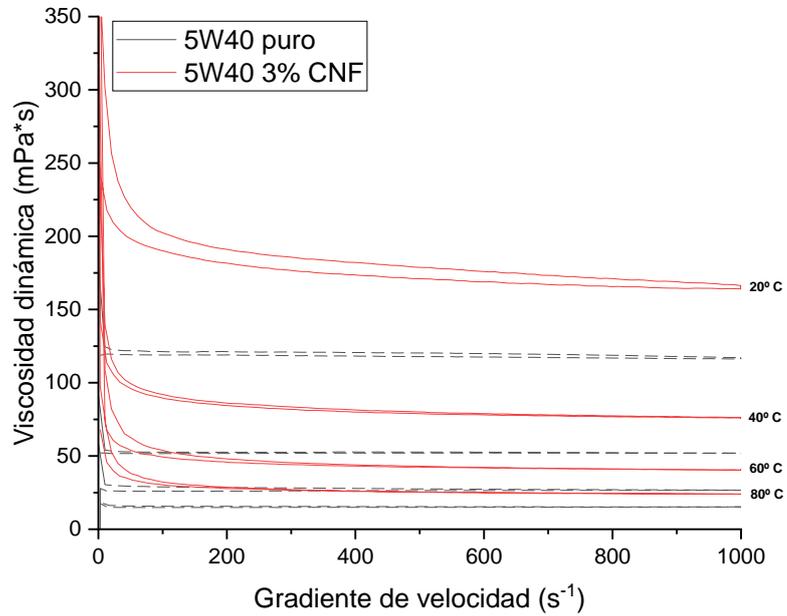


Figura A.39: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

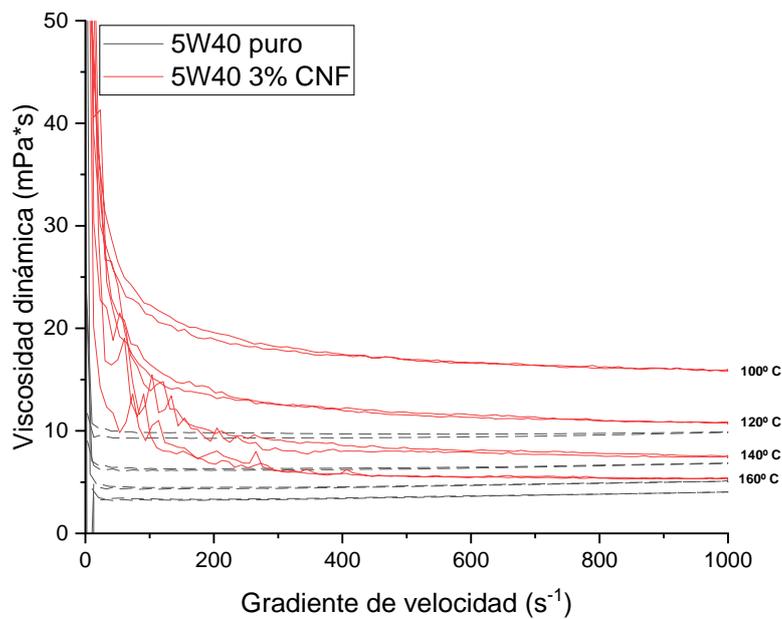


Figura A.40: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

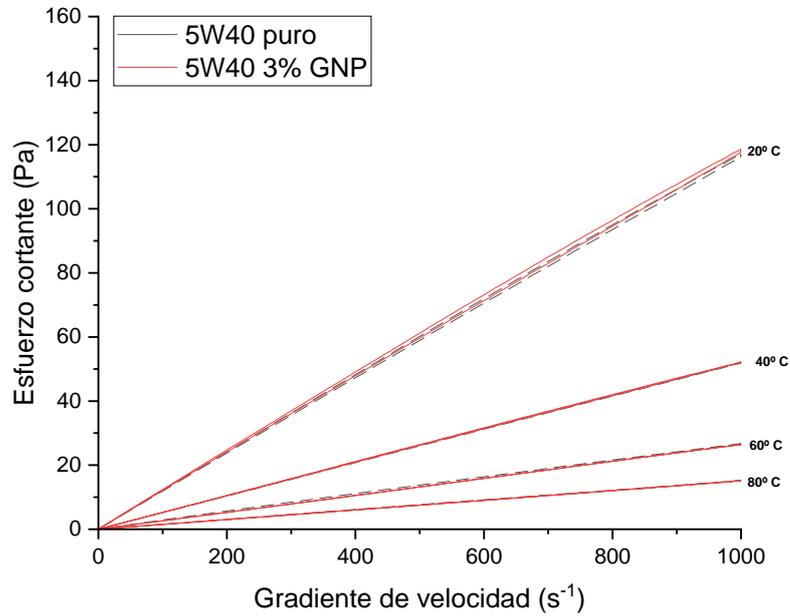


Figura A.41: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

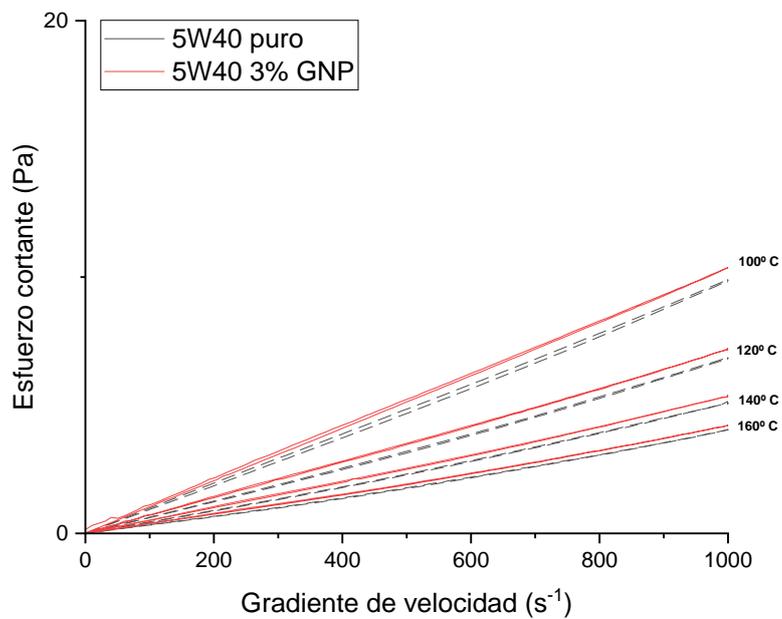


Figura A.42: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

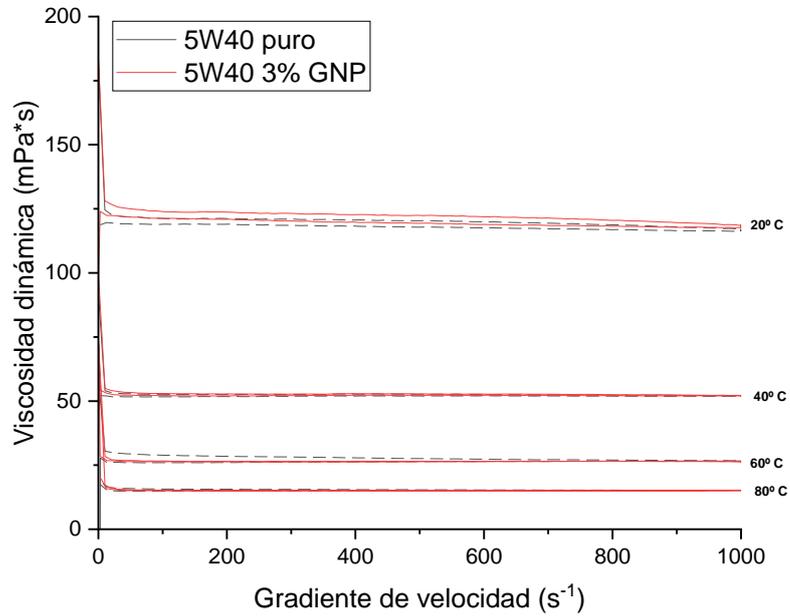


Figura A.43: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

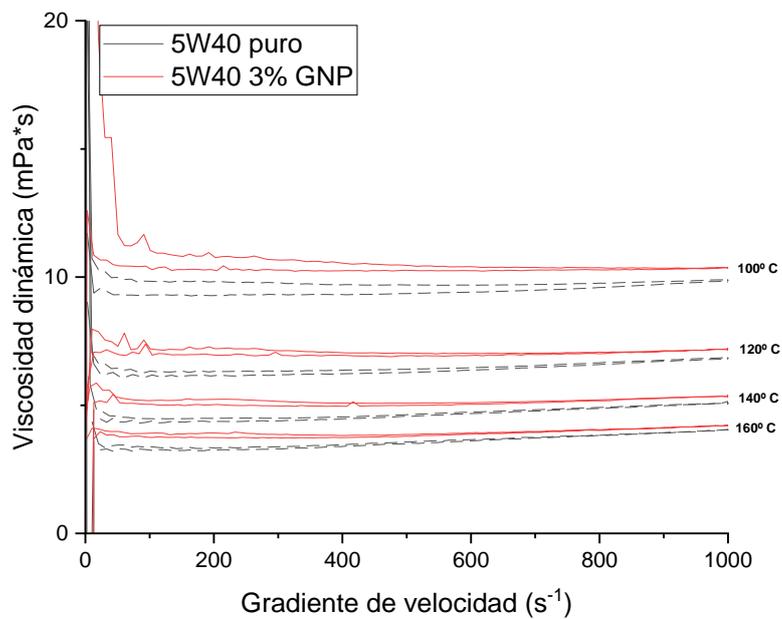


Figura A.44: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

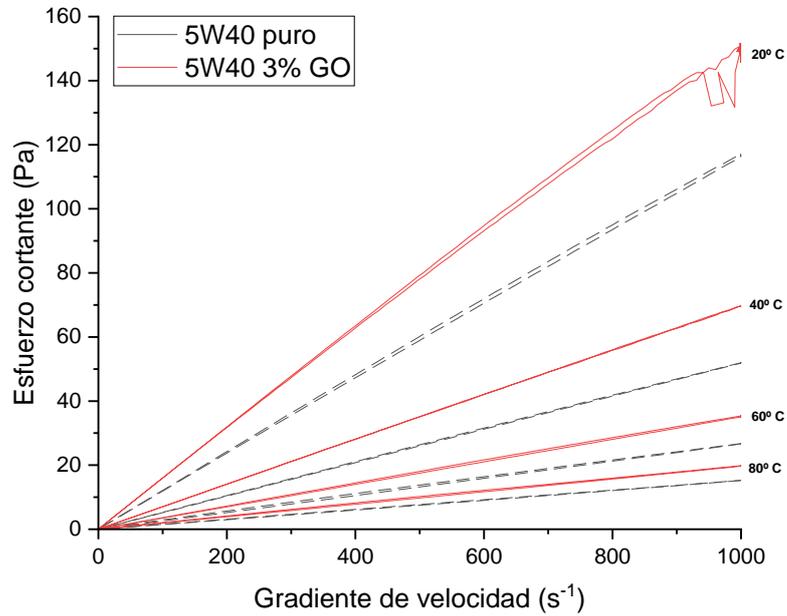


Figura A.45: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

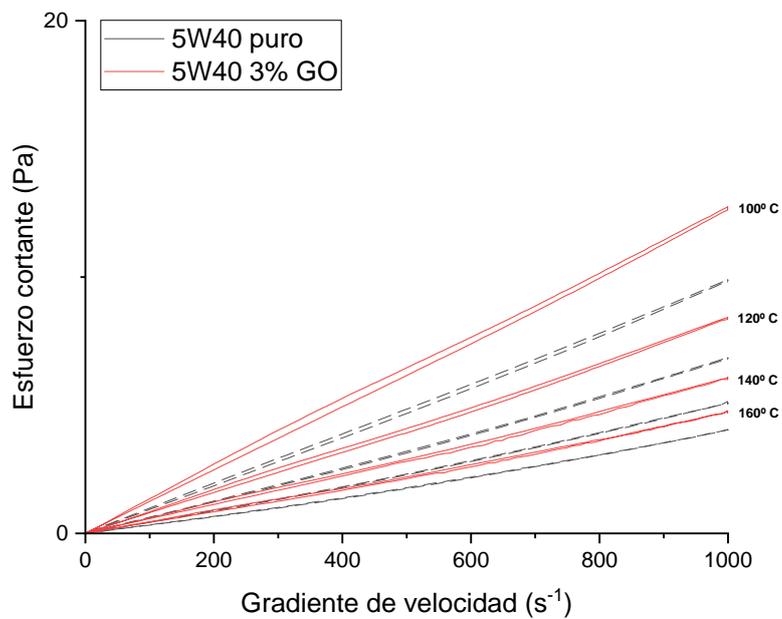


Figura A.46: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

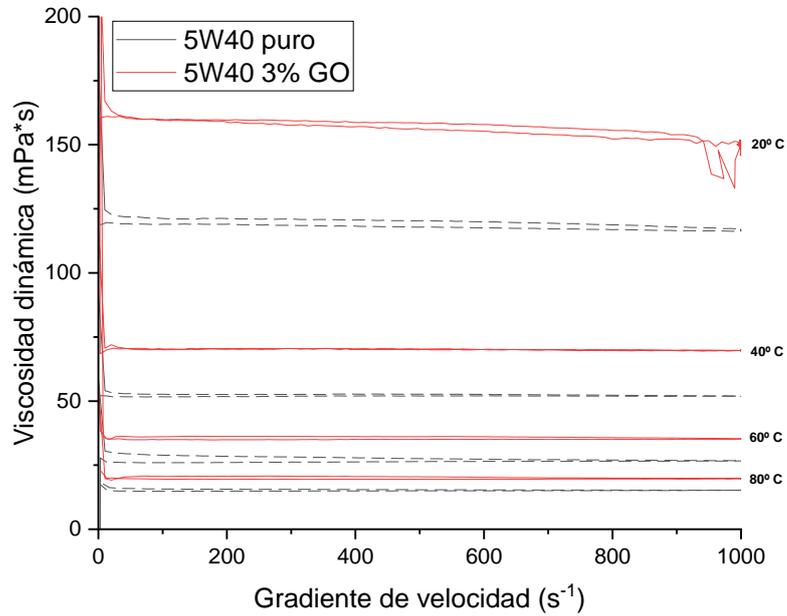


Figura A.47: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

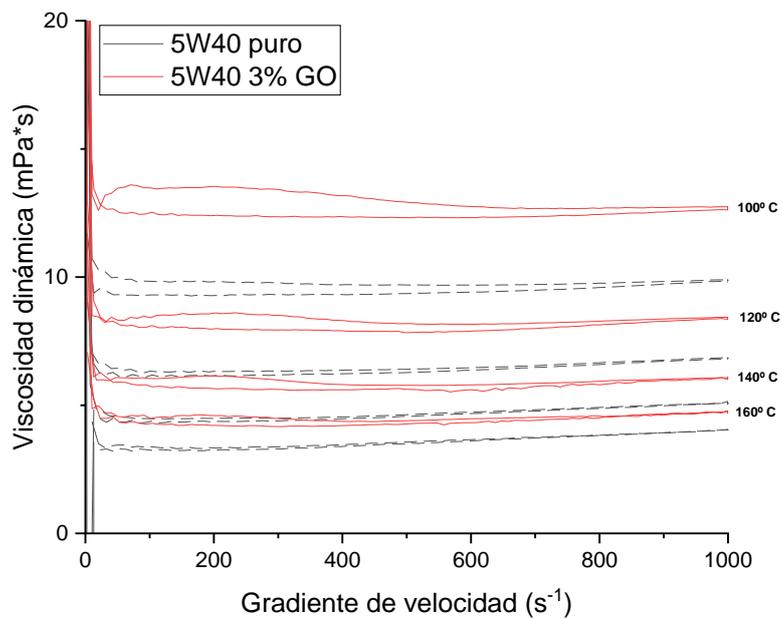


Figura A.48: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

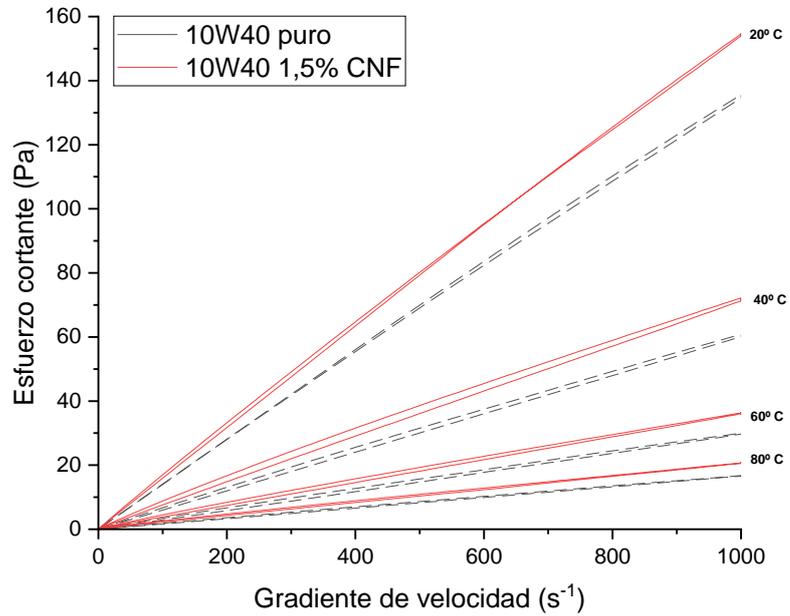


Figura A.49: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

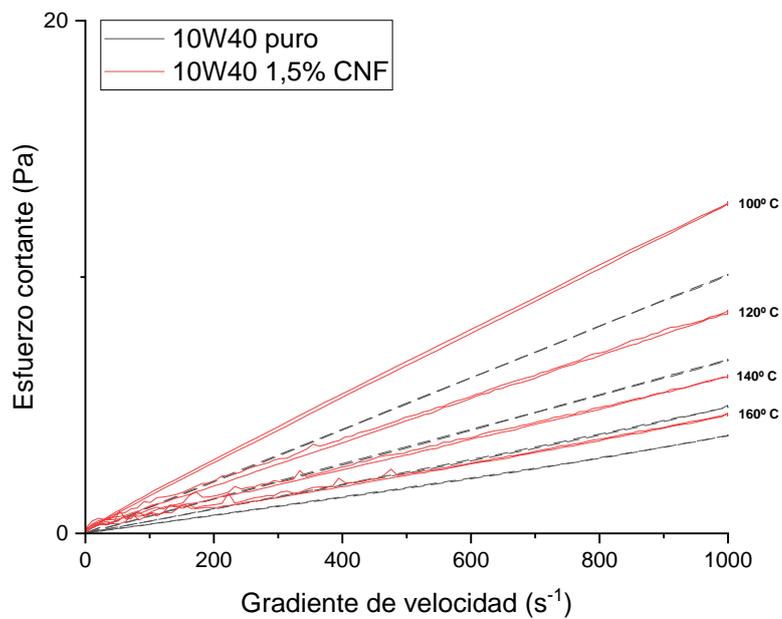


Figura A.50: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

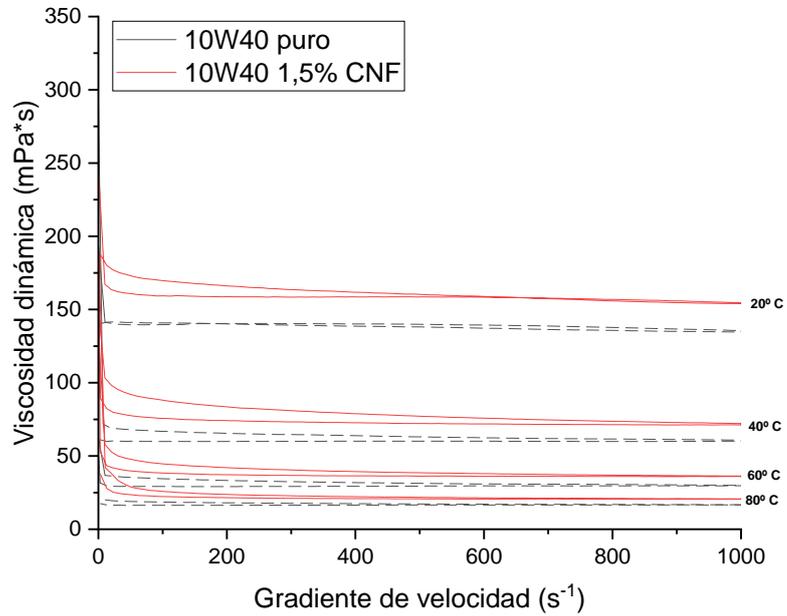


Figura A.51: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

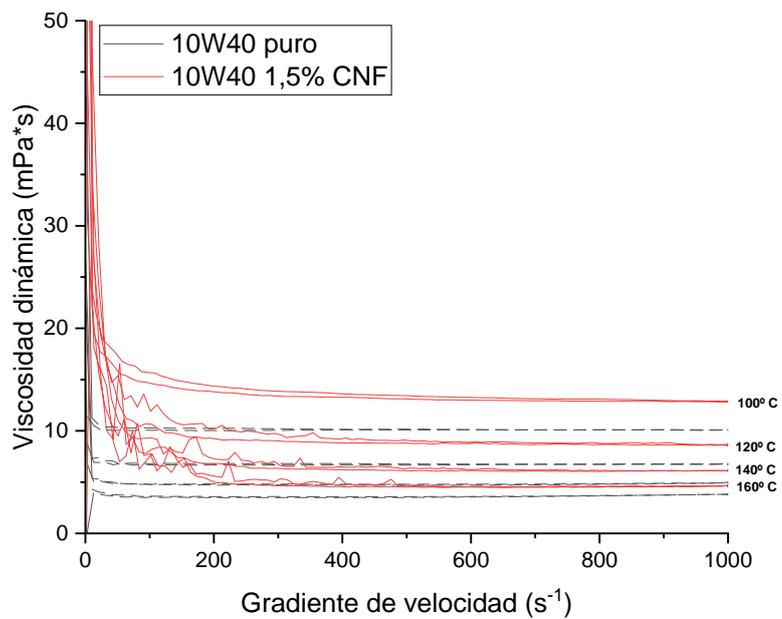


Figura A.52: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

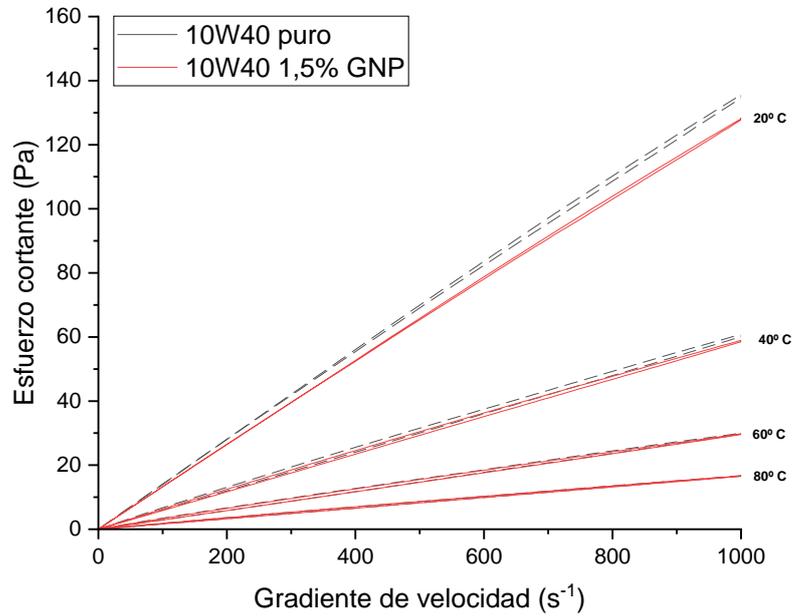


Figura A.53: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

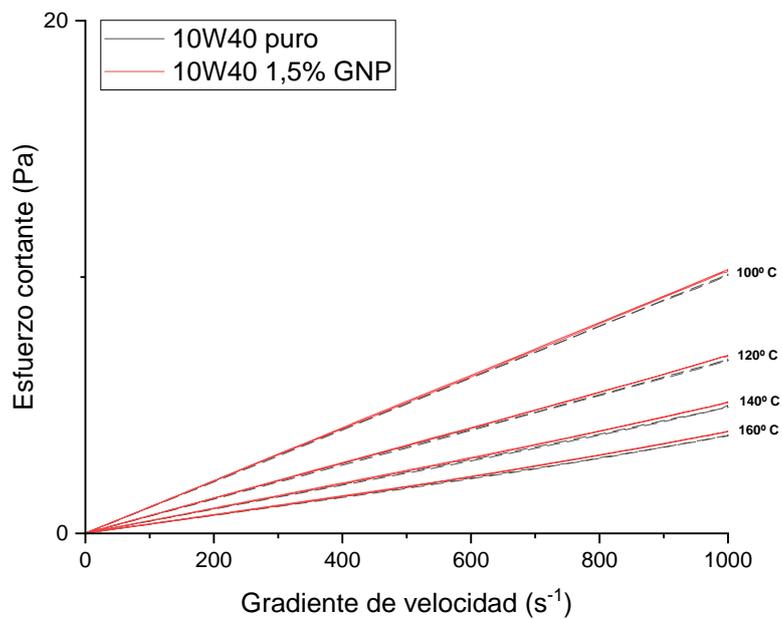


Figura A.54: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

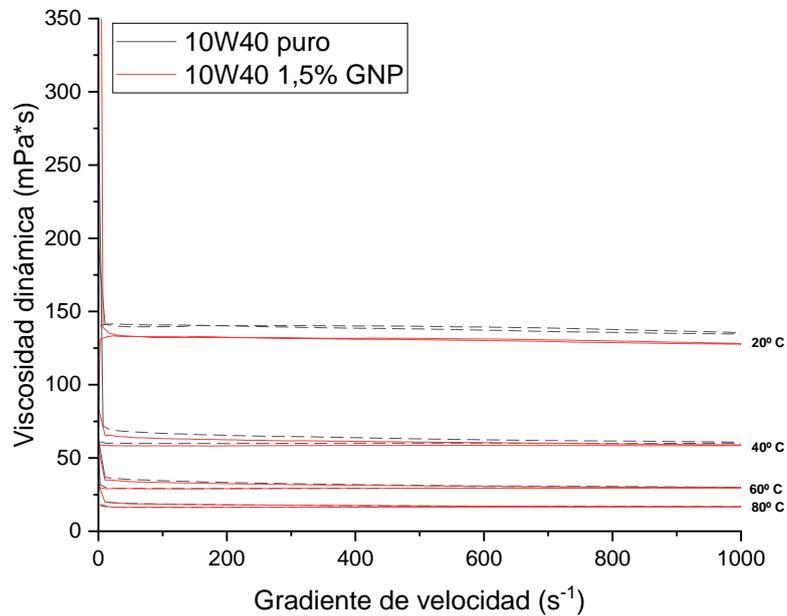


Figura A.55: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

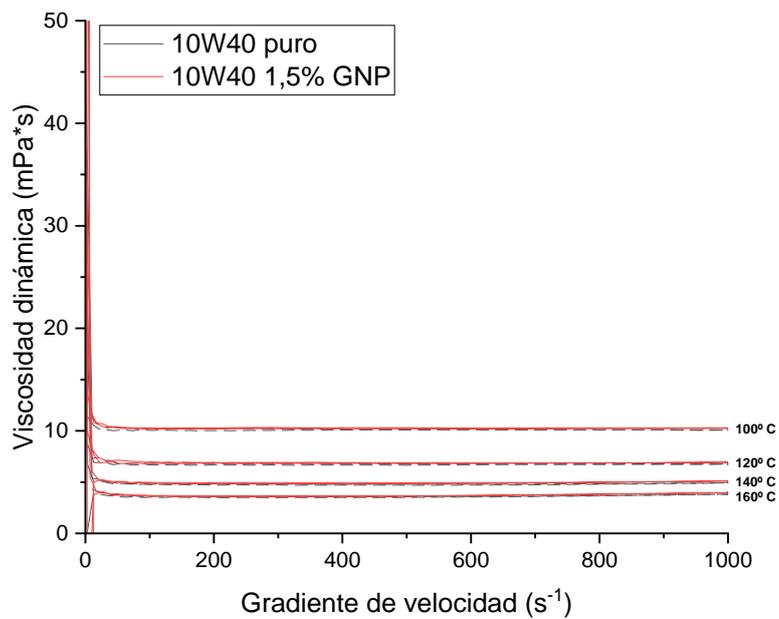


Figura A.56: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

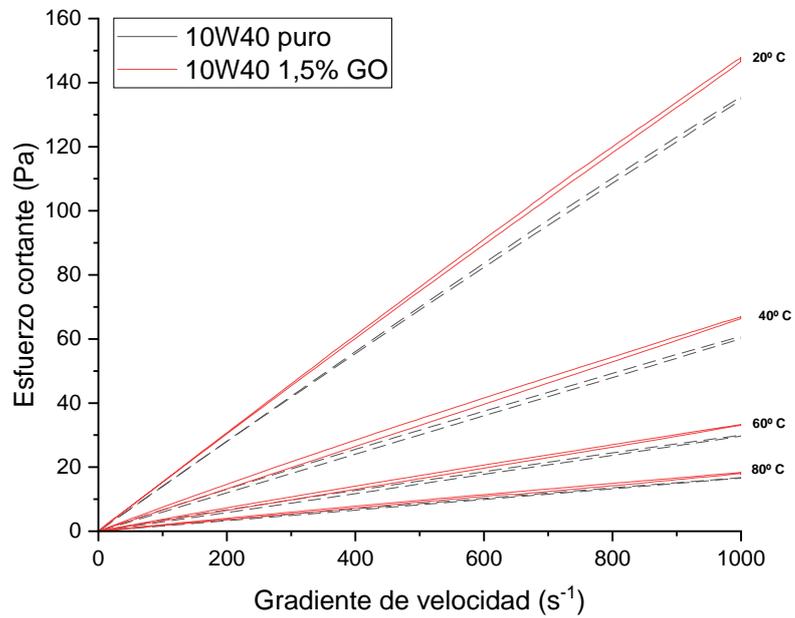


Figura A.57: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

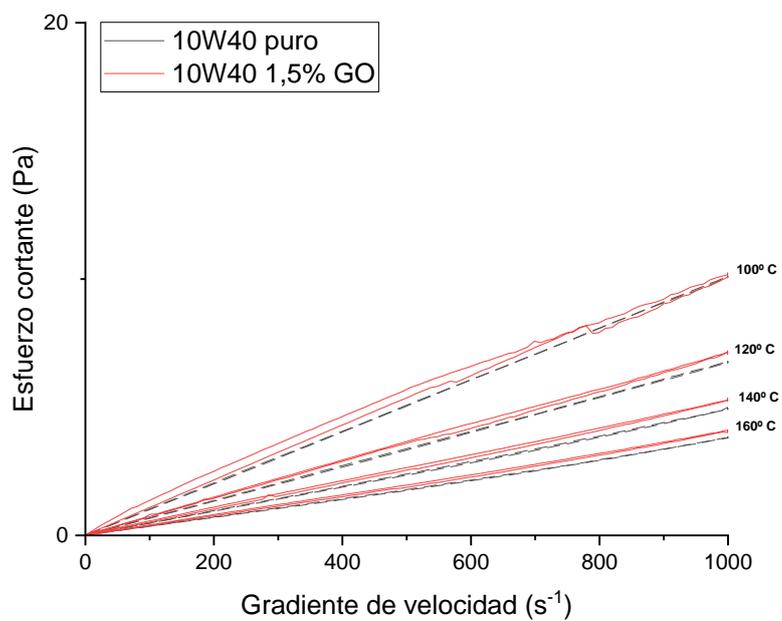


Figura A.58: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

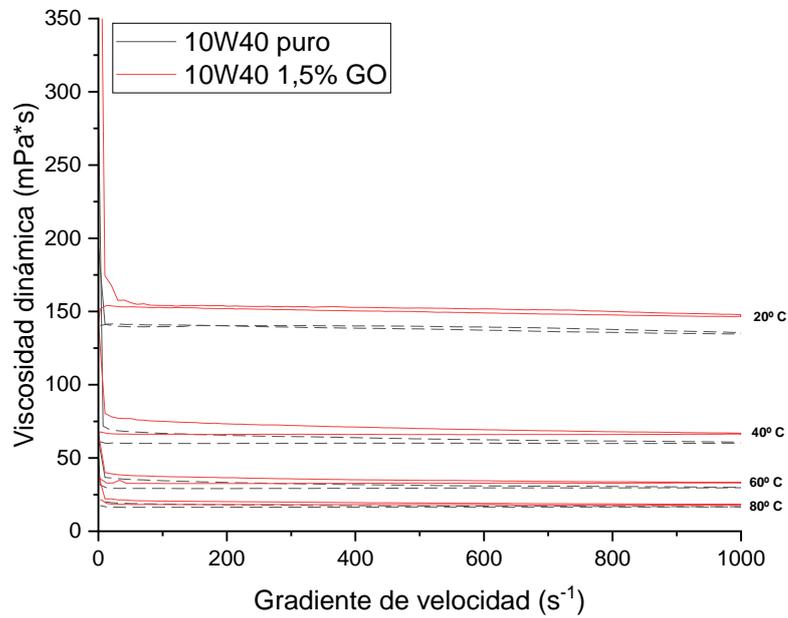


Figura A.59: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

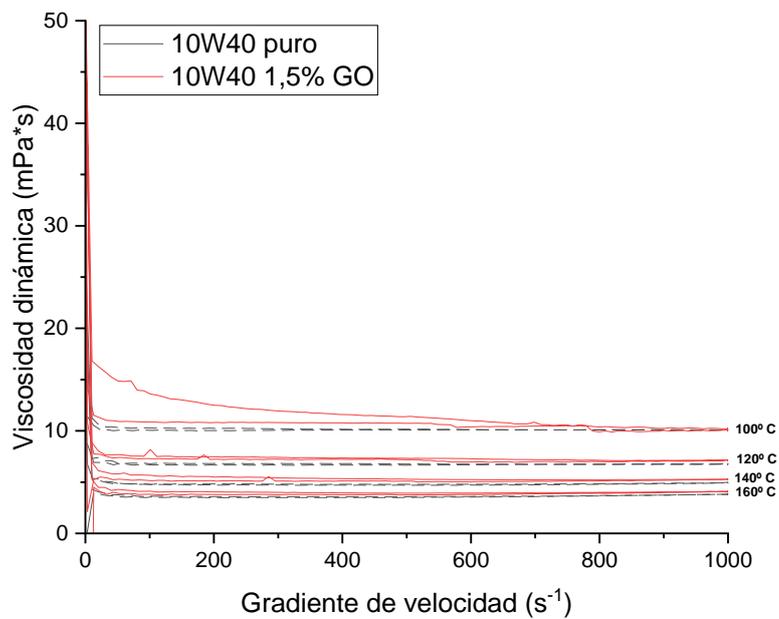


Figura A.60: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1,5% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

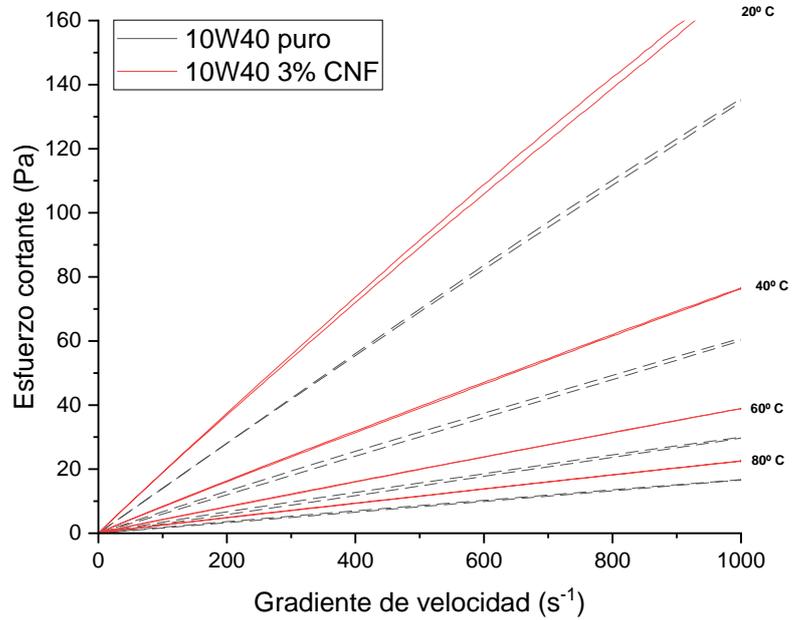


Figura A.61: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

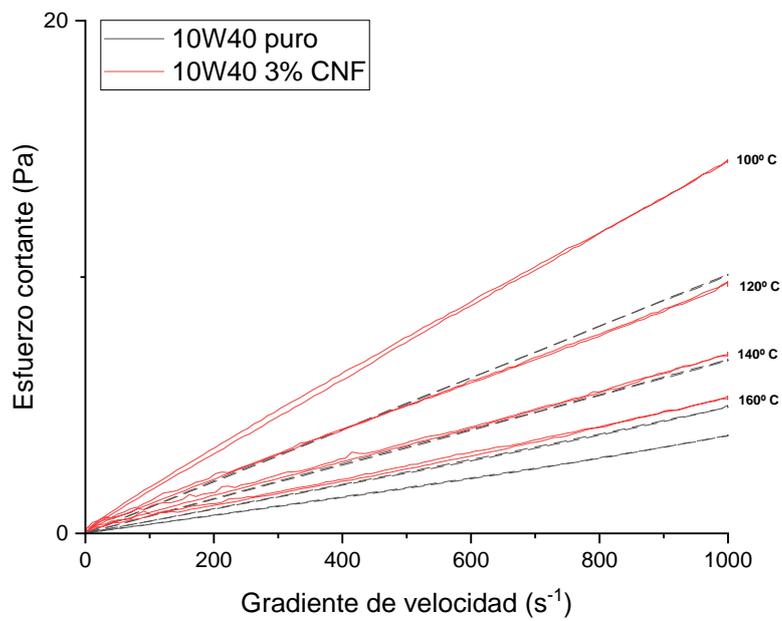


Figura A.62: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

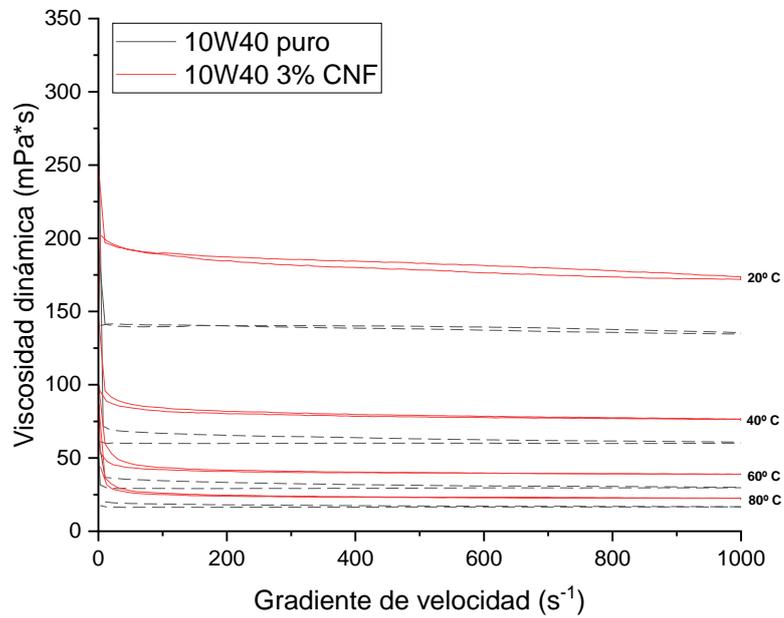


Figura A.63: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 20°C y 80°C.

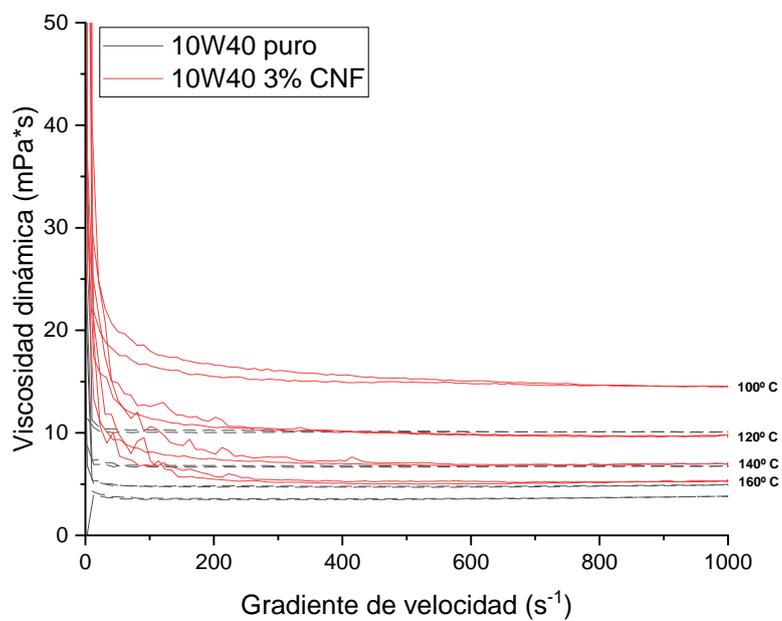


Figura A.64: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de CNF entre 100°C y 160°C.

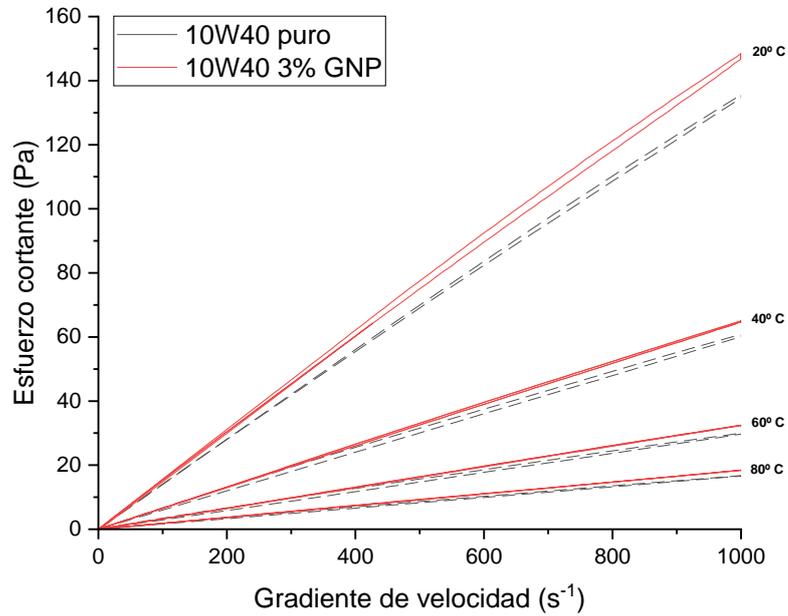


Figura A.65: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

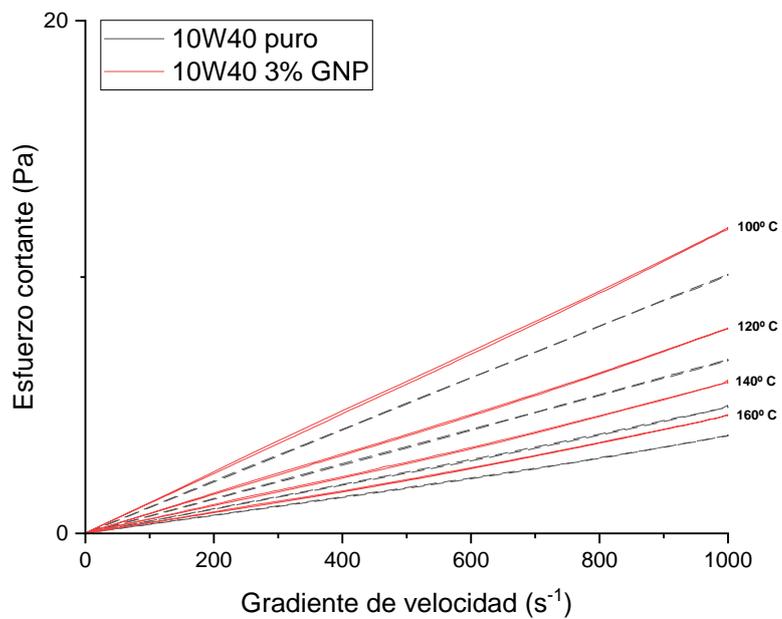


Figura A.66: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

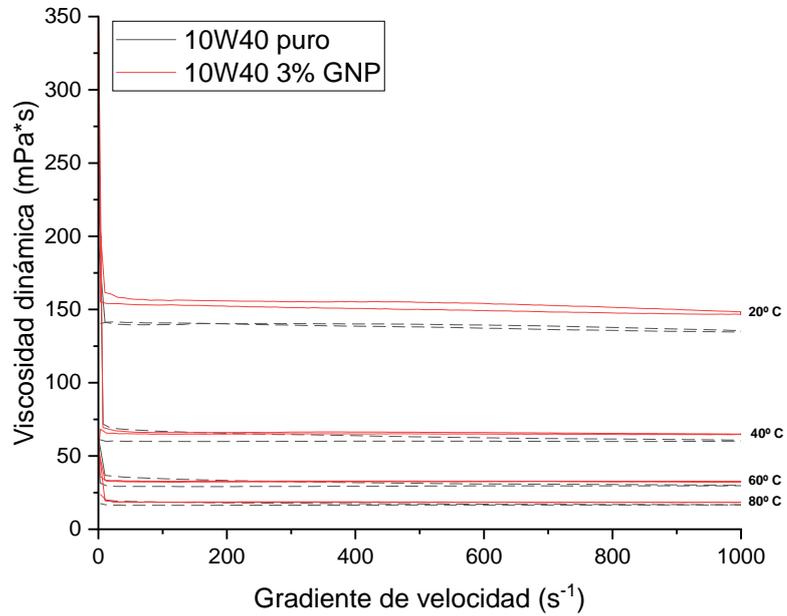


Figura A.67: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 20°C y 80°C.

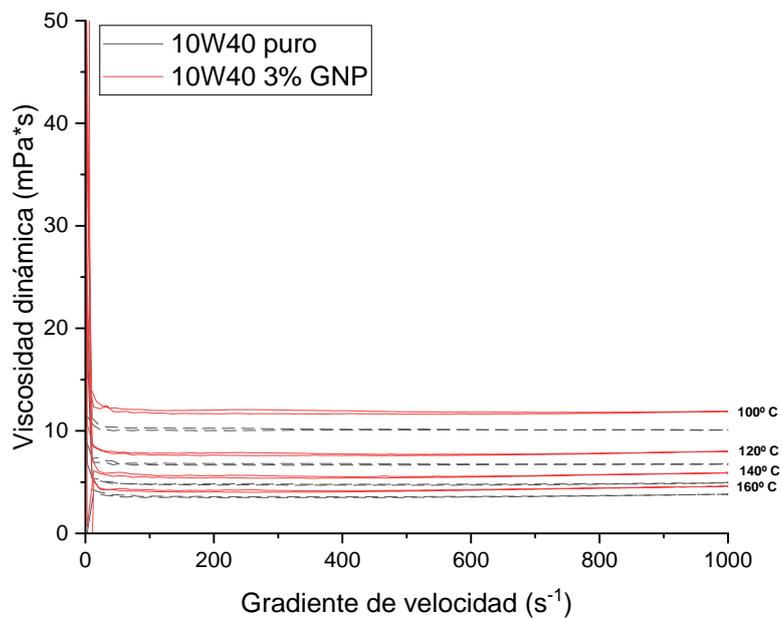


Figura A.68: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GNP entre 100°C y 160°C.

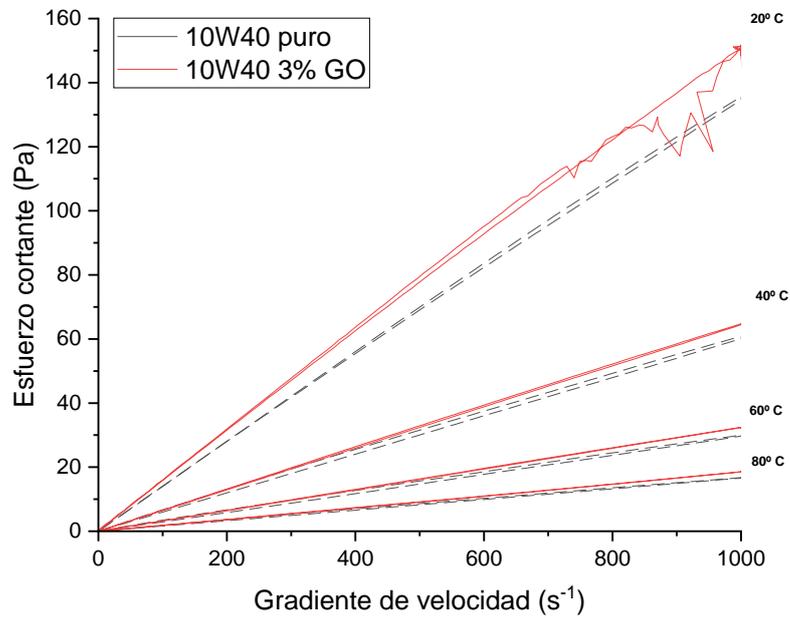


Figura A.69: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

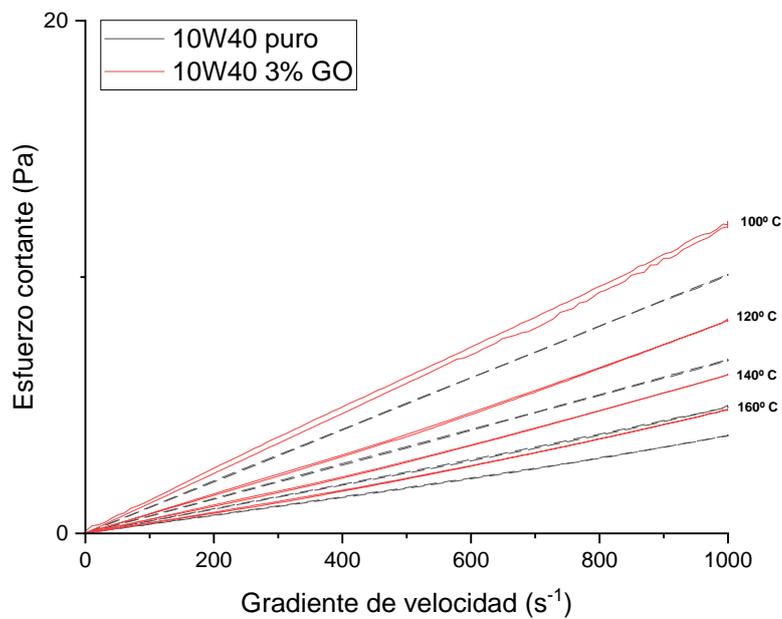


Figura A.70: Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

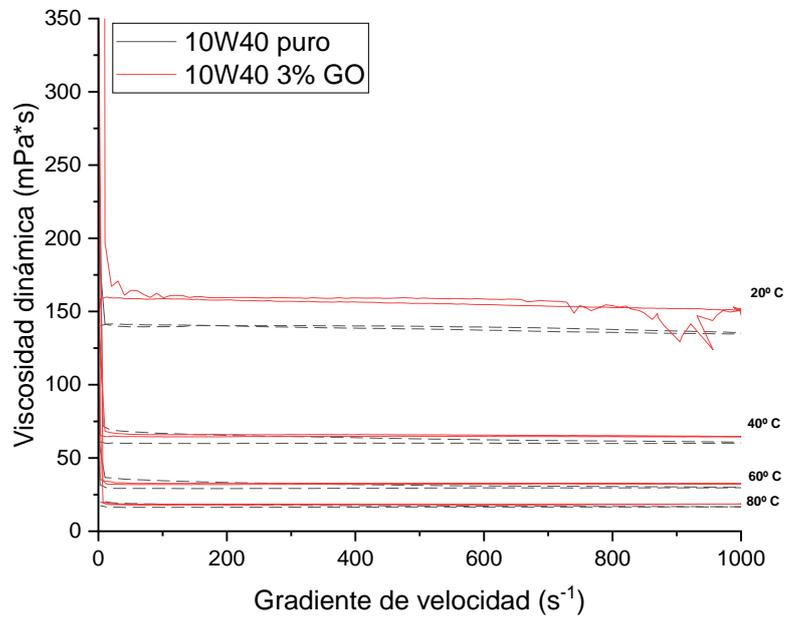


Figura A.71: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 20°C y 80°C.

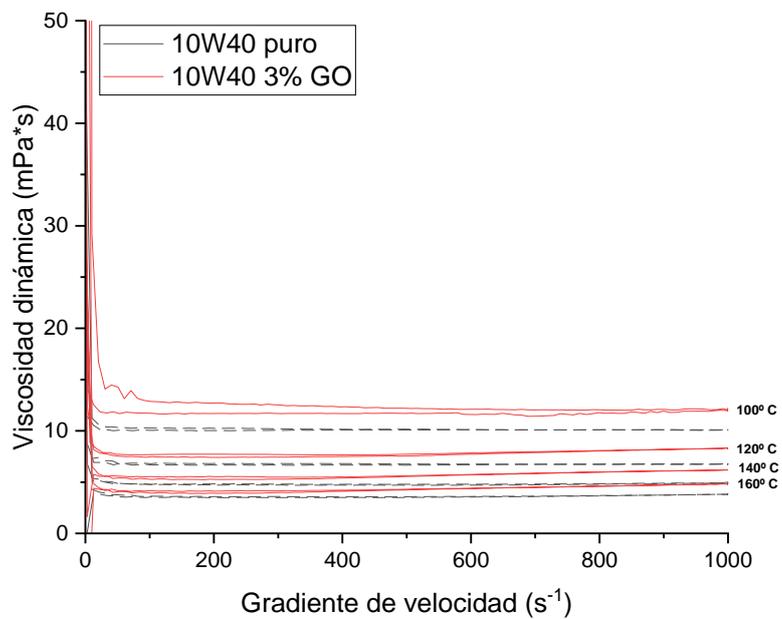


Figura A.72: Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de GO entre 100°C y 160°C.

*Tabla A.1: Valores aproximados de viscosidad cinemática (mPa·s) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 20°C.*

<b>Muestras</b>	<b>Concentraciones (%)</b>	<b>puro</b>	<b>CNF</b>	<b>GNP</b>	<b>GO</b>
<b>0W30</b>	0	59,90	-	-	-
	1,5	-	75,98	61,24	-
	2,25	-	76,98	64,51	-
	3	-	94,18	64,40	-
<b>5W40</b>	0	120,33	-	-	-
	1,5	-	134,92	110,33	124,86
	2,25	-	150,05	125,81	146,35
	3	-	178,89	122,47	158,58
<b>10W40</b>	0	139,91	-	-	-
	1,5	-	158,57	131,65	152,40
	2,25	-	180,71	144,44	153,05
	3	-	182,86	154,91	158,86

*Tabla A.2: Valores aproximados de viscosidad cinemática (mPa·s) frente a concentración (%) de aceites con nanopartículas a 100°C.*

<b>Muestras</b>	<b>Concentraciones (%)</b>	<b>puro</b>	<b>CNF</b>	<b>GNP</b>	<b>GO</b>
<b>0W30</b>	0	6,67	-	-	-
	1,5	-	10,60	7,30	-
	2,25	-	10,80	7,29	-
	3	-	10,59	7,57	-
<b>5W40</b>	0	9,69	-	-	-
	1,5	-	13,03	9,03	10,62
	2,25	-	14,43	10,45	12,76
	3	-	16,92	10,46	12,93
<b>10W40</b>	0	10,17	-	-	-
	1,5	-	13,44	10,31	10,74
	2,25	-	14,98	10,37	13,00
	3	-	15,37	11,86	12,20