



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

## **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE QUERÉTARO**

# **PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFUIDOS A PARTIR DE UN FLUIDO USADO EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACERO**

## **TESIS**

Para obtener el Grado de:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA DE MATERIALES Y  
NANOTECNOLOGIA**

Presenta:

**Luis Daniel García Salas**

Dirigido por:

Dra. Esperanza Rodríguez Morales  
Dr. José Julián III Montes Rodríguez  
Dr. Oscar Gómez Guzmán

JUNIO 2021



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. 31/Mayo/2021  
Oficio No. DEPI/052/2021

**GARCÍA SALAS LUIS DANIEL**  
**ESTUDIANTE**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**  
**PRESENTE**

De acuerdo con el Reglamento para Exámenes Profesionales de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, se le autoriza la impresión de la Tesis, para obtener el Grado de MAESTRIA EN INGENIERÍA, titulada:

**“PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFUÍDOS A PARTIR DE UN FLUÍDO USADO EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACERO”**

Para el correspondiente Examen de Grado.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*  
*"La tierra será, como sean los hombres"*

**GABRIELA PINEDA CHACÓN**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo  
GPCH/mrr\*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,  
Querétaro, Qro.  
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421  
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554  
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx  
tecnm.mx | queretaro.edu.mx







Santiago de Querétaro, Qro. 31 de Mayo de 2021.

El que suscribe, egresado de la MAESTRÍA en INGENIERIA; de manera libre y voluntaria autorizo al Centro de Información del Instituto Tecnológico de Querétaro a difundir la obra de mi autoría con el Título del trabajo "PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFUIDOS A PARTIR DE UN FLUIDO USADO EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACERO". Para fines académicos, científicos y tecnológicos, mediante formato CD-ROM o digital, desde Internet, Intranet y en general cualquier formato conocido o por conocer.

Dicha obra estará disponible al estudiantado de esta Institución a partir del 31 de Mayo del 2021, fecha en la cual se puede difundir la obra.

Postulante: LUIS DANIEL GARCIA SALAS

No. de Control: M17142629

Correo electrónico: dgarcia@cidesi.edu.mx

Título de la obra: PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFUIDOS A PARTIR DE UN FLUIDO USADO EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACERO

Área del conocimiento: Materiales y Nanomateriales

Palabras clave de la obra: Nanofluido

  
NOMBRE Y FIRMA

---



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. **10/junio/2021**  
Oficio No. DEPI/082/2021

**A QUIEN CORRESPONDA:**

Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de tesis con título: **"PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFUIDOS A PARTIR DE UN FLUIDO USADO EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACERO"**; ha sido revisado por medio de la herramienta de software TURNITIN, cuyo resultado se anexa a la presente y **no se ha encontrado evidencias de plagio en su realización**. El autor de dicho trabajo, estudiante de **Maestría en Ingeniería, Luis Daniel García Salas**, es el responsable de la autenticidad y originalidad del mismo y; manifiesta que para su desarrollo ha utilizado diversas citas para su soporte, mismas que han sido marcadas a lo largo del mismo y listadas al final como REFERENCIAS bibliográficas.

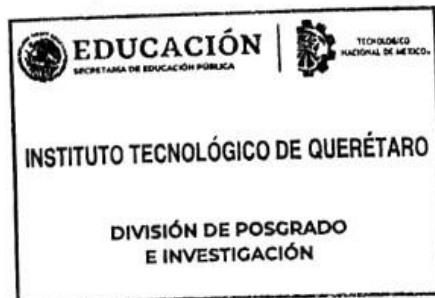
Se extiende la presente para la continuación del proceso de obtención del grado de Maestría en Ingeniería, y a petición del interesado.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*"la tierra será como sean los hombres"*

**GABRIELA PINEDA CHACÓN**

**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



C.c.p. Archivo

Jany\*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,  
Querétaro, Qro.  
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421  
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554  
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx  
tecnm.mx | queretaro.edu.mx





## LuisD - turnitin.docx

### Resumen de fuentes

# 15%

SIMILITUD GENERAL

1	docplayer.es INTERNET	5%
2	olimpia.cuautilian2.unam.mx INTERNET	4%
3	pt.scribd.com INTERNET	<1%
4	es.slideshare.net INTERNET	<1%
5	cybertesis.uni.edu.pe INTERNET	<1%
6	Universidad Autónoma de Nuevo León on 2020-07-08 TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
7	www.malvernpanalytical.com INTERNET	<1%
8	1library.co INTERNET	<1%
9	www.slideshare.net INTERNET	<1%
10	eprints.uanl.mx INTERNET	<1%
11	Universidad Politécnica de Madrid on 2018-12-18 TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
12	idoc.pub INTERNET	<1%
13	asmedigitalcollection.asme.org INTERNET	<1%
14	dspace.ups.edu.ec INTERNET	<1%
15	Mondragon Unibertsitatea on 2019-11-15 TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
16	www.gacetauniversitaria.cl INTERNET	<1%
17	saber.ucv.ve INTERNET	<1%



9/9/2021

LuisD - turnitin.docx

18	tesis.ipn.mx	INTERNET	<1%
19	Universidad Autónoma de Nuevo León on 2016-08-29	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
20	link.springer.com	INTERNET	<1%
21	www.ddsport.cz	INTERNET	<1%
22	I.F Prayogo, F. Muhammad, D. Rakhman, W.N. Putra, S. Harjanto. "Effect of Titanium Dioxide Particle Size in Water-based Micro/Nanofl...	CROSSREF	<1%
23	Karunya University on 2017-02-11	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
24	hdl.handle.net	INTERNET	<1%
25	lesmat.com	INTERNET	<1%
26	Universidad del Norte, Colombia on 2014-05-07	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
27	Higher Education Commission Pakistan on 2016-11-07	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
28	Higher Education Commission Pakistan on 2021-04-18	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
29	Pontificia Universidad Catolica del Peru on 2021-05-21	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
30	www.acerosindustrialeshgb.net	INTERNET	<1%
31	Corporacion Mexicana de Investigacion en Materiales S.A. de C.V. (COMMIMSA) on 2011-05-26	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
32	University of Brighton on 2021-05-07	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
33	jim2015.exa.unicen.edu.ar	INTERNET	<1%
34	studentsrepo.um.edu.my	INTERNET	<1%
35	Corporación Universitaria del Caribe on 2015-07-22	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
36	Escuela Politecnica Nacional on 2018-12-11	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
37	Ravi Prasher, Patrick E. Phelan, Prajesh Bhattacharya. "Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale ColloL...	CROSSREF	<1%
38	pt.slideshare.net	INTERNET	<1%
39	revistas.utp.edu.co	INTERNET	<1%
40	tesis.ucsm.edu.pe	INTERNET	<1%
41	www.dspace.espol.edu.ec	INTERNET	<1%



9/6/2021

LumID - turnitin.docx

42	BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA on 2019-10-21	TRABAJOS ENTREGADOS	<1%
43	Efren Gorrostieta. "Matlab-C++ Interface for a Flexible Arm Manipulator Simulation Using Multi-Language Techniques", 2006 Fifth Mexi...	CROSSREF	<1%
44	Jair Giovanni Ramírez González. "Recubrimientos nanoestructurados preparados usando técnicas asistidas por plasmas", Universida...	CROSSREF	<1%
45	baikardoc.com	INTERNET	<1%
46	libcyt.ucla.edu.ve	INTERNET	<1%
47	dokumen.pub	INTERNET	<1%
48	es.scribd.com	INTERNET	<1%
49	repositorio.uncp.edu.pe	INTERNET	<1%
50	sedici.unlp.edu.ar	INTERNET	<1%
51	tecno-actual.blogspot.com	INTERNET	<1%
52	www.dspace.uoe.edu.ec	INTERNET	<1%
53	www.google.com	INTERNET	<1%
54	www.ptolomeo.unam.mx:8080	INTERNET	<1%

**Se excluyeron los depósitos de búsqueda:**

- Ninguno

**Excluido del Informe de Similitud:**

- Bibliografía
- Coincidencias menores (10 palabras o menos)

**Se excluyeron las fuentes:**

- Ninguno



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE GRAFICAS.....	viii
ACRONIMOS .....	x
AGRADECIMIENTOS.....	xi
ABSTRACT .....	xii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>4</b>
2.1.-MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	4
2.1.1.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....	4
2.1.2.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	6
2.1.3.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION.....	7
2.2.-DEFINICION DE ALGUNOS CONCEPTOS BASICOS.....	8
2.2.1.-DIFUSIVIDAD TÉRMICA.....	8
2.2.2.-PIROELECTRICIDAD.....	9
2.2.3.-RESONADOR DE ONDAS TERMICAS.....	9
<b>2.3 PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 VISCOSIDAD.....	10
2.3.2 TENSIÓN SUPERFICIAL.....	11
2.3.3 CAPILARIDAD.....	11
2.3.4 TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	11
2.3.5 POTENCIAL ZETA.....	12
<b>2.4 PROPIEDADES DE TERMOFÍSICAS DE LOS LÍQUIDOS.....</b>	<b>12</b>
2.4.1 SÍNTESIS DE LOS NANOFLUIDOS.....	12
2.4.1.1. Método de un paso.....	13
2.4.1.2 Método de dos pasos.....	14
<b>2.5. CARACTERIZACIÓN DE NANOFLUIDOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.6 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....</b>	<b>18</b>
<b>2.7. MOVIMIENTO BROWNIANO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.8. LA FORMACION DE UNA CAPA INTERFACIAL (NANOCAPA).....</b>	<b>20</b>
<b>2.9. LOS ACEROS.....</b>	<b>24</b>

2.9.1 MICROESTRUCTURA DEL ACERO.....	27
a) Ferrita.....	30
b) Perlita.....	31
c) Cementita.....	32
d) Austenita.....	33
e) Martensita.....	34
f) Bainita.....	34
<b>2.10. EL TEMPLE.....</b>	<b>35</b>
2.10.1 CALENTAMIENTO Y TEMPERATURA DE AUSTENITIZACIÓN.....	36
2.10.2 MEDIOS DE TEMPLE.....	38
2.10.3 MECANISMOS DE ENFRIAMIENTO DURANTE EL TEMPLE.....	38
2.10.4 LA TEMPERATURA DEL MEDIO DE TEMPLE.....	40
2.10.5 SEVERIDAD DE TEMPLADO.....	42
2.10.6. ELECCIÓN DEL MEDIO DE TEMPLE.....	43
2.10.7 COMPARACIÓN DE LOS MEDIOS DE TEMPLE.....	44
2.10.7.1 AGUA.....	45
2.10.7.2 SALMUERA.....	45
2.10.7.3 ACEITE.....	46
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>47</b>
3.1 NANOTECNOLOGÍA.....	47
3.2 NANOFUIDO.....	47
3.3 NANOFUIDOS CON ALÚMINA.....	49
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 FLUIDO BASE.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 NANOPARTÍCULAS.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 PRUEBAS REOLÓGICAS.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4 DIFUSIVIDAD TÉRMICA.....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 TRATAMIENTO TÉRMICO.....</b>	<b>58</b>
<b>4.6 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.....</b>	<b>62</b>
<b>4.7 PRUEBA DE DUREZA.....</b>	<b>62</b>
<b>4.8 METALOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>
<b>4.9 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE TRANSMISION (TEM).....</b>	<b>65</b>
<b>4.10 DIMENSIONAMIENTO MEDIANTE ZETASIZER.....</b>	<b>66</b>

<b>5 RESULTADOS</b> .....	67
<b>5.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A VARIAR (FASE 1)</b> .....	67
5.1.1 Prueba de Viscosidad nanofluidos #1 y #3 .....	68
5.1.2 Perfil de Durezas nanofluidos #1 y #3.....	69
5.1.3 Microestructura de los nanofluidos #1 y #3.....	70
5.1.4. Prueba de Viscosidad nanofluidos # 2 y #4. ....	72
5.1.5 Perfil de Durezas nanofluidos #2 y #4.....	72
5.1.6. Microestructura de los nanofluidos #2 y #4.....	73
5.1.7. Microestructura aceite sin nanopartículas .....	75
5.1.8. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos #1, #2, #3 y #4. ....	76
5.1.9. Medición de Nanopartículas por Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM).....	77
5.1.10. Medición de Nanopartículas por Zetasizer.....	78
5.1.11 Discusión de los resultados. ....	79
<b>5.2 EFECTO DEL TIEMPO DE ULTRASONIDO (FASE 2)</b> .....	81
5.2.1 Análisis de curvas de enfriamiento .....	81
5.2.2 Curvas de enfriamiento nanofluidos #6, #9 y #12 .....	82
5.2.3. Prueba de Viscosidad nanofluidos #6, #9 y #12 .....	84
5.2.4 Perfil de Durezas nanofluidos #6, #9 y #12.....	84
5.2.5. Microestructura nanofluidos #6, #9 y #12.....	85
5.2.7. Prueba de Viscosidad nanofluidos #5, #8 y #11 .....	91
5.2.8. Perfil de Dureza nanofluidos #5, #8 y #11.....	91
5.2.9. Microestructura nanofluidos #5, #8 y #11 .....	92
5.2.10. Curvas de enfriamiento nanofluidos #7, #10 y #13. ....	96
5.2.11. Prueba de Viscosidad nanofluidos #7, #10 y #13.....	98
5.2.12. Perfil de Durezas nanofluidos #7, #10 y #13 .....	98
5.2.13. Microestructura nanofluidos #7, #10 y #13 .....	99
5.2.14. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos de la fase 2. ....	103
5.2.15. Medición de Nanopartículas por Zetasizer.....	104
5.2.16 Discusión de los resultados de la fase 2. ....	105
<b>5.3 EFECTO REDUCCIÓN DEL PESO EN SURFACTANTE Y TAMAÑO DE     PARTÍCULA (FASE 3)</b> .....	109
5.3.2 Perfil de Durezas nanofluidos #14 y #15 .....	111

5.3.3. Microestructura nanofluidos #14 y #15 .....	112
5.3.4. Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #16 y #17 .....	114
5.3.5. Perfil de Durezas nanofluidos NF#16 y NF#17 .....	115
5.3.6. Microestructura nanofluidos #16 y #17 .....	116
5.3.7. Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #18 y #19 .....	119
5.3.8. Perfil de Durezas nanofluidos #18 y #19 .....	121
5.3.9. Microestructura nanofluidos #18 y #19 .....	121
5.3.10. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos #14 y #15 .....	123
5.3.11. Discusión de los resultados de la fase 3. ....	124
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	128
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un flujo de calor a través de una barra. Fundamentos de Transferencia de Calor. ....	5
Figura 2. Esquema representativo del movimiento de cargas debido a la acción del calor. Electrónica Física del Estado Sólido .....	9
Figura 3.-Representación esquemática del resonador de ondas térmicas. Manual de operación “ <i>Diffusivity tester</i> ”, Cinvestav-Qro.....	10
Figura 4. Diagrama de proceso método de un paso.....	13
Figura 5. Diagrama de dos pasos para la obtención de nanofluido convencional.....	15
Figura 6. Diagrama Hierro Carbono.....	28
Figura 7. Diagrama de Hierro-Carbono, ( <i>Quenching Theory and Technology, 2010, Taylor and Francis Group, LLC</i> ). ....	30
Figura 8. Granos de Ferrita en acero al carbono. Atlas de microestructuras, Cidesi. ....	31
Figura 9. Fase de Perlita .....	32
Figura 10. Carburos de Hierro, Cementita. Atlas de microestructuras, Cidesi. ....	33
Figura 11. Austenita retenida (fase clara) en una matriz de martensita. Atlas de microestructuras, Cidesi. ....	33
Figura 12. Agujas de Martensita en acero al carbono. Atlas de microestructuras, Cidesi. ....	34
Figura 13. Fases de Bainita, formación Plumosa. Atlas de microestructuras, Cidesi. ....	35
Figura 14. Curva de enfriamiento en el Temple, Etapas de enfriamiento. <i>ASM Handbook, Heat treatment</i> . ....	40

Figura 15. Curvas de enfriamiento en muestras templadas. Tratamientos térmicos del Acero, Unam. ....	41
Figura 16. Fluido base .....	54
Figura 17. Nanopartículas de Alúmina.....	55
Figura 18. Plato caliente para agitado mecánico del nanofluido. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.....	55
Figura 19. Tina de ultrasonido, Sonificación del nanofluido .....	56
Figura 20. Reómetro Brookfield, medición de la viscosidad del Nanofluido. ....	57
Figura 21. Resonador de ondas térmicas .....	58
Figura 22. Probeta de acero 1045. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ. ....	59
Figura 23. Probeta de acero con termopar soldado, antes del proceso de temple. ....	60
Figura 24. Probeta de acero con termopar soldado, después del proceso de temple. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ. ....	60
Figura 25. Probeta de acero con termopar soldado. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ...61	
Figura 26. Probeta de acero con termopar soldado, después del proceso de temple. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ. ....	61
Figura 27. Instrumentación del proceso de Temple .....	62
Figura 28. Indentador Vickers, ASTM E384. ....	63
Figura 29. Diagrama de indentación para la probeta de acero. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.....	64
Figura 30. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #1, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	70
Figura 31. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#1, tomada a: a) 500X y b) 1000X .....	70
Figura 32. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #3, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	71
Figura 33. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#3, tomada a: a) 500X y b) 1000X .....	71
Figura 34. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #2, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	74
Figura 35. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#2, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	74
Figura 36. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #4, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	75
Figura 37. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#4, tomada a: a) 500X y b) 1000X.....	75

Figura 38. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al temple en el fluido base, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	76
Figura 39. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045, correspondiente al temple en el fluido base, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	76
Figura 40. Nanopartículas de $Al_2O_3-\gamma$ tomadas a: a) 90,000X y b) 200,000X. ....	78
Figura 41. Nanopartículas de $Al_2O_3-\gamma$ tomadas a: a) 200,000X y b) 300,000X. ....	78
Figura 42. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #6, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	86
Figura 44. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#9, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	87
Figura 46. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#12, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	88
Figura 47. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#12, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	88
Figura 48. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#5, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	93
Figura 49. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#5, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	93
Figura 50. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#8, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	94
Figura 51. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#8, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	94
Figura 52. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#11, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	95
Figura 53. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#11, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	95
Figura 54. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#7, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	100
Figura 55. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#7, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	100
Figura 56. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#10, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	101
Figura 57. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#10, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	101
Figura 58. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#13, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	102
Figura 59. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#13, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	102

Figura 60. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#14, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	112
Figura 61. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#14, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	112
Figura 62. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#15, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	113
Figura 63. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#15, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	113
Figura 64. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#16, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	117
Figura 65. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#16, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	117
Figura 66. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#17, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	118
Figura 67. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#17, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	118
Figura 68. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#18, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	122
Figura 69. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#18, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	122
Figura 70. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#19, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	123
Figura 71. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#19, tomada a: a) 500X y b) 1000X. ....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de los distintos elementos en los aceros. <i>Alloy chart, ASM Handbook</i> . ....	27
Tabla 2. Velocidades de enfriamiento .....	42
Tabla 3. Valores típicos del coeficiente H.....	43
Tabla 4. Diseño de experimentos inicial de los nanofluidos. ....	67
Tabla 5. Resultados de Difusividad térmica.....	77
Tabla 6. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 1.....	79
Tabla 7. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 2.....	81
Tabla 8. Velocidades de enfriamiento a $T_{\max}=700^{\circ}\text{C}$ para nanofluidos #6,#9 y #12. ....	83
Tabla 9. Velocidades de enfriamiento a $T_{\max}=700^{\circ}\text{C}$ para nanofluidos #5,#8 y #11 .....	90

Tabla 10. Velocidades de enfriamiento a $T_{max}=700^{\circ}C$ para nanofluidos #7,#10 y #13.....	97
Tabla 11. Resultados de Difusividad térmica.....	103
Tabla 12. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 2.....	104
Tabla 13. Pruebas experimentales de fase 3.....	109
5.3.1 Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #14 y #15 .....	109
Tabla 14. Velocidades de enfriamiento a $T_{max}=700^{\circ}C$ para nanofluidos #14 y NF#15.....	111
Tabla 15. Velocidades de enfriamiento a $T_{max}=700^{\circ}C$ para nanofluidos #16 y NF#17.....	115
Tabla 16. Velocidades de enfriamiento a $T_{max}=700^{\circ}C$ para nanofluidos #18 y NF#19.....	120
Tabla 17. Resultados de Difusividad térmica.....	124

## ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#1 y NF#3 .....	68
Grafica 2. Perfil de dureza Vickers para los NF#1, NF#3 y Fluido Base, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	69
Grafica 3. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#2 y NF#4 .....	72
Grafica 4. Perfil de dureza Vickers para los NF#2, NF#4 y Fluido Base, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	73
Grafica 5. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #6, #9 y #12 .....	83
Grafica 6. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#6, NF#9 y NF#12 así como del fluido base. ....	84
Grafica 7. Perfil de dureza Vickers para los NF#6, NF#9 y NF#12, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	85
Grafica 8. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #5, #8 y #11 .....	90
Grafica 9. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#5, NF#8 y NF#11. ....	91
Grafica 10. Perfil de dureza Vickers para los NF#5, NF#8 y NF#11, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar. ....	92
Grafica 11. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #7, #10 y #13 .....	97
Grafica 12. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#7, NF#10 y NF#13, así como del fluido base. ....	98
Grafica 13. Perfil de dureza Vickers para los NF#7, NF#10 y NF#13.....	99



Grafica 14. Monitoreo del tamaño de partícula (Considerando el día 1 como el día de preparación del nanofluido).....	105
Grafica 15. Velocidad de enfriamiento de los Nanofluidos de la Fase 2 .....	106
Grafica 16. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos #14 con un %peso_np=0.5 y NF#15 con un %peso_np=1.0 y un %peso_span80=0.1 .....	110
Grafica 17. Perfil de dureza Vickers para los NF#14 y NF#15, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	111
Grafica 18. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos NF#16 con un %peso_np=0.5 y NF#17 con un %peso_np=1.0 y un %peso_span80=0.1 .....	115
Grafica 19. Perfil de dureza Vickers para los NF#16 y NF#17, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	116
Grafica 20. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos; NF#18 con un %peso_np=0.5 y NF#19 con un %peso_np=1.0, sin surfactante Span80 .....	120
Grafica 21. Perfil de dureza Vickers para los NF#18 y NF#19, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	121
Grafica 22. Perfil de dureza Vickers para los NF#14, 15, 16 y 17, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	125
Grafica 23. Perfil de dureza Vickers para los NF#14, 15, 18 y 19, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.....	126
Grafica 24. Velocidad de enfriamiento de los Nanofluidos de la Fase 3 y del fluido base.....	127

## **ACRONIMOS**

<b>Np</b>	Nanopartícula
<b>Nf</b>	Nanofluido
<b>Fb</b>	Fluido Base (Aceite Mineral)
<b>PNf</b>	Probeta sometida a Temple con Nanofluido
<b>Dt</b>	Difusividad Térmica
<b>S</b>	Surfactante (Span80)

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por su apoyo en la realización de este proyecto, el área de Tecnología de Materiales y el personal de la gerencia de Prueba de Materiales quienes me brindaron sustancial soporte, en especial extender mi agradecimiento al M. en C. José Núñez a quien le debo el apoyo para facilitar el desarrollo del proyecto.

Quiero agradecer al área de Posgrado del Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ) por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y apoyarme en la realización de este trabajo; en especial a la Dra. Esperanza Rodríguez y el Dr. José Julián Montes, quienes fueron una guía esencial.

Mil gracias al Dr. Martín Yáñez del Centro de Investigación y de estudios avanzados (Cinvestav) Campus Querétaro por su valioso apoyo en el desarrollo de las pruebas térmicas.

Agradezco el valioso apoyo de la Dra. Yadira Maldonado del Centro Nacional de Metrología (CENAM) en el soporte para el éxito del desarrollo de este proyecto.

Le doy gracias infinitas a mi esposa Jazmín Degollado quien es mi apoyo en todo momento y me ha alentado a seguir triunfando, a mis hijos (Ángel y Ximena), por su amor incondicional a hacia este servidor. A mis Padres (Lourdes y Emilio) que me siempre me incentivaron a seguir luchando.

## **ABSTRACT**

Heat treatments in steels are widely used in the metal-mechanical industry to improve their mechanical properties, in particular, the carburizing and quenching treatments. Carburizing consists of the diffusion of carbon on the surface of steel parts under certain conditions of temperature, time, and carbon concentration; quenching is a sudden cooling in a liquid medium once the piece has finished its carburizing process and is at the austenitizing temperature.

Nanofluids consist of a dispersion of nanoparticles in a liquid medium. Recent studies show the advantages that nanofluids offer in heat transfer applications; it is reported that they increase the thermal conductivity and the heat transfer coefficient in comparison to the base fluid. In the present work, nanofluids are prepared using a quenching oil as base fluid and adding Alumina ( $Al_2O_3$ ) nanoparticles smaller than 50 nm. The dispersion of the nanoparticles in the oil is carried out by a two-step method, using mechanical stirring and the application of high-frequency ultrasonic waves.

The results of this work have shown differences between the measurements of thermal diffusivity and viscosity between the base fluid (without nanoparticles) and the fluid with  $Al_2O_3$  nanoparticles (nanofluid). Besides, the characterization in the Optical Microscope of the microstructural differences of the steel pieces after hardening is presented.

### **Key Words:**

Nanofluid, nanoparticles, alumina, thermal diffusivity.

# 1. INTRODUCCIÓN

La disipación de calor es una de las mayores barreras en innumerables sistemas, que van desde nivel micro (procesadores de computador, componentes electrónicos diversos, etc.) a nivel macro (sistemas de refrigeración industrial, automotriz, entre otros). La cantidad de calor generada por uno de estos procesos se ha incrementado notablemente con el desarrollo de sus capacidades y con ello, la necesidad de ser enfriados de manera adecuada para conseguir un óptimo desempeño. A partir de ahí, numerosos esfuerzos apuntaron al mejoramiento de los sistemas de transferencia de calor utilizados en la industria. En ese sentido, la búsqueda de nuevos materiales y nuevos fluidos de trabajo con características técnicas favorables son indispensables para, finalmente, aumentar la capacidad de transferencia de calor de esos sistemas.

Con el progreso de la ciencia e ingeniería térmica, el desarrollo de dispositivos y sistemas de escala cada vez menores se tornó en una gran área de interés. Como resultado, es posible obtener una considerable reducción del tamaño de tales dispositivos e incluso de los sistemas, operando con igual o mayor eficiencia térmica sin variar drásticamente los principios básicos de su funcionamiento.

Los Nanofluidos poseen propiedades termofísicas superiores en comparación a los fluidos base de acuerdo a lo reportado en la literatura. Innumerables investigaciones experimentales han demostrado el incremento de dichas propiedades, principalmente de la conductividad térmica y del coeficiente de transferencia de calor. Tales nanofluidos presentan algunas ventajas en relación con aquellas suspensiones que usaban partículas de mayores dimensiones (tamaños micro y milimétrico); entre ellas:

- 1) mayor estabilidad,
- 2) menor impacto abrasivo y
- 3) mayor facilidad para fluir en microcanales, con menor riesgo de aglomeración.

Teniendo en cuenta estas características que presentan los nanofluidos, proporcionan un posible alto impacto en la industria encargada de realizar tratamientos térmicos en aceros,

al utilizar estos fluidos con nanopartículas durante el enfriamiento de partes sometidas al proceso de temple, y con ello mejorar las propiedades mecánicas del acero.

En el presente trabajo se estudian los parámetros que tendrán influencia en el comportamiento de un nanofluido, sin antes comprender que un nanofluido es una mezcla de un fluido que puede ser base agua o bien base aceite con la adición de partículas del orden de los nanómetros, en este caso la base del fluido es aceite, que bien este se aceite es utilizado para el temple de piezas de acero.

El agregar nanopartículas de 50 nanómetros de Alúmina al aceite, por ende se tendrá un nanofluido, el porcentaje de estas partículas será una variable a estudiar, ya que su comportamiento con relación al fluido podrá mejorar el comportamiento del nanofluido en sus características como: propiedades térmicas, reológicas y físicas, esta última se puede ver analizar la dispersión de las nanopartículas o bien la estabilidad del nanofluido. La viscosidad, la difusividad térmica y el tamaño de partícula son las pruebas experimentales que arrojarán resultados para evaluar el comportamiento de nanopartículas en el aceite.

Derivado de esto se llevan a cabo pruebas experimentales en un acero al carbono, utilizando un nanofluido para realizar el proceso de temple y demostrar que las propiedades del fluido se mejoraron para dicho tratamiento térmico. Esto permite que se obtengan curvas de enfriamiento en el acero al carbono, estas demostraran la efectividad del fluido con la adición de las nanopartículas, ya que el enfriamiento deberá ser brusco, o bien obtener velocidades de enfriamiento superiores a las obtenidas con solo el fluido sin nanopartículas.

El acero al carbono será caracterizado en propiedades mecánicas y metalúrgicas, Dureza y microestructura, la intención de un tratamiento térmico es mejorar propiedades mecánicas, por lo que al aumentar la dureza, la microestructura está relacionada con la dureza, por lo que se estudia dicha relación en base al nanofluido al que se somete el temple.

La dureza será analizada mediante microindentación, se utiliza esta técnica ya que se utilizan cargas pequeñas, gramos, y así evaluar el comportamiento mecánico en la superficie, teniendo como termino el núcleo de la muestra.

Con la ayuda de la metalografía, se inspecciona la microestructura del acero al carbono mediante un corte en diferentes secciones, transversal y longitudinal, esto permite tener una perspectiva del interior de la pieza, y así demostrar la efectividad del tratamiento térmico

mediante la obtención de micrografías, imágenes de la microestructura, que bien esta es una representación topográfica del acomodo interno del acero.

## 2. MARCO TEORICO.

Para el estudio de transferencia de calor se deben de tomar en cuenta varios conceptos básicos así como también se debe de conocer los mecanismos involucrados en la transferencia de calor. Los mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación, generalmente estos fenómenos están presentes en la mayoría de los procesos de transferencia de calor.

La definición de algunos conceptos básicos involucrados en este trabajo y los modelos de detección fotopiroeléctrica y del sistema denominado resonador de ondas térmicas, que son sistemas utilizados en la determinación de propiedades de transporte térmico, como la difusividad térmica.

### 2.1.-MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura y esta se puede dar mediante tres métodos: por conducción por convección y radiación o se pueden dar simultáneamente dos o los tres al mismo tiempo.

#### 2.1.1.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas energéticas a las menos energéticas, es posible cuantificar el proceso de transferencia de calor por conducción de calor por la ecuación o modelo que se conoce como ley de Fourier.

Sea  $q''$  la densidad de corriente de energía (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), que se establece en la barra debido a la diferencia de temperaturas entre dos puntos de la misma. La ley de Fourier afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía  $q''$  y el gradiente de temperatura, como se muestra en la ecuación 2.1.1.1.

$$q'' = K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1.1.1)$$

Siendo K una constante característica del material denominada conductividad térmica. Para un gradiente de temperatura establecido, el flujo de calor por conducción aumenta con el incremento de conductividad térmica, cabe señalar que en general la conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, que a su vez es mayor que la de un gas, esta tendencia se debe en gran parte a la diferencia en el espacio intermolecular para los estados.



Consideremos un elemento de la barra de longitud  $dx$  y sección  $S$ , ver figura 2.1 La energía que entra en el elemento de volumen en la unidad de tiempo es  $qS$ , y la que sale es  $q'S$ . La energía del elemento cambia, en la unidad de tiempo, en una cantidad igual a la diferencia entre el flujo entrante y el flujo saliente expresada en la ecuación 2.1.1.2.

$$qS - q'S = -\frac{\partial q}{\partial x} S dx \quad (2.1.1.2)$$

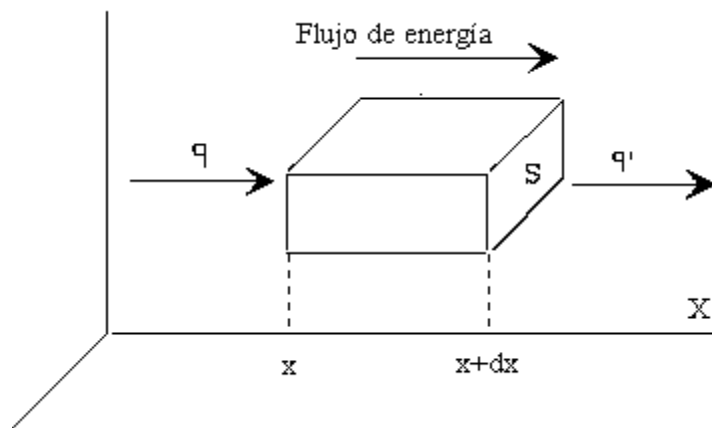


Figura 1. Esquema de un flujo de calor a través de una barra. Fundamentos de Transferencia de Calor.

Esta energía, se emplea en cambiar la temperatura del elemento. La cantidad de energía absorbida o cedida (en la unidad de tiempo) por el elemento es igual al producto de la masa de dicho elemento por el calor específico y por la variación de temperatura, expresada en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta Q) = \frac{\partial}{\partial t}(mc_p T) \quad (2.1.1.3)$$

Igualando ambas expresiones, y teniendo en cuenta la ley de Fourier, se obtiene la ecuación diferencial que describe la conducción térmica, conocida como ecuación de difusión de calor en sólidos, en la cual el parámetro relevante del material es la difusividad térmica, de aquí la importancia de su medición.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} ; \quad \alpha = \frac{K}{\rho CP} \quad (2.1.1.4)$$

## 2.1.2.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.

Esta forma de transmisión de calor se origina por movimiento de un fluido cuando existe gradiente de temperatura y de presión que originan flujos de masa.

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se trasfiere mediante el movimiento global del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra utilizar el término convección cuando se hace referencia a este transporte acumulado y el término advección cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico. De esta manera la masa contenida en una fracción de volumen de la sustancia con temperatura mayor, que se desplaza hacia una zona de una temperatura menor, transfiere calor y esta última región. Cuando la causa del desplazamiento del fluido es la diferencia de densidad, que acompaña a la diferencia de temperatura, el fenómeno se denomina convección natural. Si el movimiento del fluido es debido a un gradiente de presión, entonces se dice que se tiene un proceso de convección forzada.

Cuando se tiene un fluido en contacto con una pared plana o curva aun cuando el fluido este en movimiento, habrá una delgada capa del fluido estancado en contacto con la pared. Si la temperatura del fluido es mayor que la temperatura media del fluido, habrá una transferencia de calor de la pared al fluido debido a una combinación a través de esta delgada capa y de convección del fluido. La rapidez de transferencia de calor por convección se puede estimar de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$dC = hA(T_2 - T_1) \quad (2.1.2.1)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de convección, este depende de las condiciones en la capa límite, en las que fluye la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de la pared.  $A$  es el área de contacto,  $T_2$  es la temperatura del fluido y  $T_1$  la temperatura de la pared.

### 2.1.3.-TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION.

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, esta radiación puede ser tanto en sólidos, líquidos como en gases, sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas en los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. Sistemas con temperaturas diferentes radian energía electromagnética de acuerdo a la ley de Planck y de Stefan-Boltzmann Esta energía puede ser absorbida por diferentes sistemas, la cual puede ser representada por la potencia total radiada por unida de área donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $56.704 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{K}$ ) y  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo a través de la siguiente ecuación:

$$E_{\text{ext}} = \sigma T \quad (2.1.3.1)$$

En sólidos metálicos este incremento de energía es muy pequeño. La potencia de radiación absorbida por un cuerpo de área  $A$ , cuya temperatura es  $T_2$ , la cual se radiada por otro cuerpo a mayor temperatura  $T_1$ , está dada por el balance entre la energía radiada y la energía absorbida, esta relación se puede observar en la siguiente ecuación:

$$Q = A\sigma(T_1 - T_2)\alpha \quad (2.1.3.2)$$

Donde  $\alpha$  es la absorción del cuerpo a temperatura  $T_2$ . En el caso de que  $T_1$  y  $T_2$  sean temperaturas muy cercanas, la ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$T_1 = T_2 + \Delta T \quad (2.1.3.3)$$

Donde  $\Delta T \ll T_2$  entonces Q puede desarrollarse en una serie de Taylor, dando por resultado la siguiente ecuación:

$$Q = 4 \sigma \alpha T_2 \Delta T \quad (2.1.3.4)$$

En la ecuación anterior se observa que la absorción de energía del cuerpo a menor temperatura depende del cubo de su temperatura entre ambos cuerpos, así cuando la diferencia de temperatura es cero, no hay una absorción neta de energía radiada.

## 2.2.-DEFINICION DE ALGUNOS CONCEPTOS BASICOS.

Para una mejor explicación de este trabajo se requiere el conocimiento de algunos conceptos, así como los modelos que soportan las técnicas fotopiroeléctrica.

### 2.2.1.-DIFUSIVIDAD TÉRMICA.

El producto de  $\rho C_p$ , normalmente denominado capacidad térmica volumétrica, mide la capacidad de un material para almacenar energía térmica, donde  $C_p$  es la capacidad calorífica y  $\rho$  es la densidad, las sustancias de densidad grande se caracterizan por pequeños calores específicos, en el análisis de transferencia de calor, la razón de transferencia en relación con la capacidad térmica volumétrica es una importante propiedad denominada difusividad térmica  $\alpha$  que tiene unidades de  $m^2/s$ , expresada en la siguiente ecuación.

$$\alpha = \frac{K}{\rho c} \quad (2.2.1.1)$$

La difusividad térmica mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad de almacenar energía térmica. Materiales de  $\alpha$  grande responderán rápidamente a cambios en su medio térmico, mientras que los materiales de  $\alpha$  pequeña responden más lentamente y tardan más en alcanzar una nueva condición de equilibrio.

### 2.2.2.-PIROELECTRICIDAD.

La piroelectricidad es el cambio en la polarización de un material sometido a cambios de temperatura. Este tipo de fenómenos se observa en materiales dieléctricos que contienen polarizaciones espontáneas, en cualquier polímero amorfo como el PVDF (fluoruro de polivinilideno), y en algunos cerámicos como el PZT, dicha polarizaciones espontáneas son producidas por dipolos orientados.

Al modificar la temperatura de un material que posee esta característica se retrae o expande anisotrópicamente y este ligero movimiento de los átomos unos respecto de otros da lugar a un desplazamiento de las cargas que en ciertas direcciones puede ocasionar polarizaciones eléctricas. Ver figura 2.

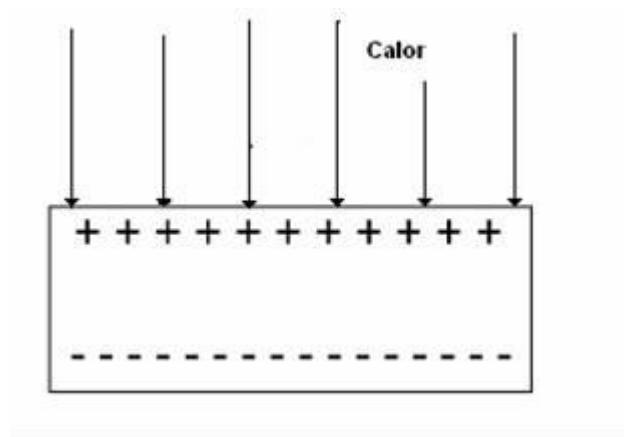


Figura 2. Esquema representativo del movimiento de cargas debido a la acción del calor.

Electrónica Física del Estado Sólido

### 2.2.3.-RESONADOR DE ONDAS TERMICAS.

Resonador de ondas térmicas es un sistema que se basa en principios foto térmicos para la obtención de la difusividad térmica, básicamente un resonador de ondas térmicas está formado por un láser, la luz emitida por el láser es modulada a través modulator mecánico (llamado chopper), cuya frecuencia sirve como referencia a un lock-in, la luz modulada incide sobre un material transductor, donde genera ondas térmicas, La placa transductora esta monta sobre una plataforma que esta acoplada a un micrómetro que puede ser movido con un motor a de manera manual, o puede no ser movido si el barrido no es en espesor sino en frecuencia,

las onda térmica son detectadas mediante un sensor piroeléctrico que genera una señal en amplitud y fase la cual pasa por un pre amplificada y posteriormente es enviada a un amplificador lock-in, la señal es registrada en amplitud y fase con ayuda de una pc y un programa de adquisición de datos escrito en lab-view la figura 3 muestra el diagrama esquemático del montaje experimental.

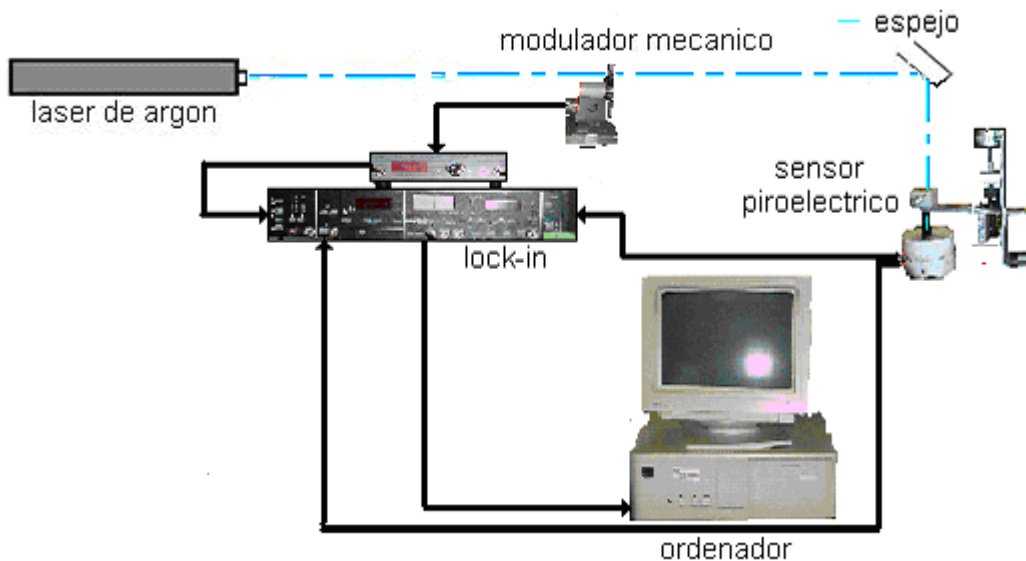


Figura 3.-Representación esquemática del resonador de ondas térmicas. Manual de operación “*Diffusivity tester*”, Cinvestav-Qro.

## 2.3 PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS.

Un líquido está formado por moléculas que están en movimiento constante y desordenado, cada una de ellas chocan miles de millones de veces en un lapso muy pequeño. Dentro de los líquidos existen fuerzas extremas que entre sus moléculas las cuales se atraen, por otra parte cuando a un líquido se le aplica una presión su volumen no se ve afectado en gran cantidad, ya que sus moléculas tienen poco espacio entre sí.

### 2.3.1 VISCOSIDAD.

Algunos líquidos, literalmente fluyen lentamente, mientras que otros fluyen con facilidad, la resistencia a fluir se conoce con el nombre de viscosidad. La viscosidad puede medirse tomando en cuenta el tiempo que transcurre cuando cierta cantidad de un líquido fluye a través de un delgado tubo, bajo la fuerza de la gravedad. El parámetro reológico utilizado por

excelencia en el control de los líquidos es la viscosidad, que representa su resistencia al flujo, cuando éste se produce en régimen laminar y en condiciones estacionarias. La viscosidad,  $\eta$ , se define como la razón entre la tensión de cizalla aplicada a un fluido,  $\sigma$ , y el gradiente de velocidades que se genera,  $\gamma$ . Las propiedades reológicas de suspensiones concentradas se ven afectadas principalmente por las fuerzas coloidales entre partículas debido a la fuerte interacción entre ellas.

### 2.3.2 TENSIÓN SUPERFICIAL.

En un líquido, cada molécula se desplaza siempre bajo influencia de sus moléculas vecinas. Una molécula cerca del centro del líquido, experimenta el efecto de que sus vecinas la atraen casi en la misma magnitud en todas direcciones. Sin embargo, una molécula en la superficie del líquido no está completamente rodeado por otras y, como resultado, solo experimenta la atracción de aquellas moléculas que están por abajo y a los lados. Por lo tanto la tensión superficial actúa en un líquido perpendicular a cualquier línea de 1cm de longitud en la superficie del mismo.

### 2.3.3 CAPILARIDAD.

Es un fenómeno que se manifiesta cuando un líquido está en contacto con la superficie de un sólido. Es consecuencia del balance entre las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido y las fuerzas de adhesión entre las moléculas del líquido y la superficie del sólido. Posiblemente habrás visto tomar una muestra de sangre colocando un tubo capilar sobre una gota; el líquido asciende por el interior del tubo, de forma similar a como asciende la humedad del suelo a través de una pared. En ambos casos, estamos ante un fenómeno de capilaridad.

### 2.3.4 TAMAÑO DE PARTÍCULA.

El tamaño de partícula o agregado puede utilizarse como indicador macroscópico de las interacciones entre partículas. De esta forma, el tamaño de agregado disminuye a medida que la barrera energética aumenta y se dificulta el proceso de agregación de las partículas. Por tanto el tamaño de clúster formado depende también de las condiciones de preparación de la suspensión y se ve influenciado por muchos factores como el contenido en sólidos, el pH, la fuerza iónica, la energía de dispersión y el tiempo.

### 2.3.5 POTENCIAL ZETA.

El potencial zeta es el potencial de las partículas en el plano de cizalla, es decir, en la superficie exterior de la partícula considerando la capa de contra iones que se desplaza junto a ella en caso de existir. Las medidas de potencial zeta proporcionan un análisis inmediato del grado de estabilidad y dispersión de las partículas en suspensión. Se trata de una medida directamente proporcional a la carga de las partículas, de forma que cuanto mayor sea su valor, más cargadas estarán éstas y mayor será el potencial electrostático y la consecuente repulsión que impedirá que las partículas se atraigan y permanezcan unidas formándose agregados.

## 2.4 PROPIEDADES DE TERMOFÍSICAS DE LOS LÍQUIDOS

### 2.4.1 SÍNTESIS DE LOS NANOFLUIDOS

La síntesis de nanofluidos es un paso clave para su utilización en aplicaciones prácticas, sobre todo en aspectos como la homogeneidad y estabilidad, en la búsqueda de la optimización de las propiedades intensificadas. Según las exigencias de las futuras aplicaciones, diferentes combinaciones de fluido base y nanopartícula deberán ser empleadas. En ese sentido, es posible obtener dispersiones de nanopartículas de óxidos, nitratos, metales, carburos y no metales, en fluidos como agua, etileno glicol y diversos tipos de aceites. A pesar de que las pesquisas iniciales no tomaron en cuenta los aspectos de la síntesis de las nanopartículas, en la actualidad es considerada un factor relevante al momento de producir el nanofluido.

Los nanofluidos pueden ser obtenidos mediante dos tipos de proceso bastante diferenciados: el primero, la dispersión de nanopartículas producidas con anterioridad, por medios físicos o químicos, en el fluido base; y el segundo, por la degradación de un material base y su dispersión directa dentro del fluido base. En ambos casos, pueden ser usados aditivos que faciliten la homogeneización y garanticen la estabilidad del nanofluido producido. Actualmente los métodos más comunes para la obtención de nanofluidos pueden ser clasificados en: i) Métodos de un paso y ii) Métodos de dos pasos. A continuación, es presentada una breve descripción de los métodos más utilizados para la síntesis de nanofluidos de uso experimental, así como las ventajas y desventajas existentes para su aplicación industrial.



#### 2.4.1.1. Método de un paso.

Se denominan así a aquellos procesos que combinan la síntesis de las nanopartículas con la preparación de los nanofluidos en un solo paso. Dentro de esta categoría, son comunes los procesos de evaporación directa de materiales sólidos (realizada en condiciones de vacío sobre un flujo de fluido base a baja presión) y los procesos de precipitación química. Estos tipos de técnicas tuvieron éxito al reducir los efectos de la aglomeración de las nanopartículas en general. En particular, son utilizados principalmente para sintetizar nanopartículas de metales sólidos, pues previenen en mayor medida su oxidación debido a las condiciones en las que opera, en la figura 2.4 se presenta un diagrama típico para obtener nanofluidos.

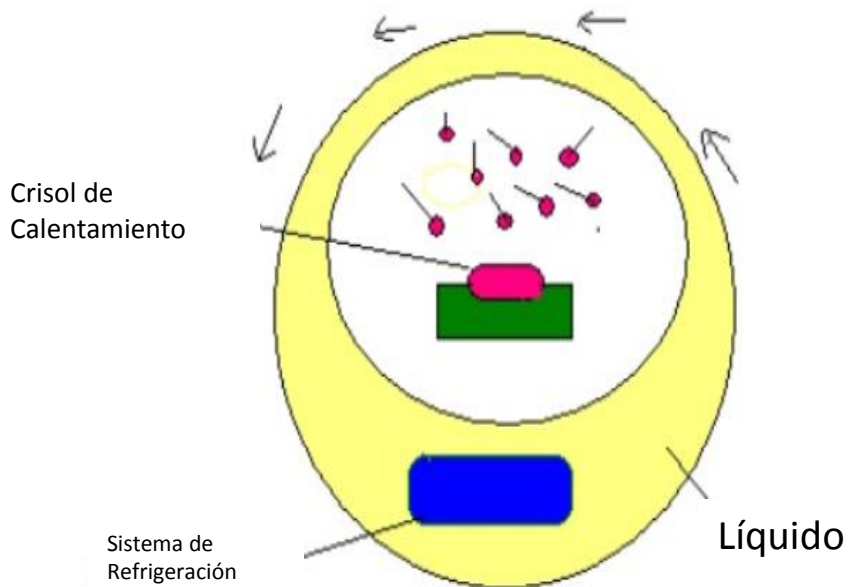


Figura 4. Diagrama de proceso método de un paso, “*Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments, A.Angayarkanni &J. Philip, 2015*”.

La desventaja común de ambos métodos, ya sean físicos o químicos es que estos son desarrollados en procesos por lotes, además de tener un control limitado sobre un número de parámetros importantes, incluido el tamaño de las nanopartículas. La posibilidad de realizar la síntesis de manera continua y controlada incrementaría su viabilidad comercial. Otra

restricción para el uso de este tipo de procesos, es que el fluido base debe poseer una baja presión de vapor, de lo contrario, aumentaría el riesgo de aglomeración de nanopartículas.

#### 2.4.1.2 Método de dos pasos.

Estudios experimentales iniciales sobre nanofluidos utilizaron procesos de dos pasos, que primero sintetizaban las nanopartículas en forma de un polvo seco ultra fino, en su mayoría obtenida por condensación de un gas inerte (IGC, por sus siglas en inglés). Este método primero vaporiza el material base en una cámara de vacío y luego condensa ese vapor en nanopartículas por colisión con un flujo de gas inerte a presión controlada (siendo esta la principal diferencia con el método de un paso, en el cual el contacto ocurre directamente entre el material vaporizado y el fluido base). Las nanopartículas obtenidas en el primer paso son posteriormente dispersadas en el fluido base mediante procesos físicos de mezcla como sonicación u homogeneización a altas presiones.

Una de las mayores ventajas de este tipo de método es la gran variedad de nanofluidos que pueden ser obtenidos. Prácticamente cualquier material cerámico, metálico o no metálico puede ser reducido a un polvo ultra fino y luego ser dispersado en un fluido base previamente condicionado para tal fin. Se destaca también entre las ventajas el menor costo que representaría para la producción de nanopartículas y nanofluidos en escala industrial.

Sin embargo, los métodos de dos pasos presentan desventajas que son considerados desafíos tecnológicos: la alta probabilidad de aglomeración y la oxidación de las nanopartículas. Estos fenómenos se pueden presentar durante todo el proceso (antes, durante o después de la mezcla). En ese sentido, la aglomeración es un asunto crítico en todo desarrollo tecnológico que involucre la manipulación de materiales a escala nanométrica, incluyendo los nanofluidos. El problema de aglomeración es resultado de las fuerzas intermoleculares de Van Der Waals entre las nanopartículas, siendo una de las principales barreras para la producción de nanofluidos en grandes cantidades mediante este proceso. Una solución para este inconveniente es la aplicación de un tratamiento químico en la superficie de contacto de las nanopartículas y el fluido base para mejorar la dispersión y reducir los efectos de las fuerzas intermoleculares, en la figura 2.5, se presenta el esquema de proceso típico para un nanofluido, cabe mencionar que la adición o no del surfactante no excluye la sonicación u homogeneización.

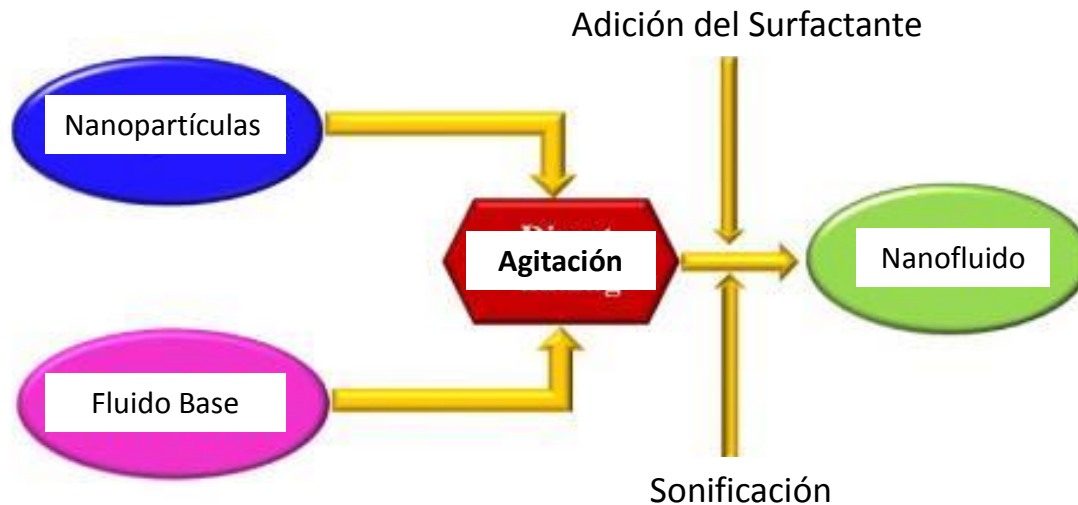


Figura 5. Diagrama de dos pasos para la obtención de nanofluido convencional. *Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids*, Linghui Kong, Jianlin Sun & Yueyue Bao, 2017.

Por su naturaleza, la concentración de nanopartículas de óxidos metálicos es mayor que la de nanopartículas metálicas (para efectos equivalentes en la conductividad térmica), lo que incrementa la probabilidad de presentar aglomeraciones y deposición con el tiempo. A pesar de ellos, son preferidos los primeros debido a que son menos sensibles a la oxidación.

## 2.5. CARACTERIZACIÓN DE NANOFLUIDOS.

Natarajan et al. (2008) reportó que utilizando nanotubos de carbón (*multiwalled carbón nanotubes MWCNTs*) se obtiene una gran cantidad de mejora, por ejemplo con una fracción volumétrica del 1% de MWCNT, la conductividad térmica del agua aumentó en 40% y del etilenglicol en 30%.

Debido a que la tecnología actual facilita la producción de partículas nanométricas, en los últimos años ha crecido el interés de dispersar nanopartículas en fluidos para mejorar su capacidad de transferir calor. Los nanofluidos son apropiados para aplicaciones de transferencia de calor, ya que son más estables, poseen mayor conductividad térmica y no producen mayores caídas de presión comparadas con otras suspensiones. Como la

conductividad térmica es uno de los parámetros más importantes para mejorar la transferencia de calor se han realizado diversos estudios sobre como aumenta esta conductividad en los nanofluidos. La mayoría de los experimentos realizados han arrojado resultados positivos concernientes al aumento de la conductividad térmica usando nanopartículas. Farajollahi et al. (2010) realizaron estudios en un intercambiador de calor, en donde utilizaron nanofluidos de óxido de aluminio y óxido de titanio en base agua. Las mejoras para el coeficiente de transferencia de calor global con 0.3%, 0.75%, 1% y 2% en volumen para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /agua fueron del 14%, 16%, 15% y 9%, respectivamente. De igual manera con 0.15%, 0.3%, 0.5% y 0.75% en volumen para  $\text{TiO}_2$ /agua sus correspondientes mejoras fueron del 11%, 24%, 16% y 13%, respectivamente. Tyagi et al. (2009) reportaron un aumento del 10% en la eficiencia del colector solar de absorción directa utilizando una suspensión de nanopartículas de aluminio y agua (0.8% fracción en volumen). Demir et al. (2011) investigaron el aumento de transferencia de calor con partículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en un intercambiador de calor de doble tubo a contraflujo, simulando con varias concentraciones en volumen y llegaron a la conclusión de que el uso de nanofluidos incrementa significativamente la transferencia de calor incluso para fracciones en volumen relativamente pequeñas. Otanicar et al. (2010) reportaron resultados experimentales y numéricos de placas absorbentes utilizando nanofluidos de grafito (0.1% fracción en volumen) y plata (0.25% fracción en volumen), demostrando mejoras del 3% y 5%, respectivamente.

Como fue mostrado anteriormente, la mayoría de las investigaciones experimentales tuvo como objetivo la determinación de la conductividad térmica de los nanofluidos. Una revisión del material bibliográfico actual muestra que el incremento de la conductividad térmica de los nanofluidos presenta anomalías. Esa nueva conductividad no puede ser estimada mediante un promedio de la conductividad térmica de los componentes de la mezcla. Para salvar tal inconveniente, múltiples investigaciones han desarrollado diferentes técnicas para medir la conductividad térmica de los nanofluidos y todo indica que cada una aportó solamente al aumento de la controversia. Una de las pocas conclusiones de todas estas pesquisas es que el fenómeno de intensificación de la conductividad térmica dependería de un gran número de parámetros, tales como:

- Concentración volumétrica de nanopartículas
- Material de las nanopartículas

- Tamaño de las nanopartículas
- Forma de las nanopartículas
- Fluido base
- Temperatura del nanofluido
- Aditivos
- Acidez
- Otros

Entretanto, la cuantificación del efecto de cada uno de estos parámetros sobre la intensificación de las propiedades térmicas de los nanofluidos es aún un tema de debate. Con estos precedentes, es necesario llevar a cabo cuidadosamente los experimentos para medir la conductividad térmica con un buen planeamiento experimental que tome en cuenta la diversidad de los parámetros envueltos en el fenómeno. Esto contribuiría a la validación de muchos modelos teóricos propuestos para la predicción de la conductividad térmica efectiva de los nanofluidos.

La medición de la conductividad térmica de líquidos es un factor importante en el desarrollo de la tecnología para la caracterización de los nanofluidos. El principio básico para la medición de la conductividad térmica es la Ley de Fourier para conducción de calor. En la configuración experimental más simple, es necesario establecer un flujo de calor unidimensional de valor conocido y, de esa forma, midiendo la temperatura en dos lugares diferentes a lo largo de la dirección de la transferencia de calor, estimar la conductividad térmica según la ecuación:

$$k = \frac{q''/A}{\Delta T/L} \quad (2.6.1)$$

Donde  $q''$  es el flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura en los extremos a una distancia  $L$  y  $A$  representa el área de la sección transversal.

En este esquema de medición, la mayor dificultad reside en establecer un campo de temperaturas unidimensional. Aún en el caso de sólidos isotrópicos ya es complicado tener este tipo de configuración. Para el caso de los líquidos, es preciso evitar un gradiente de

temperatura en la dirección de la gravedad. De otro lado, las corrientes convectivas son un inconveniente más a superar, pues producen una medida inexacta de la conductividad térmica.

En el caso de los nanofluidos, la presencia de las nanopartículas suspendidas, la homogeneidad y la estabilidad de las mismas en el fluido base representan el mayor obstáculo al momento de la medición. Por esto, la conductividad térmica de los nanofluidos (y de los fluidos en general) puede ser medida con precisión si el tiempo de medición fuese lo suficientemente pequeño como para impedir el desarrollo de la convección. Así, en vez de calentar el fluido desde la base, este es convenientemente calentado desde la parte superior. Todas las consideraciones anteriores fueron tomadas en cuenta para la implementación de los diversos dispositivos de medición de la conductividad térmica. Entre las técnicas de medición más comunes, es posible encontrar las siguientes:

- Método del Hilo Caliente (*Transiente hot-wire technique*)
- Método de Analizador de constantes térmicas
- Método de la celda cilíndrica
- Método de oscilación de temperatura
- Método 3-Omega.

En el sentido de la obtención de una caracterización completa del nanofluido, son importantes los aportes hechos para establecer condiciones y procedimientos patrón con un mínimo de variación entre las mediciones experimentales observadas en la literatura.

## **2.6 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

La convección o transferencia de calor convectiva es el término que se usa para describir la transferencia de calor de una superficie a un fluido en movimiento. La superficie puede ser el interior de una tubería, el fuselaje de un avión supersónico o la interfase entre el agua y el aire en una torre de enfriamiento. El flujo puede ser forzado, como en el caso de un líquido que se bombea a través de una tubería o del aire sobre un avión que surca la atmósfera. Por otro lado, el flujo podría ser natural (o libre), causado por fuerzas de empuje debidas a una diferencia de densidad, como en el caso de una torre de enfriamiento de corriente natural. Estos dos tipos de flujo pueden ser internos como en la tubería, o externos, como el flujo sobre el avión. Además, un flujo, ya sea forzado o natural, puede ser laminar o turbulento; el flujo

laminar es más común cuando las velocidades son bajas, las dimensiones son pequeñas y los fluidos son más viscosos. El flujo en una tubería llega a ser turbulento cuando el grupo adimensional llamado número de Reynolds,  $Re = VD/\nu$ , es mayor que 2300, donde  $V$  es la velocidad (m/s),  $D$  es el diámetro de la tubería (m), y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ ). La velocidad de transferencia de calor tiende a ser mucho mayor en los flujos turbulentos que en los laminares, debido a la mezcla violenta que sufre el fluido.

La base de la teoría macroscópica de la transferencia de calor en compuestos es la ecuación de conducción de calor de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.7.1)$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica y  $T$  representa la temperatura. Con el fin de determinar cuáles son los factores y de qué forma estos influyen en el fenómeno del aumento de la transferencia de calor, y en especial de la conductividad térmica, pues destaca la propuesta de distintos autores sobre la existencia de nuevos mecanismos involucrados en el transporte de la energía térmica en nanofluidos. Estos mecanismos son:

## 2.7. MOVIMIENTO BROWNIANO.

El cual es responsable del desplazamiento de las nanopartículas en suspensión a través del fluido base, con el cual aumenta la probabilidad de colisión entre ellas. Esto posibilitaría el transporte de calor directamente entre las nanopartículas. De la Ecuación siguiente es posible observar que no son tomados en consideración los aspectos dinámicos del movimiento browniano: es decir, es supuesto un fluido estático.

Podemos asociar el movimiento browniano con una constante de difusión particular  $D_p$ , dada por la ecuación de Stokes-Einstein:

$$D_p = \frac{k_B T}{3\pi\mu f b d_{np}} \quad (2.8.1)$$

Donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $\mu f b$  es la viscosidad del fluido base y  $d_{np}$  el diámetro de la nanopartícula. Usando esta constante es posible estimar el efecto del movimiento browniano sobre la conductividad térmica. En este punto, son definidos dos tiempos de

respuesta: el primero relaciona el tiempo para desplazar una nanopartícula a una distancia igual a su diámetro: Sin embargo, aunque la contribución del movimiento browniano en el desplazamiento de las nanopartículas (y como consecuencia, a la difusión de calor por contacto) pareciese ser reducida, todavía está en estudio la probable contribución al fenómeno de aglomeración de nanopartículas. Cabe destacar que otra de las posibles contribuciones del movimiento Browniano sea la obtención de una mejor mezcla en el fluido, especialmente en las regiones frías y calientes, reduciendo el gradiente local de temperatura en todo el fluido, (Keblinski et al., 2006)

Prasher et al. (2006) presentan la correlación mostrada en la Ecuación siguiente, que considera la aglomeración de las nanopartículas como principal mecanismo para el incremento de la conductividad térmica.

$$\frac{k}{k_m} = \frac{[k_p(1 + 2\alpha) + 2k_m] + 2\phi[k_p(1 - \alpha) - k_m]}{[k_p(1 + 2\alpha) + 2k_m] - \phi[k_p(1 - \alpha) - k_m]} \quad (2.8.2)$$

Consideró relevantes para la intensificación de la conductividad térmica en nanofluidos, todo parece apuntar a que el movimiento Browniano no sería el único factor gobernante en el fenómeno, sino una combinación (en mayor o menor grado) de cada uno de los mecanismos presentados.

## **2.8. LA FORMACION DE UNA CAPA INTERFACIAL (NANOCAPA).**

Han sido encontradas múltiples investigaciones sobre el efecto de la resistencia térmica interfacial, producto del leve contacto entre las fases sólida y líquida del nanofluido. Esta resistencia, denominada resistencia de Kapitza, aparece como un obstáculo para el flujo de calor en la interface, que tiene sustento en la teoría de conducción de energía mediante fonones. A pesar de eso, el uso de esta resistencia como parámetro para la intensificación de la conductividad térmica lleva a resultados sobrestimados y con tendencias a disminuir con la reducción del tamaño de las nanopartículas, lo que es claramente contrario a la mayoría de los resultados de investigaciones experimentales (Lee et al., 2006).

En contraste, se presenta otro fenómeno producido en la interface sólido-líquido: la formación de una capa de fluido alrededor de la nanopartícula, denominada nanocapa. Es evidente que la estructura atómica de las nanopartículas es mucho más ordenada que la estructura molecular del fluido base. Justamente en la interface de ambas fases se desarrolla un arreglo



de las moléculas del fluido base. El efecto de esta nueva nanocapa puede ser dividido en dos aspectos:

- Por un lado, el estado cuasi-sólido de la nanocapa (con las moléculas del fluido base detenidas en la superficie de la nanopartícula) lleva a pensar que la conductividad térmica de aquella estará en un rango determinado por las conductividades del fluido base y de la nanopartícula.
- La formación de la nanocapa contribuye en el aumento aparente de la concentración volumétrica de las nanopartículas. De ese modo, sin tomar en cuenta el caso más optimista (que es cuando la nanocapa presenta la misma conductividad de la nanopartícula) se tendrá una intensificación sólo por el hecho de haberse formado la nanocapa.

Xue (2003) analizó resultados experimentales para nanofluidos basados en alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para obtener valores específicos de espesor y conductividad de la nanocapa. Un análisis similar fue desarrollado por Yu y Choi (2003) con resultados similares.

Sin embargo, otros experimentos (Yu et al., 2003) apuntan a que el espesor de la nanocapa no supera el valor de unos pocos diámetros atómicos (aproximadamente 1nm). A pesar de tener, aparentemente, una gran influencia en la intensificación de la conductividad, esta no sería el único factor relevante para alcanzar los valores obtenidos experimentalmente.

El efecto de la aglomeración de las nanopartículas

La aglomeración de las nanopartículas, al contrario de la coalescencia, puede representar una ventaja para la transferencia de calor por conducción. Si las nanopartículas pudieran aglomerarse en estructuras identificadas como redes de percolación de calor, serían creados caminos de baja resistencia térmica, lo que contribuiría para el aumento de la conductividad térmica efectiva.

Es natural pensar que la aglomeración de nanopartículas será mayor cuanto mayor sea el número de estas. Esto es, el efecto de la formación de aglomeraciones (Clusters) será intensificado en altas concentraciones de nanopartículas. Como consecuencia también se tendrá una menor distancia entre los llamados clusters, con la tendencia a formar las redes de percolación de calor. Como efecto negativo, también es esperado que la formación de estos clusters aumente la probabilidad de sedimentación de las nanopartículas.

Correlaciones teóricas para determinar la conductividad térmica de nanofluidos.

La aplicación de nanofluidos en procesos industriales ha aumentado en las últimas décadas. Discusiones sobre los mecanismos de transferencia de calor en nanofluidos. Sirvieron para aumentar el interés de los científicos para desarrollar correlaciones y modelos predictivos para este fenómeno. De ese modo, como ya fue dicho anteriormente, aún es motivo de debate cuáles mecanismos gobiernan el incremento de la conductividad térmica.

La previsión teórica y algunos resultados experimentales muestran que los primeros factores que influyen en el aumento de la conductividad térmica son: el tamaño y la forma de la nanopartícula, la relación longitud-diámetro (llamada razón de aspecto), el tiempo de homogenización y la concentración volumétrica de la fase dispersa.

El estudio desarrollado por Maxwell (1873) consideraba el fenómeno de la conducción, bajo el enfoque del transporte de calor macroscópico, para una suspensión diluida de partículas esféricas y despreciando cualquier interacción entre ellas. La ecuación de Maxwell, obtenida como solución de la ecuación para un campo de temperaturas alrededor de la partícula dispersa, es la siguiente:

$$k_{Mw} = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (2.9.1)$$

Donde  $k$  representa la conductividad térmica;  $\phi$ , concentración volumétrica; y los índices  $nf$ ,  $np$  y  $fb$ , representan nanofluido, nanopartícula y fluido base, respectivamente.

El enfoque de la transferencia de calor macroscópica empleado parece ser efectivo para sistemas particulados de escala milimétrica y micrométrica. Sin embargo, en mezclas que usan nanopartículas, tales correlaciones no consiguen calcular los valores de intensificación hallados experimentalmente.

Se observa que la Ec. (2.9.1) tiene como únicas variables las conductividades de ambas fases del nanofluido y la concentración de las nanopartículas. Inclusive, para valores muy elevados de conductividad térmica de las nanopartículas (esto es:  $k_{np} \gg k_{bf}$ ), la intensificación de la conductividad del nanofluido es apenas función de la concentración volumétrica. Físicamente, este comportamiento es explicado por el hecho que la temperatura a través de la nanopartícula permanece constante, dando como resultado la misma condición de contorno para la ecuación de flujo de calor en el líquido envolvente.

De este pequeño análisis se infiere que la conductividad térmica de los nanofluidos calculada por la ecuación de Maxwell es independiente de la composición de las nanopartículas, lo cual no es reflejado en gran parte de las investigaciones experimentales desarrolladas.

La mayoría de los modelos desarrollados posteriormente fue basada en este modelo inicial, apenas con algunas consideraciones más, tales como la forma de la partícula (*Fricke, 1924; Hamilton & Crosser, 1962; Granqvist & Hunderi, 1978; Xue, 2000*), distribución particular (*Wiener, 1912*), estructura partícula-capa (*Kerner, 1956; Lamb et al. 1978*), resistencia de contacto (*Benvensite, 1987*), entre otros

Estos modelos pueden ser agrupados como modelos clásicos, cuyas principales referencias son: la Teoría del Medio efectivo, las consideraciones de conductividad anisotrópica en nanopartículas esféricas o no esféricas, distribución de las nanopartículas en el fluido base, entre otras.

Dentro de los modelos clásicos, el modelo de Hamilton-Crosser (1962) ha mostrado una mayor contribución, pues considera un parámetro que evalúa la forma de la nanopartícula. Este modelo es actualmente usado para comparar algunos de los resultados experimentales. Su ecuación viene dada por:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\psi^{-1}\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.9.2)$$

Donde  $\psi$  representa el parámetro de esfericidad de la nanopartícula. Para nanopartículas esféricas  $\psi = 1$ .

En este modelo, el tamaño de la nanopartícula es obviado. Sólo el parámetro de forma y la concentración volumétrica se presentan como factores relevantes. El factor de forma de la Ec. (5) de Hamilton-Crosser relaciona el área superficial de la nanopartícula con la misma área para una partícula esférica con igual volumen. La independencia de la conductividad calculada en relación con el tamaño de las nanopartículas es inconsistente con los resultados de investigaciones experimentales.

También fueron desarrollados modelos teóricos que consideraban la presencia de la denominada nanocapa como factor influyente, no sólo como parte de una partícula compleja, sino también con propiedades diferenciadas de los otros componentes del nanofluido.

En ese sentido, y para considerar la existencia de la nanocapa, Yu y Choi (2003) asumieron nanopartículas esféricas de radio definido  $r$ , envuelta por una nanocapa de espesor  $t_{nc}$ .

Esta nanocapa posee conductividad térmica diferente  $k_{nc}$ , mayor que la conductividad del fluido base ( $k_{fb}$ ) y menor que la de la nanopartícula ( $k_{np}$ ). De la unión de la nanocapa y la nanopartícula es formada una nanopartícula equivalente, con conductividad térmica equivalente  $k_{eq}$ . Esta conductividad equivalente viene dada por la Ec. (2.9.3):

$$k_{eq} = \frac{[2(1 - \varepsilon) + (1 + \beta)3(1 + 2\varepsilon)]\varepsilon}{-(1 - \varepsilon) + (1 + \beta)3(1 + 2\varepsilon)} k_{np} \quad (2.9.3)$$

Donde  $\beta=t/r_{np}$ , es la razón entre el espesor de la nanocapa y el radio de la nanopartícula; y  $\varepsilon=k_{nc}/k_{np}$ , es la razón entre las conductividades de la nanocapa y la nanopartícula. El límite superior estará definido para la condición  $\varepsilon=1$ , esto es, cuando la conductividad de la nanocapa fuere igual a la conductividad de la nanopartícula.

Es importante destacar que los modelos presentados hasta este punto toman en cuenta consideraciones sobre los componentes del nanofluido, la presencia de la nanocapa y las propiedades de todos ellos. Esto es, siempre manteniendo el enfoque en los aspectos morfológicos y composición de los nanofluidos.

## 2.9. LOS ACEROS.

Un acero es simplemente una aleación Hierro-Carbono en la cual este último se encuentra en un porcentaje pequeño. El Hierro puro es un material suave y dúctil, pero la adición de carbono lo cambia a un material duro y resistente. La cantidad de carbono que se añade a la aleación tiene un efecto sobre la dureza y la resistencia que obtiene el material, lo cual se da en términos de la resistencia y la ductilidad que posee el acero. Entre mayor sea el contenido de carbono mayor es la dureza del acero, tanto en el estado recocido como en el estado endurecido; este contenido de carbono se aproxima al 2.11%.

Los aceros de bajo carbono tienen un contenido de carbono de 0.08 a 0.25 %. Generalmente, se consideran como aceros para maquinaria y se endurecen únicamente por carburización. Grados como AISI 1018 0 AISI 1020 son grados comunes de aceros de bajo carbono. Aceros de mediano contenido de carbono tienen un contenido de dicho elemento entre 0.25 y 0.60 %.

Estos aceros se pueden endurecer en la condición en que están; sin embargo, no se desarrollan altos niveles de dureza. Ellos son, generalmente, muy tenaces y resistentes y se emplean en aplicaciones tales como engranes, ejes o en aplicaciones en chumaceras. Grados AISI 1045 o AISI 4140 son aceros de mediano carbono comunes. Los aceros de alto carbono, cuyo rango de carbono va de 0.6 a 2.11 %, se consideran aceros de alto carbono y con contenidos de entre 0.6 a 2.4 % como aceros para herramienta. Los grados AISI 1095 a aceros de alta velocidad están dentro de este grupo. El sistema de identificación AISI (*American Iron and Steel Institute*) para los distintos grados de acero indica cual es el contenido de carbono, así como algunas otras características de acuerdo a lo siguiente:

- AISI establece una categoría para los aceros dentro de un sistema de grados identificados por los dos primeros dígitos. En un grado AISI 1018, el “10” significa que este acero es un acero al carbono no resultado. El azufre se añade típicamente al acero para aumentar su maquinabilidad.
- El segundo conjunto de dígitos proporciona el rango de carbono en porcentaje, dado como el nominal. Esto es, un grado identificado como 1018 significa que es un acero al carbono no resultado con contenido de carbono nominal de 0.18 %. Así, añadiendo el decimal después de los primeros dos dígitos, permite conocer el contenido nominal de carbono de todos los aceros en el sistema de graduación AISI.
- Si hay una letra en el centro de la designación, tal como 12L14 o 11L17, la letra indica un elemento añadido. Para determinar el contenido de carbono, hay que añadir el decimal después del carácter alfa.
- Otros prefijos comúnmente empleados son:
  - “11” indica un acero resultado.
  - “12” indica un acero grado maquinaria resultado y refosforado.
  - “3X” (31, 32, 33 y 34) indica un acero al níquel-cromo.
  - “41” indica un acero al cromo- molibdeno.
  - “43” indica un acero al níquel- cromo-molibdeno
  - “5X” (50, 51, 52) indica un acero al cromo
  - “61” indica un acero al cromo-vanadio
  - “86” indica un acero al níquel-cromo-molibdeno
  - “92” indica un acero al cromo-silicio

Como se mencionó anteriormente, los efectos del carbono cambian la ductilidad y la resistencia de los aceros, sin embargo, el talento real del carbono es la habilidad de poder endurecer el acero y hacerlo utilizable para una amplia variedad de aplicaciones.

Si se intenta tratar térmicamente un material base hierro (metal ferroso) que únicamente contiene carbono, siendo su contenido suficientemente alto, éste le permitirá obtener un revestimiento duro sobre su superficie: El acero AISI 1095 es un buen ejemplo. Este acero tiene una cantidad pequeña de manganeso, el cual añade resistencia, pero no añade nada a su habilidad de aumentar la profundidad de endurecimiento, por la pequeña cantidad en la que se encuentra presente. Por esta razón, cuando se temple un acero 1095 en agua o salmuera, producirá un revestimiento muy duro sobre el acero, sin embargo, el espesor del revestimiento es de únicamente 0.04 a 0.08 pulgadas (1.016 a 2.032 mm). El núcleo o centro del acero permanece sin endurecerse, pero adquiere la calidad de tenaz.

Si se añade una cantidad suficiente de manganeso, por ejemplo 1.5%, se incrementará la profundidad de endurecimiento. La tabla 2.8 muestra cual es el efecto que tienen los distintos elementos en el acero.

Los elementos que dan mejor maquinabilidad (azufre, plomo, fósforo y carbono libre) son elementos que al añadirse al acero lo hacen "sucio" en el sentido de que ellos no se homogenizan o mezclan durante el proceso de fabricación del acero, es decir, tienen una tendencia a segregarse y formar cadenas o grupos químicos, los cuales no aceptan a los otros elementos que permiten que el endurecimiento tenga lugar. Por esta razón, no son a menudo usados como elementos de aleación y su contenido nominal en los aceros al carbono es muy bajo.

<b><i>ELEMENTO</i></b>	<b><i>E F E C T O</i></b>
<b><i>CARBONO</i></b>	<i>.06 a .40 % Permite un revestimiento endurecido poco profundo .40 a .60 % Permite un revestimiento endurecido más fácil .60 a .80 % Aumenta la dureza del material arriba de .80 % aumenta la resistencia, no el endurecimiento</i>
<b><i>MANGANESO</i></b>	<i>Aumenta la profundidad de endurecimiento</i>
<b><i>SILICIO</i></b>	<i>Añade resistencia y tenacidad</i>
<b><i>CROMO</i></b>	<i>Añade resistencia al desgaste y tenacidad</i>
<b><i>NIQUEL</i></b>	<i>Añade tenacidad y algo de resistencia al desgaste</i>
<b><i>TUNGSTENO</i></b>	<i>Añade resistencia al desgaste</i>
<b><i>VANADIO</i></b>	<i>Refina la estructura del grano (afino de grano)</i>
<b><i>MOLIBDENO</i></b>	<i>Añade resistencia al calor y endurecimiento</i>
<b><i>COBALTO</i></b>	<i>Imparte resistencia al calor</i>
<b><i>COLUMBIO</i></b>	<i>Añade resistencia al desgaste</i>
<b><i>AZUFRE, PLOMO, FÓSFORO, CALCIO</i></b>	<i>Imparten mejor maquinabilidad</i>

Tabla 1. Efecto de los distintos elementos en los aceros. *Alloy chart, ASM Handbook.*

### 2.9.1 MICROESTRUCTURA DEL ACERO.

En este punto es conveniente considerar las principales estructuras metalográficas que se encuentran presentes en los aceros, ya sea por enfriamiento lento en condiciones de equilibrio o por tratamiento térmico en condiciones fuera de equilibrio.

La austenita es una fase microestructural que se caracteriza por ser una estructura cristalina de hierro cúbica centrada en las caras (FCC). La ferrita es una solución sólida casi libre de carbono de uno o más elementos en una disposición cúbica centrada en el cuerpo (BCC) en la que el hierro alfa es el disolvente. Los aceros totalmente ferríticos solo se obtienen

cuando el contenido de carbono es muy bajo. Estos nombres son estrictamente nombres de estructuras y no implican nada sobre la composición o propiedades. La cementita es otra fase, que se puede observar en la Figura 6, es frágil, de hierro y carbono, que se conoce como carburo de hierro con la fórmula química aproximada es  $\text{Fe}_3\text{C}$ , y se caracteriza por ser una estructura cristalina ortorrómbica. Cuando ocurre como una fase en el acero, la composición química se verá afectada por la presencia de manganeso (Mn) y otros elementos formadores de carburo. La perlita es una microestructura caracterizada por ser un agregado laminar de ferrita y cementita. Se forma a partir de austenita, y las laminillas pueden ser gruesas o delgadas según la velocidad de enfriamiento y el rango de temperatura donde se forman (tratamiento térmico isotérmico). También es posible obtener ferrita y cementita esférica, pero en este caso no se llama perlita.

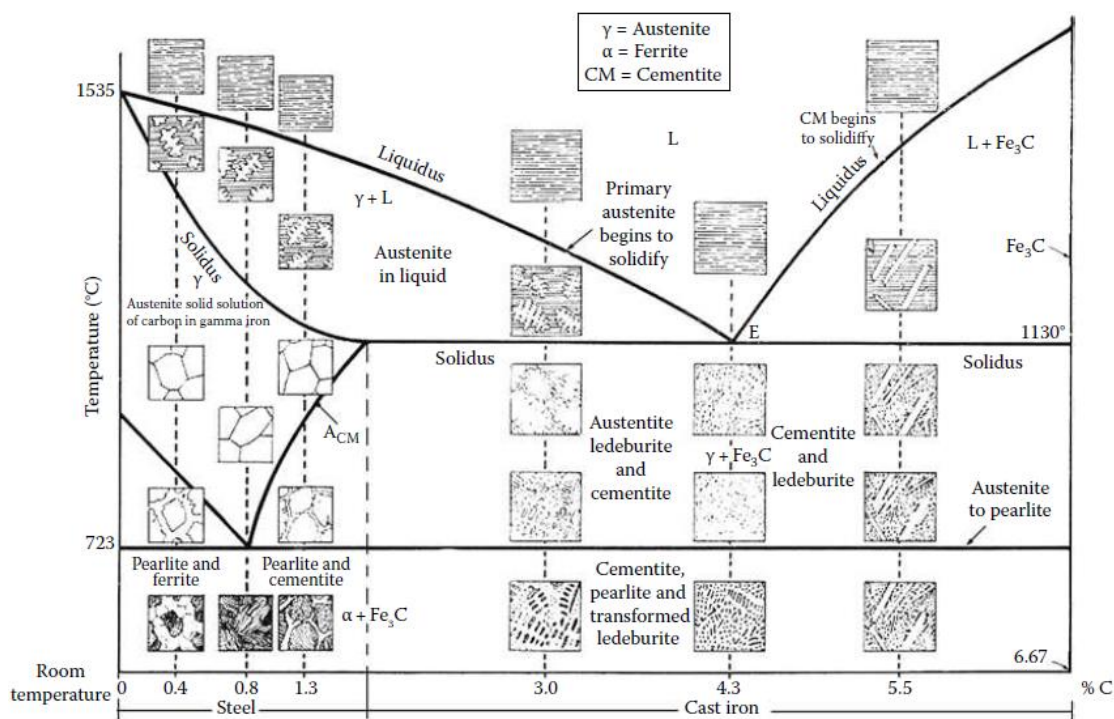


Figura 6. Diagrama Hierro Carbono. (*Quenching Theory and Technology, 2010, Taylor and Francis Group, LLC*)

En la Figura 7 hay un área etiquetada como austenita. Esta área cubre amplios rangos de composición y temperatura, lo que confirma el hecho de que austenita es claramente el nombre de la estructura y no está relacionada con una composición en particular. Incluso los aceros



aleados forman austenita a temperaturas elevadas de la misma manera que se forma para los aceros simples. El rango de temperatura entre 723°C y la línea GE, o la línea EF, se denomina "Rango de temperatura crítica", donde coexisten dos fases, austenita y ferrita (entre 723 ° C y la línea GE), o austenita y cementita (entre 723°C y la línea EF).

En el diagrama hierro-carbono, se describe la transformación de un acero al carbono, por ejemplo, un acero de 0,8% de Carbono, se calentará hasta una temperatura T2, temperatura de austenización, la transformación solo ocurre a través de la estructura austenítica. A una velocidad de enfriamiento lenta, la austenita se transformará en perlita gruesa a 723°C. Esta transformación también se llama transformación eutectoide. Debido a esto, la composición del acero con 0,8% de C se denomina acero eutectoide. Las composiciones de acero que tienen menos del 0,8% de C se denominan hipoeutectoides, y aquellas con más del 0,8% de C se denominan hipereutectoides. Para una composición hipoeutectoide como 0.4% de C, una pieza de acero tendrá una microestructura austenítica a una temperatura T1, como se muestra en la Figura 29 A una velocidad de enfriamiento lenta, la transformación austenítica comenzará cuando la temperatura alcance la línea GE. En este punto, la ferrita se forma a partir de austenita. Entre la línea GE y 723°C, se forma cada vez más ferrita mientras que la austenita restante se vuelve más rica en carbono, alcanzando el 0,8% a 723°C, también conocida como temperatura eutectoide. Justo por debajo de esta temperatura, la austenita restante se transforma en perlita gruesa. A temperatura ambiente, la microestructura del acero hipoeutectoide será un compuesto de ferrita y perlita.

El porcentaje de fase relativa entre ferrita y perlita depende del contenido de carbono del acero y la presencia de aleaciones de elementos en el acero. En el caso de aceros hipereutectoides, por ejemplo 1,2% de C, la austenitización se completa a una temperatura T3 (Figura 7). Bajo enfriamiento lento, la transformación comenzará en la línea EF. En este caso, la austenita comienza la transformación en cementita (alrededor del límite del grano) y la austenita restante está perdiendo carbono proporcionalmente a esa transformación. A 723°C, la austenita restante contiene 0,8% de C, y por debajo de la temperatura eutectoide se transforma en perlita. A temperatura ambiente, los aceros hipereutectoides están formados por cementita como una red alrededor de la perlita. El porcentaje de fase relativa entre la cementita y la perlita variará según el porcentaje de carbono y la presencia de los elementos de aleación en el acero.

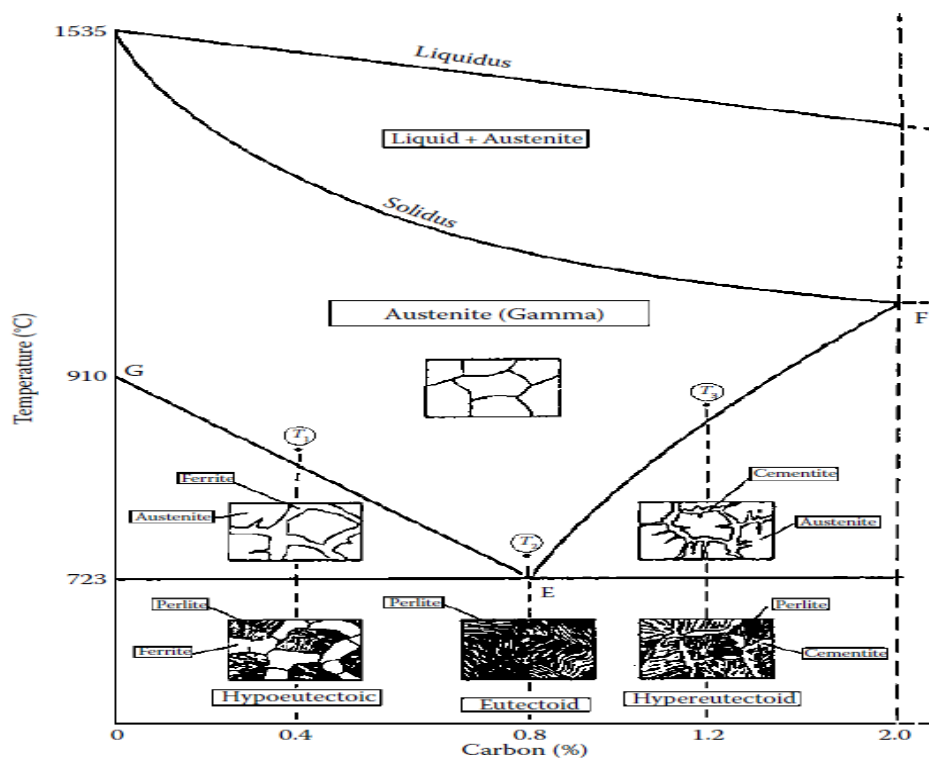


Figura 7. Diagrama de Hierro-Carbono, (*Quenching Theory and Technology, 2010, Taylor and Francis Group, LLC*).

a) Ferrita.

Este constituyente puede contener, además de una pequeña cantidad de carbono en solución sólida, otros elementos ya sea como residuales del proceso de fabricación o añadidos intencionalmente como elementos de aleación. Por esta razón el término ferrita se utiliza para incluir cualquier solución sólida basada sobre el hierro  $\alpha$ , para distinguirlas de aquellas soluciones sólidas de hierro y o austenita.

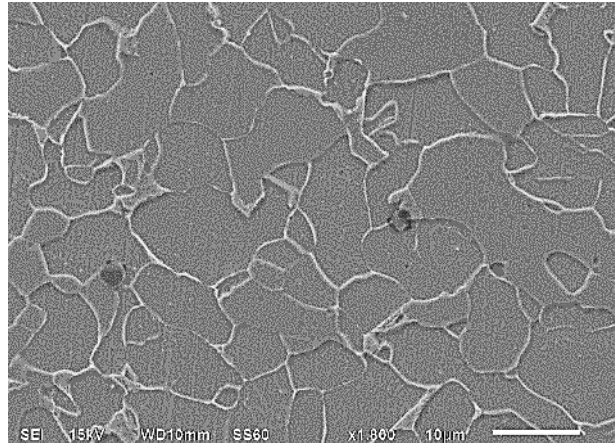


Figura 8. Granos de Ferrita en acero al carbono. Atlas de microestructuras, Cidesi.

#### b) Perlita

Es el producto de la reacción eutectoide ocurriendo bajo condiciones de equilibrio a una temperatura de  $727^{\circ}\text{C}$  y con una composición de  $0.77\% \text{ C}$ ; los reactantes son la ferrita ( $0.025\% \text{ C}$ ) y la cementita ( $6.69\% \text{ C}$ ), y por otra parte la austenita con  $0.77\% \text{ C}$ . La estructura perlítica consiste de laminillas delgadas alternas de cementita y ferrita, denominándose este tipo de estructura como perlita laminar. En aceros al carbono se presenta una estructura totalmente perlítica únicamente cuando la composición es la del punto eutectoide. En los aceros hipoeutectoides la estructura consiste de granos de perlita rodeada de granos de ferrita. En los aceros hipereutectoides un enfriamiento desde la zona austenítica, provoca la formación de una cierta cantidad de cementita proeutectoide, antes que la perlita aparezca, quedando la parte formada por los límites de grano como una red continua de cementita, mientras que el interior de los granos se transformará completamente en perlita, cuando continúa el enfriamiento por debajo de los  $727^{\circ}\text{C}$ .

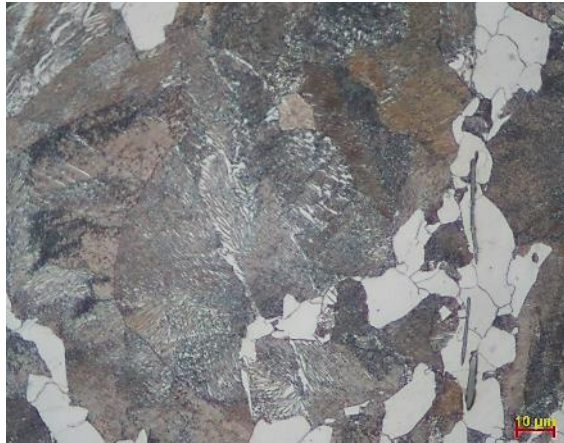


Figura 9. Fase de Perlita (zonas café-oscuro) más ferrita (fase clara). Atlas de microestructuras, Cidesi.

### c) Cementita

La cementita es un compuesto de hierro y carbono, duro y frágil, conteniendo 6.69 %C correspondiendo esto a la composición en porcentaje en peso de  $Fe_3C$ , 3 átomos de Fe y uno de C. En los aceros al carbono hipoeutectoides y eutectoides, la cementita se encuentra formando parte de los granos de perlita, mientras que en los aceros hipereutectoides se encuentra en dos formas, como una red continua en los límites de grano con el interior formado por perlita y el segundo en forma de carburo, precipitados.

En cada caso la cementita está presente como un compuesto duro y resistente a la abrasión y como tal ejerce profunda influencia sobre el desempeño de los aceros.

En los aceros aleados complejos, la cementita juega un papel muy importante, no sólo por ella misma, sino en combinación con otros carburos formados con los elementos de aleación, para producir partículas extremadamente duras y resistentes a la abrasión.

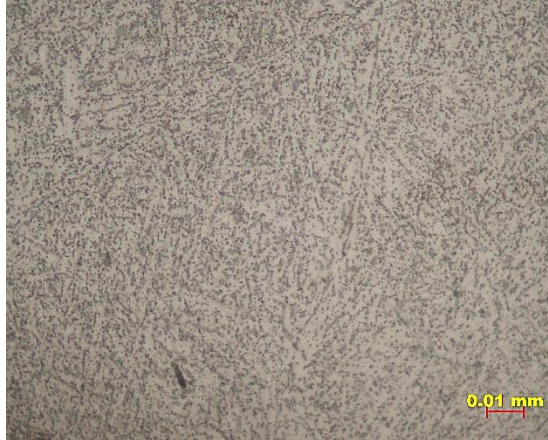


Figura 10. Carburos de Hierro, Cementita. Atlas de microestructuras, Cidesi.

d) Austenita

Es una solución sólida de carbono en hierro. Esta fase se extiende sobre una gran sección del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, con la solubilidad del carbono aumentando con la temperatura a un máximo de 2.11% a 1148°C. Del mismo diagrama se puede observar que la austenita no existe a temperatura ambiente, para aceros al carbono, bajo condiciones de equilibrio. En ciertos aceros aleados, como en el caso de los aceros para herramientas, una pequeña porción de austenita puede retenerse en la estructura final, o en los aceros inoxidables austeníticos.

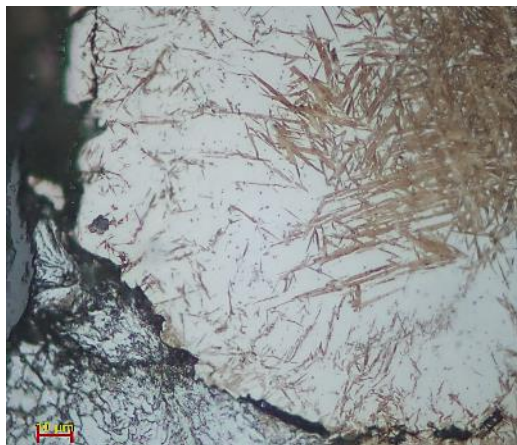


Figura 11. Austenita retenida (fase clara) en una matriz de martensita. Atlas de microestructuras, Cidesi.

### e) Martensita

La martensita es indudablemente el constituyente metalográfico más importante en los aceros. Es un constituyente metaestable obtenido a partir de la transformación de la austenita, para velocidades de enfriamiento por encima de la crítica. Es el más duro de los componentes de transformación de la austenita, dependiendo su dureza (y fragilidad) del porcentaje de carbono hasta 0.9%. La martensita vista al microscopio presenta una forma acicular.

La martensita después del temple es frágil y sin ductilidad y por tanto es necesario un subsecuente tratamiento térmico (revenido) para mejorar sus propiedades mecánicas.

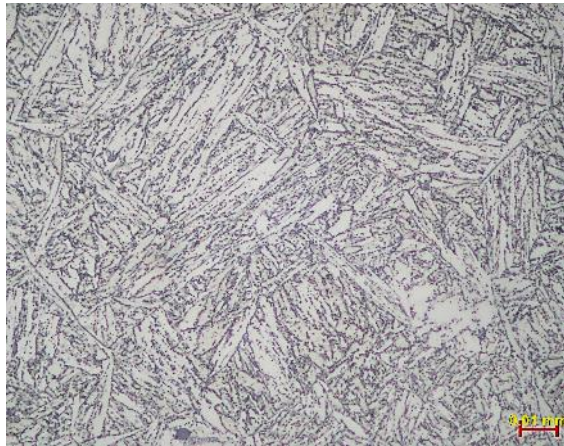


Figura 12. Agujas de Martensita en acero al carbono. Atlas de microestructuras, Cidesi.

### f) Bainita

Este producto de la descomposición de la austenita, consistiendo de un agregado de ferrita y Cementita, puede considerarse como una perlita muy fina. Esta estructura se forma en el rango de temperaturas entre los 540°C (1000°F) y la temperatura  $M_s$ . Debido a que las laminillas de carburo y ferrita son cada vez más finas, la dureza de la bainita es mayor que la de la perlita, aumentando entre más fina sea la bainita.

La microestructura de un acero se deduce de una observación del diagrama de equilibrio, y de un conocimiento de la transformación de la austenita. Así, se determina que un acero hipoeutectoide se compone de ferrita + perlita, un acero eutectoide únicamente de perlita y un acero hipereutectoide de perlita + cementita.

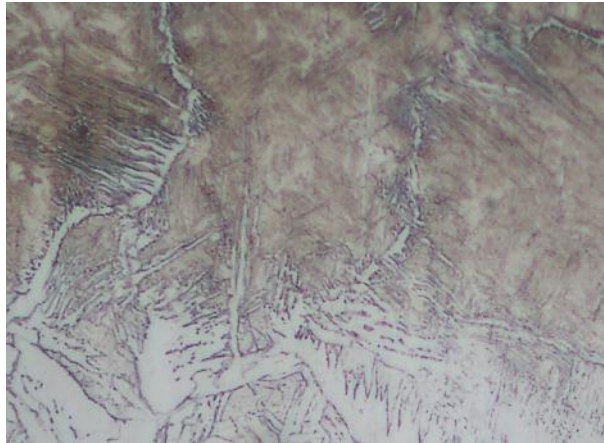


Figura 13. Fases de Bainita, formación Plumosa. Atlas de microestructuras, Cidesi.

## 2.10. EL TEMPLE.

Uno de los atributos del acero, el cual es con toda certeza el de mayor significado para los tratamientos térmicos es su capacidad para endurecerse. Este atributo tiene un doble significado, es importante no únicamente con relación a la obtención de un alto nivel de dureza o resistencia por tratamiento térmico, sino también con relación a la obtención de un alto grado de tenacidad por medio del tratamiento térmico, lograda a partir de una microestructura deseable, generalmente martensita revenida o bainita inferior. Debe entenderse con claridad que el endurecimiento (*hardenability*) se refiere al “ancho de endurecimiento” que se puede lograr bajo ciertas condiciones de enfriamiento bien establecidas, y no a la dureza máxima que se puede obtener en un acero dado. La máxima dureza depende totalmente del contenido de carbono, mientras que el endurecimiento depende de factores como:

El carbono, los elementos de aleación, y del tamaño de grano de la austenita.

Por lo antes mencionado, es claro que para obtener una microestructura martensítica con las propiedades deseables, el acero debe ser tratado térmicamente; el temple y el revenido son los tratamientos térmicos comúnmente utilizados para este fin y por ello representan el tratamiento térmico final utilizado ordinariamente para obtener las propiedades óptimas en materiales tratados térmicamente.

El templado involucra un calentamiento hasta la región de estabilidad de la austenita (temperatura de austenitización), mantener el material durante un cierto tiempo a esta temperatura de austenitización y después un enfriamiento continuo desde esta temperatura,

hasta por debajo de la temperatura de inicio de la formación de la martensita ( $M_s$ ), a una velocidad de enfriamiento tan grande (mayor que la crítica) que la transformación a perlita o bainita se inhibe y el producto de la transformación será la martensita. El propósito de este tratamiento es el de obtener, para cada composición de acero, la dureza máxima.

### 2.10.1 CALENTAMIENTO Y TEMPERATURA DE AUSTENITIZACIÓN.

El primer paso en el tratamiento térmico de temple, como en la mayoría de los tratamientos descritos anteriormente, es el calentamiento del material a una temperatura a la cual se forme la austenita; en general, la temperatura de austenitización real deberá ser tal, que todos los carburos se disuelvan y de esta manera se le saque ventaja al hecho de tener al carbono en solución sólida intersticial dentro de la austenita, para poder tener el efecto de endurecimiento. Hay que cuidar que la temperatura de austenitización no sea muy elevada ya que ello implicaría un crecimiento pronunciado del grano. Las piezas deberán mantenerse a la temperatura de austenitización el tiempo suficiente para que los carburos se disuelvan, pero cuidando que este tiempo no sea excesivo y pueda ocurrir un crecimiento del grano. Velocidades de calentamiento muy elevadas pueden crear esfuerzos muy altos, particularmente cuando están involucradas secciones de forma irregular, por lo que no es conveniente esto. La práctica común indica que es mejor calentar las piezas junto con el horno y no introducirlas cuando el horno ya esté a la temperatura de austenitización. Un tiempo de calentamiento de una hora por 25 milímetros (una hora por pulgada) de sección es lo que se emplea comúnmente, siendo esto una regla de seguridad. Sin embargo, en numerosos casos se pueden emplear velocidades de calentamiento mayores, en cuyo caso, la regla de seguridad en la práctica se deberá determinar en forma experimental. La velocidad de calentamiento se determinará con base en los siguientes factores:

- Masa del material que se va a calentar
- Velocidad a la que el material puede absorber el calor
- La temperatura a la que se desea calentar
- La temperatura y transferencia de calor características del medio de calentamiento

En general la velocidad de calentamiento será más rápida entre mayor sea la temperatura, y los tiempos variarán con el cuadrado del espesor o diámetro. Baños de sal o metal fundidos generalmente tienen coeficientes de transferencia de calor más altos y, por esto, calentarán más rápidamente que hornos en los cuales el calentamiento es en aire.



Debido a que la velocidad de calentamiento es una función de la diferencia de temperatura entre la pieza y el medio de calentamiento, se pueden obtener calentamientos rápidos utilizando medios de calentamiento a temperatura sobre la temperatura de austenitización deseada y retirando la pieza cuando alcance ésta última. La ventaja que proporciona este procedimiento tiene su mejor aplicación en hornos continuos, de gran aplicación en la práctica, en los que la temperatura se mantiene sobre la temperatura deseada y el paso de las piezas metálicas a través del horno se regula de manera que estas alcancen la temperatura deseada, en el extremo final del horno. Sin embargo, es importante tener presente que el control de la temperatura en estos tratamientos no es muy exacto.

Otros aspectos que se deben cuidar en el proceso de calentamiento, son la oxidación y la descarburización. Tanto el decapado (desincrustación de la capa de óxido) y la descarburización son indeseables, ya que en el caso del decapado, éste representa una pérdida de metal, estropea el acabado superficial y puede ser la causa de una pobre extracción de calor en el templado. Respecto a la descarburización, ésta trae como consecuencia una pérdida de dureza en la superficie del metal y puede afectar en forma muy seria la resistencia a la fatiga del acero. Estos procesos no se presentan juntos necesariamente. La cantidad de óxido que se forma está determinada principalmente por el tiempo y la temperatura de austenitización, por lo tanto, éstos deben ser tan bajos como sea posible a fin de minimizar la formación de esta capa. La formación de esta capa materialmente desaparece por la presencia de un 4 % o más de monóxido de carbono en la atmósfera del horno.

Es importante tener presente que para todo tratamiento térmico la seguridad en la práctica se basa en un calentamiento relativamente lento y uniforme hasta la temperatura de austenitización.

Las temperaturas de austenitización recomendadas previas al templado de aceros al carbono y de baja aleación y de aceros para cementación y aleados. Para la mayoría de las aplicaciones deben cuidarse aspectos como los siguientes:

La máxima temperatura alcanzada en toda la sección

La uniformidad de temperatura en la pieza

El tiempo de permanencia a la temperatura de austenización.

### 2.10.2 MEDIOS DE TEMPLE.

La efectividad del temple depende de las características del medio de temple, así como de la habilidad del acero para endurecerse. Por lo tanto, los resultados pueden variar cambiando la composición del acero o la agitación, temperatura y medio de temple.

Cuando se temple una pieza en un determinado medio de temple, la velocidad de enfriamiento depende principalmente de los siguientes factores:

- El calor específico y el poder de conducción de calor del acero
- La masa, forma y estado superficial de la pieza
- El llamado “poder de enfriamiento” del medio del temple
- Temperatura del medio de temple

El calor específico y la conductividad calorífica de los diferentes tipos de aceros no muestran una gran diferencia entre sí y nunca pueden acomodarse al tipo de tratamiento a efectuar. La masa, la forma y el acabado superficial de la pieza, en general, se determinan por características de diseño y no del futuro tratamiento térmico.

De lo antes expuesto se puede deducir que el parámetro principal que determina la velocidad de enfriamiento del acero, será el “poder de enfriamiento” del medio de temple. Este poder de enfriamiento para un medio de temple depende de factores como:

- Calor específico
- Conductividad calorífica
- Viscosidad
- Calor de evaporación o de disociación
- Formación de capas gaseosas aislantes.

### 2.10.3 MECANISMOS DE ENFRIAMIENTO DURANTE EL TEMPLE.

La primera etapa de enfriamiento, denominada etapa A, se caracteriza por una capa de vapor de enfriamiento alrededor de la pieza, también llamada etapa de enfriamiento de la capa de vapor, se caracteriza por el fenómeno de *Leidenfrost*, es decir, la formación de una capa de vapor uniforme alrededor de la pieza de prueba. La manta de vapor se desarrolla y se mantiene mientras el suministro de calor desde el interior de la pieza a la superficie excede la cantidad de calor necesaria para evaporar el enfriador y mantener la fase de vapor. Se produce un enfriamiento relativamente lento durante este período porque la envoltura de vapor actúa como

aislante, y el enfriamiento se produce principalmente por radiación a través de la película de vapor. La temperatura por encima de la cual se mantiene una capa de vapor total se denomina temperatura característica del líquido.

Etapa B. Las velocidades de enfriamiento más altas ocurren en esta etapa; la etapa de ebullición nucleada. Durante este período, la envoltura de vapor colapsa y se logran altas tasas de extracción de calor que están asociadas con la ebullición nucleada del extintor en la superficie del metal. El calor se elimina rápidamente de la superficie a medida que el extintor líquido entra en contacto con la superficie del metal y se vaporiza.

La etapa C se denomina etapa de enfriamiento líquido, comienza cuando la temperatura de la superficie del metal se reduce por debajo del punto de ebullición del líquido de enfriamiento. Por debajo de esta temperatura, la ebullición se detiene y el enfriamiento tiene lugar por conducción y convección en el fluido de temple. En la Figura 14 se pueden apreciar las etapas descritas del proceso de temple.

#### IMPORTANCIA DE LA AGITACION.

La agitación se refiere al movimiento del fluido de temple en relación con la pieza. La agitación generalmente se obtiene provocando movimiento en el líquido, pero en algunos casos se obtiene moviendo la pieza en el líquido. Tiene una influencia extremadamente importante en la transferencia de calor, provoca una interrupción mecánica de la capa de vapor en la etapa A y una transición más rápida al enfriamiento de la etapa B.

El aumento de la agitación generalmente produce un tiempo de enfriamiento de la etapa A más corto y velocidades de enfriamiento más rápidas en las tres regiones. Por el contrario, las temperaturas más altas del baño de enfriamiento suelen producir tiempos de enfriamiento de la etapa A más largos y velocidades de enfriamiento más lentas en las regiones de las etapas B y C, como se puede apreciar en la figura 14. Sin embargo, temperaturas moderadamente más altas en los baños de enfriamiento del aceite pueden mejorar las características de eliminación de calor al reducir la viscosidad del aceite. Puede obtenerse una mejora en las características de humectación del aceite de enfriamiento con el aumento de la temperatura del baño, lo que da como resultado velocidades de enfriamiento más altas. Por lo tanto, el rendimiento de enfriamiento de muchos aceites de enfriamiento a menudo es independiente de variaciones modestas en la temperatura del baño. Puede producirse un

temple no uniforme si no se agita debido a los puntos calientes localizados que resultan de la eliminación desigual del calor de la superficie metálica. Esto puede dar lugar a una dureza irregular, un mayor agrietamiento de la superficie, distorsión y mayores tensiones residuales.

La estructura, dureza y resistencia resultantes del tratamiento térmico de temple, están determinadas por la velocidad de enfriamiento durante el proceso. Si la velocidad de enfriamiento es mayor que la crítica, se obtendrá una microestructura completamente martensítica, y si la velocidad es menor la microestructura formada puede ser bainita o perlita fina. La dureza en ambos casos será distinta, en el primer caso el acero endurece totalmente, mientras que en el segundo caso no endurece totalmente. De aquí que sea necesario conocer los mecanismos de extracción de calor durante el templado.

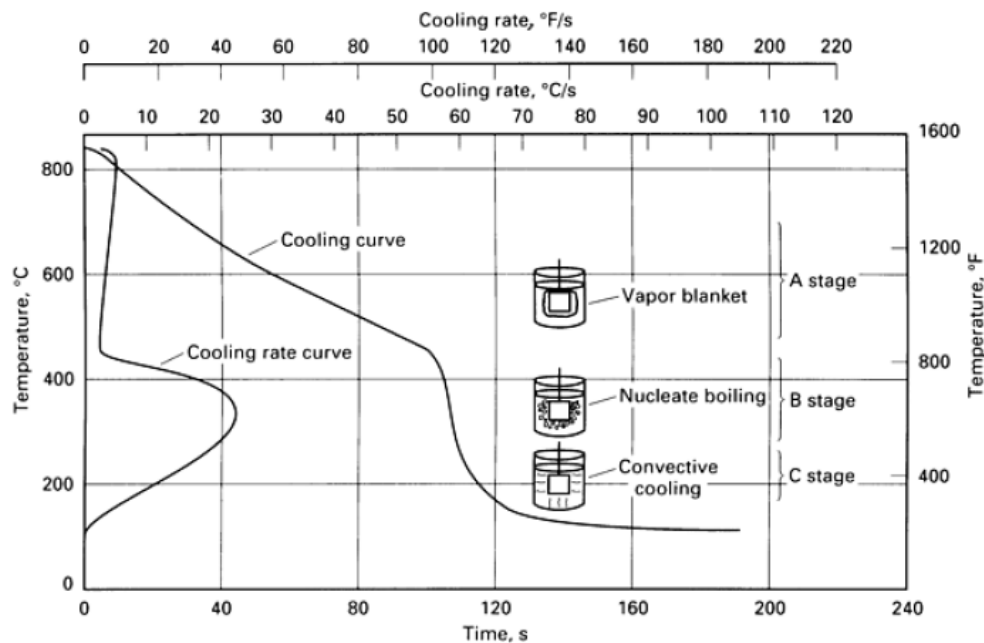


Figura 14. Curva de enfriamiento en el Temple, Etapas de enfriamiento. *ASM Handbook, Heat treatment.*

#### 2.10.4 LA TEMPERATURA DEL MEDIO DE TEMPLE.

La temperatura del líquido afecta marcadamente su habilidad para extraer calor. Generalmente, conforme aumenta la temperatura del medio de temple, la velocidad de enfriamiento disminuye lo cual se debe a un aumento en el tiempo de duración de la etapa A.

Como el medio está más cercano a su punto de ebullición, se necesita menos calor para formar la capa de vapor. La figura 7 muestra dos curvas de enfriamiento para muestras templadas en agua a 24°C y 52°C sin agitación; como se puede ver, el temple en agua a 24°C requiere de menos tiempo para enfriar la muestra, siendo cada vez mayor la diferencia para temperaturas bajas. Muestra las velocidades de enfriamiento para probetas de acero inoxidable, en distintos medios de temple y para dos temperaturas seleccionadas (705°C y 650°C). Los baños de temple se mantuvieron a 24°C y 52°C. En el caso del aceite hay dos factores a considerar. Conforme aumenta la temperatura del aceite hay una tendencia a que la velocidad de enfriamiento disminuya debido a que sigue estando presente la capa de vapor; sin embargo, conforme aumenta la temperatura del aceite, este se hace más fluido, lo que trae como consecuencia un aumento en la rapidez de conducción de calor a través del líquido. Estos dos factores determinan la velocidad de enfriamiento, por lo tanto, si existe un incremento en la conducción de calor mayor que el decremento debido a la presencia de la película de vapor, el resultado neto será un aumento en la velocidad de enfriamiento como en el caso del Gulf Super-Quench. Si lo contrario es cierto, entonces el resultado neto será un decremento de la velocidad de enfriamiento, como lo muestran los datos de la tabla 2.11.4 para aceites solubles y aceite lento. Las velocidades de enfriamiento óptimas en aceites para templados convencionales, se obtiene para temperaturas entre 50°C y 65 °C.

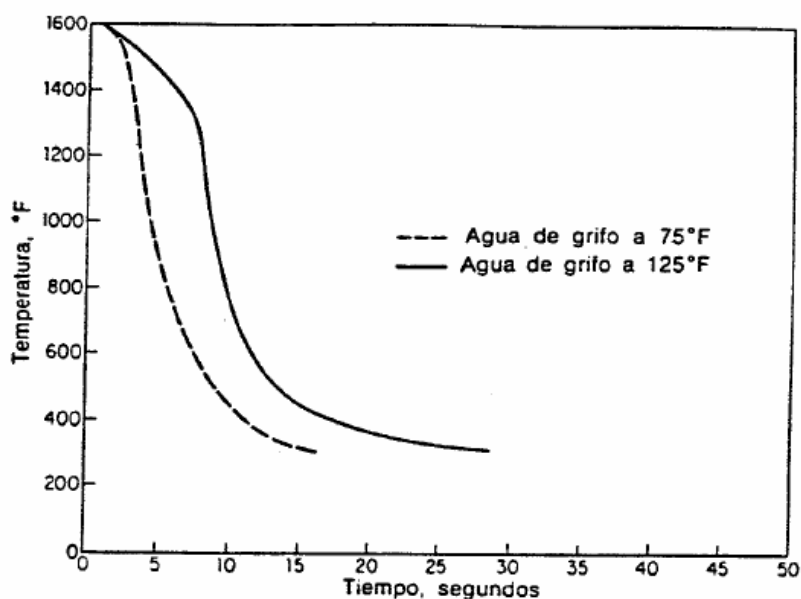


Figura 15. Curvas de enfriamiento en muestras templadas. Tratamientos térmicos del Acero, Unam.

<i>MEDIO DE TEMPLE</i>	<i>VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO A</i> 705° C / s		<i>VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO A</i> 650° C / s	
	<i>24° C</i>	<i>52° C</i>	<i>24° C</i>	<i>52° C</i>
	<b>Salmuera al 10%</b>	214	166	214
<b>Agua</b>	118	26	125	65.5
<b>Gulf Super-Quench</b>	45	48	95	101
<b>Aceite lento</b>	20	18	17	14.6
<b>10% Aceite soluble, 90% Agua</b>	20	17	20	17
<b>Aire inmóvil</b>	03	...	2.0	...
<b>Sal fundida (a 220° C)</b>	91		73	

Tabla 2. Velocidades de enfriamiento en el centro de una probeta de acero inoxidable de ½ Pulgada de diámetro por 2 ½ pulgadas de largo, cuando se templen desde 816° C en varios medios de temple. Temple del Acero, Unam

Para prevenir un aumento en la temperatura en el medio durante el temple es necesario proporcionar suficiente volumen del medio de temple.

#### 2.10.5 SEVERIDAD DE TEMPLADO.

La habilidad de un medio de temple para extraer calor de una pieza caliente se puede expresar en términos del valor para la “severidad de templado”, denotado por la letra “H”. Como valor patrón se utiliza  $H = 1.0$  para el agua sin agitación y a partir de éste se asignan valores de H para aceite, agua y salmuera, los cuales se tabulan en la tabla 3. El coeficiente H tiene unidades de  $\text{mm}^{-1}$  o  $\text{pulg}^{-1}$ .

<i>Agitación</i>	<i>Aceite</i>		<i>Agua</i>		<i>Salmuera</i>	
	<i>mm<sup>-1</sup></i>	<i>pulg<sup>-1</sup></i>	<i>mm<sup>-1</sup></i>	<i>pulg<sup>-1</sup></i>	<i>mm<sup>-1</sup></i>	<i>pulg<sup>-1</sup></i>
<i>Ninguna</i>	0.0098 0.0118	0.25 - 0.30	0.0354 0.0394	0.9 - 1.0	0.0787	2
<i>Suave</i>	0.0110 0.0138	0.30 - 0.35	0.0394 0.0433	1.0 - 1.1	0.0787 0.0866	2.0 - 2.2
<i>Moderada</i>	0.0138 0.0157	0.35 - 0.40	0.0472 0.0512	1.2 - 1.3		
<i>Buena</i>	0.0157 0.0197	0.40 - 0.5	0.0551 0.0591	1.4 - 1.5		
<i>Fuerte</i>	0.0197 0.0315	0.5 - 0.80	0.0630 0.0787	1.6 - 2.0		
<i>Violenta</i>	0.0315 0.0433	0.80 - 1.1	0.1575	4.0	0.1969	5.0

Tabla 3. Valores típicos del coeficiente H designando la severidad de templeado (Valor H). Temple del Acero, Unam.

#### 2.10.6. ELECCIÓN DEL MEDIO DE TEMPLE.

Para obtener en el temple de los aceros mejores resultados, conviene utilizar el método de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica. De esta forma se consigue una estructura totalmente martensítica, la máxima dureza de acuerdo a su composición y se evita en lo posible las grietas y deformaciones. En piezas enfriadas rápidamente siempre existe el peligro (independientemente de la composición del acero) de que se creen tensiones, debido a un enfriamiento desigual dentro de la pieza, esto es, mientras la periferia se enfría rápidamente, el corazón de ésta se encuentra todavía a una temperatura elevada. En piezas enfriadas lentamente la temperatura es más uniforme en toda la masa y por lo tanto son menos frecuentes las grietas y deformaciones. La gran diversidad de aceros que existen en la actualidad, crea dudas sobre el medio de enfriamiento más adecuado, para solventar esta

situación es necesario guiarse por las recomendaciones de las acerías, de las sociedades metalúrgicas o por el análisis y dimensiones de la pieza. Las velocidades críticas de temple varían bastante de un acero a otro; por ejemplo, los aceros al carbono exigen las mayores velocidades de enfriamiento, las cuales son, aproximadamente, de 350°C/s para 0.5 % C, 200° C/s para 0.8 % C. En cambio, los aceros especiales tienen velocidades de temple menores, así por ejemplo, la velocidad crítica para un acero para brocas de bajo contenido de tungsteno, es de 35°C/s, aproximadamente.

En general deben seguirse las siguientes reglas de templado:

1. Aceros al carbono (independientemente de su composición) en piezas de más de 5 mm de espesor y aceros de baja aleación en espesores superiores a 25 mm, deben templarse en agua, debiendo tener ésta una temperatura entre 15° y 20° C, no debiendo sobrepasar los 30°C.
2. Para los aceros antes citados, en perfiles inferiores a 5 o 10 mm aproximadamente y todos los aceros de alta aleación, el temple debe realizarse en aceite, estando éste entre 30°C y 60°C se obtienen los mejores resultados.
3. Los aceros de muy alta aleación se templan al aire. Aunque el fabricante suele señalar en sus catálogos o tablas el medio de enfriamiento que debe emplearse para el temple de cada acero, conviene tener presente que existen excepciones a las normas generales; por ejemplo, aunque un acero al carbono de 1.10% debe dársele un temple en agua, cuando hay que templar una herramienta de menos de 3 mm de espesor, conviene enfriarla en aceite, ya que de esta forma desaparece el peligro de la formación de grietas que puede presentarse en el templado en agua y además, se alcanza la dureza deseada. Por el contrario, un acero cromo - vanadio con 1 % C, 1.5 %Cr y 0.20 %V, que es de temple en aceite, se templará en agua cuando se utilice para herramientas de 100 g y 200 mm de espesor, que deban quedar con una dureza superior a 60 HRC.

#### 2.10.7 COMPARACIÓN DE LOS MEDIOS DE TEMPLE.

A continuación se analizarán los medios de temple más usados en el tratamiento térmico de temple en los aceros:



#### 2.10.7.1 AGUA.

El agua y las soluciones a base de agua son los medios de temple menos caro y de uso siempre y cuando la pieza a templar no sufra distorsiones excesivas o se agriete durante el temple. Como medio de temple, el agua simple se aproxima a la máxima velocidad de enfriamiento que es posible obtener en un líquido. Otra ventaja es que se puede usar sin problemas de contaminación o daño a la salud, y es un medio efectivo para romper las escamas de óxido de la superficie de piezas que se templan desde hornos que no utilizan atmósfera protectora. Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple, conviene que la temperatura del agua oscile entre 15° y 20° C, pues si la temperatura es superior a 30° C, se prolonga exageradamente la etapa "A" de enfriamiento, lo que constituye un gran inconveniente, ya que disminuye la velocidad de enfriamiento en la zona de los 750° C a los 500° C, favoreciéndose la formación de estructuras blandas, sobre todo en aceros de baja templabilidad. Además, la prolongación de la etapa "A", que varía con la complejidad de la pieza, favorece la retención del vapor dando como resultado una dureza mal distribuida y una distribución de esfuerzos desfavorable, lo que puede ocasionar distorsiones y agrietamiento.

#### 2.10.7.2 SALMUERA.

El término salmuera aplicado al temple se refiere a la solución acuosa conteniendo ciertos porcentajes de sal (cloruro de sodio o cloruro de calcio), junto con aditivos especiales e inhibidores de la corrosión. La salmuera ofrece las siguientes ventajas sobre el agua simple o sobre los aceites, para el templado:

- 1) La velocidad de enfriamiento es mayor que la del agua para una misma agitación.
- 2) La temperatura es menos crítica que para el agua, requiriendo, por lo tanto, de menor control.
- 3) La aparición de manchas suaves debido a bolsas de vapor es mucho menor que en el temple en agua.
- 4) La distorsión es menos severa que en el temple en agua.
- 5) Los cambiadores de calor son menos usados para el enfriamiento de baños de salmuera de lo que son empleados para el temple en agua o aceite.

Algunas de las desventajas que presenta la salmuera son:

- 1) La naturaleza corrosiva de la salmuera requiere que, para tener una vida razonable, el equipo de temple se proteja de la corrosión mediante un recubrimiento.

- 2) Se requiere de equipo de extracción de los vapores corrosivos que emanan de los baños de salmuera.
- 3) El costo aumenta debido a los inhibidores y aditivos que deben utilizarse.
- 4) El costo también aumenta debido a la necesidad de llevar a cabo pruebas para el control de la solución.

### 2.10.7.3 ACEITE.

Los mejores aceites para el temple son los aceites minerales. Un buen aceite debe poseer las siguientes propiedades:

1. Su viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites, de manera que no sea muy viscoso ni que tenga baja viscosidad. En el primer caso tiende a carbonizarse y en el segundo a volatilizarse.
2. La volatilidad no debe ser demasiado elevada porque se pierde aceite con el uso y se espesa el baño, con la consiguiente pérdida en la velocidad de enfriamiento, además de que al ponerse en contacto con el metal caliente, desprende numerosas burbujas y se forma mucho vapor alrededor de las piezas, prolongándose la fase "A"
3. La temperatura de inflamación y combustión deben ser lo más elevadas posible, para evitar exceso de humo en el taller y también el peligro de que se inflame el baño. Lo anterior tiene como consecuencia que los aceites se utilicen con mayor amplitud, en aquellos casos en los cuales se desea templar piezas de forma complicada o en el que se desea el mínimo de distorsión.

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1 NANOTECNOLOGÍA.**

El término nanotecnología (creado por el investigador japonés Norio Taniguchi en 1974 y popularizado por Eric Drexler en la década de 1980) ha sufrido muchas adaptaciones de acuerdo con los campos de aplicación que fueron surgiendo a lo largo del tiempo. Así, la nanotecnología puede ser entendida como la construcción de dispositivos y la fabricación de materiales funcionales mediante el control de la materia en la escala de los nanómetros. De esa manera, y cada vez más lejos de las leyes de la física clásica y más cerca de la física del estado sólido, son esperados nuevos fenómenos e nuevas propiedades de la materia.

En el campo de la producción de materiales, la obtención de partículas de dimensiones en el rango de 1 a 100 nanómetros, ha permitido un mejor comportamiento de las propiedades inherentes de algunos materiales convencionales.

Una forma convencional para incrementar la disipación de calor es aumentar el área disponible para la transferencia de calor con el fluido de trabajo. Sin embargo, un inconveniente de este tipo de abordaje es que, junto con el tamaño del sistema, se complica la gestión de energía del mismo. Surge así la necesidad de mejorar las propiedades de transferencia de calor de los fluidos de trabajo empleados u optar por la producción de nuevos compuestos para tales fines. De la conjunción de ambos factores, y con base en estudios pasados sobre medios heterogéneos, fue previsto el uso de nanopartículas en fluidos refrigerantes convencionales.

#### **3.2 NANOFLUIDO.**

Son denominados nanofluidos aquellos materiales compuestos por nanopartículas o nanofibras en una suspensión como lo podría ser agua (Choi et al, 1995), en orden de 1 a 100 nanómetros. Es importante destacar que estos fluidos poseen propiedades térmicas muy bajas en comparación con las de otros materiales como metales. Innumerables investigaciones experimentales han demostrado la intensificación anómala de las propiedades de los nanofluidos, principalmente la conductividad térmica. Tales nanofluidos presentan algunas ventajas en relación con aquellas suspensiones que usaban partículas de mayores dimensiones (tamaños micro y milimétrico); entre ellas: (1) mayor estabilidad, (2) menor impacto abrasivo y (3) mayor facilidad para fluir en microcanales, con menor riesgo de

aglomeración. Estas ventajas aumentaron el interés por el estudio de estos compuestos en los últimos años.

El estudio de los aceros es importante debido a que estos representan por mucho los materiales metálicos ampliamente usados, primeramente por el hecho de que pueden ser manufacturados en especificaciones muy precisas, a un costo relativamente bajo, también proporcionan un rango extenso de propiedades mecánicas, desde niveles de resistencia moderada con excelente ductilidad y tenacidad hasta muy altas resistencias con una ductilidad adecuada. Por esto, no debe de sorprender que los hierros y los aceros comprenden hoy en día sobre el 80 % en peso de las aleaciones de uso industrial.

Al desear mejores propiedades mecánicas de los aceros, se recurre a un tratamiento térmico, definiéndolo como: “una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas” (*Metals Handbook*, 2009). Los tratamientos térmicos del acero se basan en la aplicación de las transformaciones estructurales que experimenta el acero y de los procesos de recristalización y de difusión. Existen diversos tipos de tratamientos térmicos, temple, normalizado, revenido, austemperizado, etc., son utilizados para el acero dependiendo del uso que tendrá el acero.

El temple de acero es un proceso termoquímico que mejora las propiedades mecánicas de este material, el acero se somete a temperaturas por encima de 900 °C, posteriormente es llevado a un enfriamiento brusco en un agua o aceite.

Para obtener en el temple de los aceros mejores resultados, conviene utilizar el método de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica. De esta forma se consigue una estructura totalmente martensítica, la máxima dureza de acuerdo a su composición y se evita en lo posible las grietas y deformaciones. En piezas enfriadas rápidamente siempre existe el peligro (independientemente de la composición del acero) de que se creen tensiones, debido a un enfriamiento desigual dentro de la pieza, esto es, mientras la periferia se enfría rápidamente, el corazón de ésta se encuentra todavía a una temperatura elevada. En piezas enfriadas lentamente la temperatura es más uniforme en toda la masa y por lo tanto son menos frecuentes las grietas y deformaciones.

En procesos actuales de tratamientos termoquímicos es comúnmente utilizado el aceite como medio de temple, este debe recircularse para mantener las propiedades apropiadas para el proceso de temple, si este permaneciera estático, se formarían capas en la superficie de

diferente conductividad térmica. Las bombas encargadas de mover al aceite, son propelas impulsadas por energía eléctrica, mantener en movimiento a estas durante 24hrs. Es un costo fijo para la organización encargada del proceso, otro punto a considerar dentro de este medio de temple, es la sanidad del aceite, después de ciertos ciclos de trabajo, el aceite pierde propiedades, la principal es la conductividad térmica, es la cualidad de la solución de temple que le permite al acero obtener un enfriamiento rápido, por lo que se necesitan varios componentes para mantener en constante movimiento al aceite, se propone la reducción de costos, a partir de la utilización de una solución de propiedades similares al del aceite, dicho fluido se constituye por partículas de dimensiones nanométricas en una solución acuosa o base aceite.

### 3.3 NANOFLUIDOS CON ALÚMINA.

Beck et al [Beck M., Sun T. & Teja A. (2007). *The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethyleneglycol .Fluid Phase Equilib.*] Preparó una mezcla ultrasónica de  $Al_2O_3$  / etilenglicol durante varios minutos para obtener una dispersión uniforme. Informaron que las dispersiones resultantes permanecieron uniformes durante la duración de los experimentos debido a las cargas superficiales de las partículas. Hung et al [Hung Y.H., Teng T.P. & Lin B. G. (2013). *Evaluation of the thermal performance of heat pipe using alumina nanofluids. Exp Therm Fluid Sci.*] Produjo un nanofluido base agua con  $Al_2O_3$  usando un homogeneizador operando a 8000 rpm durante 30 min, un agitador electromagnético funcionando a 600 rpm durante 90 min, y un vibrador ultra-sónico operando a 400 W durante 60 min. El líquido base se preparó agregando un 0,2% en peso de quitosano en agua como un dispersante catiónico en agua destilada. Confirmaron que la diferencia entre las concentraciones iniciales y finales (después de 2 semanas) de nanofluido de  $Al_2O_3$  en agua era inferior al 5%, lo que indica la estabilidad de los nanofluidos preparados. Cantah et al [Singh P., Harikrishna P., Sundararajan T. & Kumar D.(2012). *Experimental and numerical investigation in to the hydrodynamics of nanofluids in microchannels. Exp Therm Fluid Sci.*]. Experimento que las nanopartículas de  $Al_2O_3$  de dos tamaños dispersos producidas por técnicas de condensación de vapor en etilenglicol y agua. Los nanofluidos base agua con alúmina se estabilizaron mediante un método electrostático; se mezclaron unas gotas de ácido clorhídrico para mantener el valor de pH y el potencial zeta. El valor de pH se fijó en 4 y el potencial zeta de estos nanofluidos era de 58,7mV. Concluyeron que un pH de 3,5-5,0 era capaz de mantener

los nanofluidos son estables durante mucho tiempo. En el caso de los nanofluidos a base de etilenglicol, no se añadió nada y se descubrió que solo la Sonificación es suficiente para obtener una suspensión estable. Esmailzadeh et al. [*Esmailzadeh E.A., Nasiri V. & Omrani A. (2013). Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water under laminar flow in side a horizontal tube. Int J Therm Sci*] prepararon nanofluidos base agua de alúmina estabilizada a través de un proceso de 4 h de Sonificación con 170 W-50 Hz y agitación electromagnética, no se observó sedimentación durante el período de prueba.

Ramesh et al [*Ramesh G. & Narayan K. (2012). Effect of Addition of Aluminum Nanoparticles on Cooling Performance and Quench Severity of Water during Immersion Quenching. ASTM International Journal*]. Experimento que el tamaño de las nanopartículas de aluminio medido es de aproximadamente 85nm. Se empleó un método de dos pasos para preparar los nanofluidos, es decir, se generaron partículas y luego se dispersaron en el fluido. Se dispersó una cantidad muy pequeña de nanopartículas de aluminio en agua destilada mediante un método de agitación magnética (agitado a 500 rpm durante 10hr a temperatura ambiente). Los nanofluidos tenían una concentración de nanopartículas que variaba de 0,001 a 0,5 vol. % y se utilizaron como medio de enfriamiento para los experimentos de temple. La probeta de temple se preparó a partir de INCONEL 600, con las siguientes medidas 12,5 mm de diámetro y 60 mm de longitud. Se insertó un termopar de tipo K calibrado en un orificio de 1 mm perforado en el centro geométrico de la probeta de temple. El otro extremo del termopar se conectó a un sistema de adquisición de datos de temperatura (NI PXI / PCI-4351). La probeta se acondicionó, calentándola y enfriándola en aceite de enfriamiento varias veces para obtener resultados reproducibles.

La probeta es sometida a 850° C en un horno de resistencia eléctrica tubular vertical abierto en ambos extremos y luego se transfirió rápidamente a un vaso de precipitados que contenía 2000 ml de nanofluido preparado colocado directamente debajo del horno. Se insertó otro termopar en el interior del nanofluido para controlar la temperatura de este. Los datos almacenados de tiempo-temperatura se utilizaron para trazar curvas de la velocidad de enfriamiento frente a la temperatura. A partir de las curvas de enfriamiento, el efecto de la adición de nanopartículas de aluminio sobre los parámetros críticos de la curva de enfriamiento, la tasa de enfriamiento a 700° C, la tasa de enfriamiento máxima (CR<sub>max</sub>), la temperatura de la tasa de enfriamiento máxima (TCR<sub>max</sub>), la tasa de enfriamiento a 300° C

(CR300), se determinaron el tiempo de enfriamiento a 300° C ( $t_{300}$ ), la velocidad de enfriamiento a 200 C (CR200) y el tiempo de enfriamiento a 200° C ( $t_{200}$ ). Estos parámetros son útiles para controlar el proceso de tratamiento térmico de enfriamiento.

La variación de las velocidades de enfriamiento a la temperatura máxima, 700° C, 300° C y 200° C y la temperatura a la velocidad máxima de enfriamiento fueron solo 2.5 °C / s, 0.05° C / s, 1° C / s y 0,4° C / s y 7° C, respectivamente. Los experimentos confirman que la probeta de temple no se vio afectada significativamente después de que se llevó a cabo el tratamiento térmico. La velocidad de enfriamiento a 700° C para el agua (170° C / s) aumentó a 216° C / s (un aumento de aproximadamente 27%) al aumentar la concentración de nanopartículas hasta 0.05 vol. %, lo que es deseable para evitar la transformación de la perlita del acero. De manera similar, también aumentaron las velocidades de enfriamiento a 300° C y 200° C, la región de temperatura a la que ocurre la transformación de martensita de la mayoría de los aceros al carbono y de baja aleación. Generalmente, son deseables velocidades de enfriamiento más bajas a estas temperaturas para minimizar el agrietamiento y la distorsión. Esta no es necesariamente una condición suficiente para la reducción del agrietamiento por enfriamiento rápido. Por el contrario, la velocidad de enfriamiento a 700° C y la velocidad máxima de enfriamiento del agua disminuyeron con un aumento en la concentración de nanopartículas de 0.05 a 0.5 vol. %. La adición de nanopartículas altera las propiedades termofísicas de los fluidos base. Los posibles mecanismos de mejora de la conductividad térmica / transferencia de calor en nanofluidos son el movimiento browniano de las nanopartículas, las capas de líquido alrededor de las nanopartículas, la naturaleza del transporte de calor en las nanopartículas y la agrupación de nanopartículas. El aumento de la conductividad térmica del agua con la adición de nanopartículas de aluminio da como resultado un aumento en el rendimiento de enfriamiento del agua hasta una concentración de 0,1 vol. %; con un aumento adicional en la concentración de nanopartículas, aunque la conductividad térmica del agua aumenta, el aumento de la viscosidad del agua da como resultado una disminución del rendimiento de enfriamiento del medio.

Vasheghani et al. [Mohammadhassan V., Ehsan M., Cyrus Z., Mohamed A. & Babak R. (2011). *Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases on the enhancement of thermal conductivity and viscosity of nanofluids in engine oil. Heat Mass Transfer*]. Experimento con aceite de motor, la preparación de nanofluidos. Para ello, se añadieron nanopartículas al aceite de motor con el fin obtener concentraciones de 0,1, 0,25, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 y 3% en peso. Se agitaron con a 100 ° C

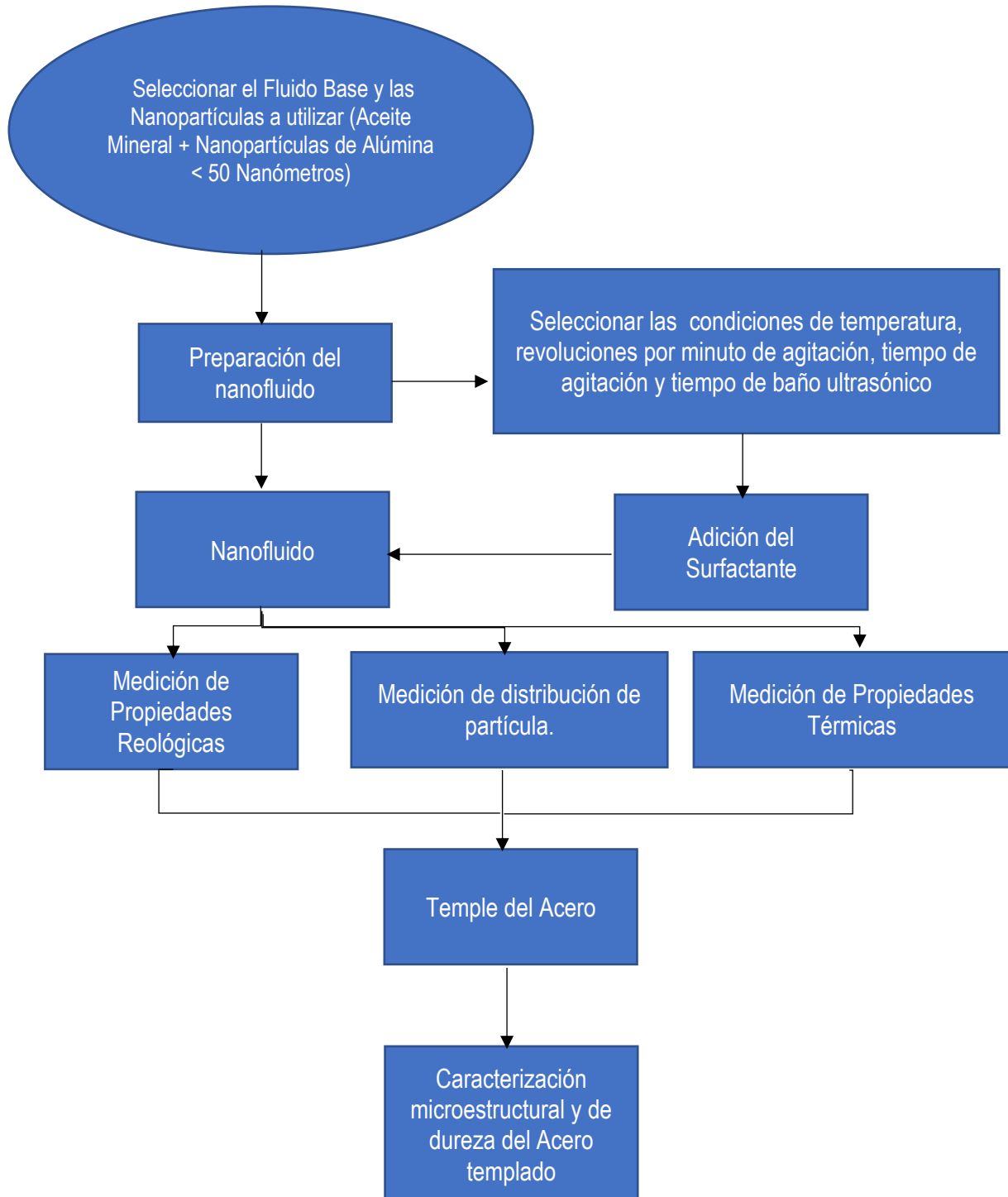
durante 30 min. Después de este proceso, los nanofluidos se sometieron a ultrasonido, durante 30 min para dispersar las partículas dentro del fluido. Este método de preparación hizo que los nanofluidos fueran estables durante al menos 1 semana sin riesgo de sedimentación; por tanto, no se necesitó ningún tenso activo (surfactante) para la estabilización. Revela que se logra una mejora de hasta 37.49 y 31.47% en la conductividad térmica para fluidos con  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , respectivamente. Esta mejora en la conductividad térmica se origina por la gran diferencia entre la conductividad de la alúmina y el medio líquido, siendo 35 ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) y 0.145 ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), respectivamente. La diferencia se puede atribuir a una mayor superficie específica de  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  con respecto a  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  tiene una estructura porosa que da como resultado un área superficial más alta en comparación con el  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  del mismo tamaño de partícula. Añadiendo 0,1% en peso de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la conductividad térmica de los nanofluidos aumenta un 3-5%, respectivamente. Esta mejora es muy prometedora teniendo en cuenta que a concentraciones tan bajas, el fluido posee un alto nivel de estabilidad.

El área superficial de  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  es casi 4 veces mayor que la de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y su densidad es mucho menor que la de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , son similares en tamaño de partícula, ambos alrededor de 20nm, así que la diferencia en las conductividades de los fluidos que contienen  $\alpha$ - y  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  se puede atribuir a la estructura de estos materiales sólidos y su estructura porosa facilitando diferentes medios de transporte de calor en el sistema. Las mediciones de viscosidad se realizaron en el rango de temperatura de 25-75°C para nanofluidos que contienen  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  al 3% en peso, ambos nanofluidos presentan viscosidades más altas en comparación con el aceite mismo. Esta tendencia, sin embargo, disminuye a temperaturas más altas donde la viscosidad es la misma para todos los fluidos considerados. Vale la pena señalar que, dado que los sistemas de intercambio de calor generalmente funcionan a temperaturas elevadas, esta similitud en las viscosidades puede considerarse un punto positivo para los nanofluidos, ya que no se necesita un diseño específico. La variación del esfuerzo cortante frente a la velocidad de corte de los nanofluidos con 3% en peso de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Obviamente, se observa un comportamiento lineal lo que significa que los fluidos en estudio son de carácter newtoniano. Por lo que se puede concluir que al agregar nanopartículas de alúmina al aceite del motor, su comportamiento de viscosidad no cambiaría.



## 4. METODOLOGÍA

Las actividades a realizar en este trabajo se presentan a continuación en el diagrama de flujo que a continuación se muestra:



#### 4.1 FLUIDO BASE.

El fluido base utilizara un aceite mineral, Equiquench 770, aceite de temple rápido y convencional, fluido comercial por lo que se tiene la seguridad de efectividad en tratamiento térmico de piezas metálicas para la industria en general. Se utiliza 250ml aproximadamente de este fluido, peso 201gr, esta medición se realiza en una balanza analítica. La figura 16 muestra el aceite base utilizado para el experimento, nótese la opacidad del fluido, por lo que al agregar algún compuesto sólido puede no notarse.



Figura 16. Fluido base, pesado en vaso precipitado. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

#### 4.2 NANOPARTÍCULAS.

Se utilizan nanopartículas de Alúmina ( $Al_3O_2$ ) con un diámetro menor a 50 nanómetros de la marca Sigma-Aldrich. En la figura 17, se pueden ver depositadas en una caja Petri para su peso, se alcanzan a apreciar algunos aglomerados, una vez que se preparan en el nanofluido se someten a un proceso de sonicación para romper esos aglomerados.

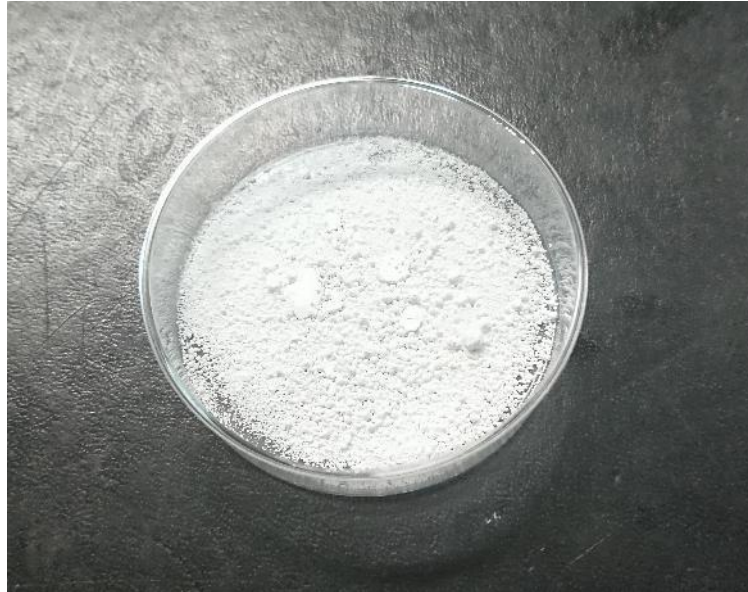


Figura 17. Nanopartículas de Alúmina <50nm. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

Una vez que se pesan el fluido base y las nanopartículas por separado, se mezclan mecánicamente. El primer paso es agitación mecánica, en un plato caliente, como se puede apreciar en la figura 18, se coloca el aceite o fluido base, la temperatura de operación se sitúa en 60°C, este será un parámetro para todas las composiciones de nanofluido, ya que, este valor es acorde a la temperatura a la cual se realiza el temple del acero industrialmente, la velocidad de agitación es una de las variables que se varían en el diseño experimental así como el tiempo de permanencia en fase de agitación mecánica.



Figura 18. Plato caliente para agitado mecánico del nanofluido. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

El segundo paso es la Sonificación del Nanofluido, inmediatamente después de la agitación mecánica, en este proceso, el nanofluido se somete a ondas de ultrasonido, lo cual promueve la dispersión de las nanopartículas, logrando una dispersión homogénea del nanofluido. Se utiliza una tina de baño ultrasónico, la frecuencia ultrasónica es fija en un valor de 40Khz con dos bobinas de estas características. El tiempo de ultrasonido será también una variable a modificar en este trabajo.



Figura 19. Tina de ultrasonido, Sonificación del nanofluido. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

### 4.3 PRUEBAS REOLÓGICAS.

La medición de la viscosidad del nanofluido, es parte de la caracterización de este. Dicha prueba se realiza en el Reómetro equipo modelo DV-III Ultra marca Brookfield, figura 20, las pruebas de viscosidad se llevaron a cabo a una temperatura de 60°C, temperatura de proceso de temple al cual se somete la probeta de acero.



Figura 20. Reómetro Brookfield, medición de la viscosidad del Nanofluido. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

### 4.4 DIFUSIVIDAD TÉRMICA.

El nanofluido se coloca en la celda piroeléctrica, el láser incide sobre una placa de cobre, dicho calor se transmite a la muestra. La señal proveniente se registra en amplitud y fases. La ecuación (4.4.1) presenta la expresión para calcular la difusividad térmica, donde  $f$  representa la frecuencia de modulización del láser y B es un factor de ajuste experimental. La figura 21 muestra, el equipo con el que es posible medir la difusividad térmica del nanofluido.

$$\alpha = \pi f / (B^2) \quad (4.4.1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de modulación utilizada (Hz),  $B$  es un parámetro de ajuste y  $\alpha$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) es la difusividad térmica.

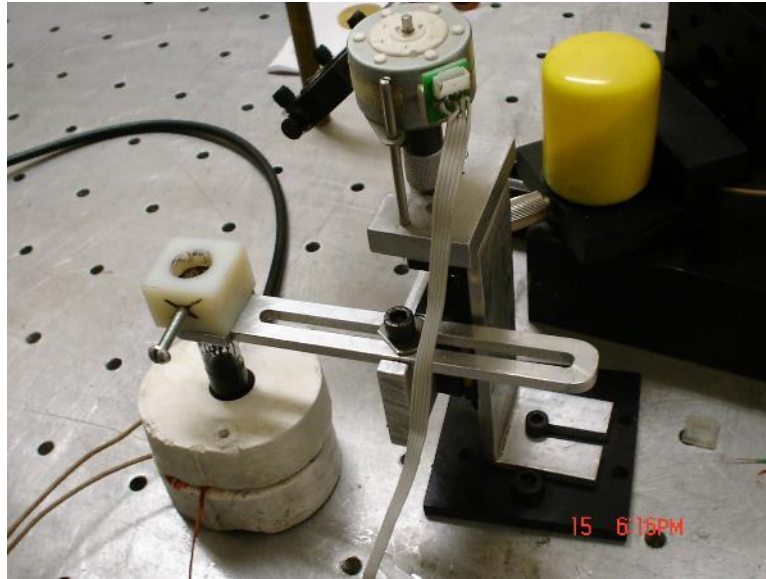


Figura 21. Resonador de ondas térmicas. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ-Cinvestav Qro.

#### 4.5 TRATAMIENTO TÉRMICO.

El acero utilizado para el presente estudio se trata de un acero SAE-1045, en la figura 22 se puede ver la barra de 12mm de diámetro por 27mm de largo. Este acero de medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico; como lo sería el Temple, la temperatura de este se comprende:  $830^{\circ}\text{C}$ –  $855^{\circ}\text{C}$ , el enfriamiento puede ser en agua o aceite, por lo que su utilización en este estudio es adecuado.



Figura 22. Probeta de acero 1045. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

Para obtener información relacionada con la capacidad de enfriamiento del fluido base y nanofluidos es preciso generar curvas de enfriamiento (datos de tiempo y temperatura) de la probeta durante el enfriamiento de la pieza, para ello se tiene que adherir un termopar a la probeta para obtener dichos datos. Se utilizan termopares tipo K, este componente consiste de dos cables: Aleación Cromo-Níquel y aleación Níquel-Aluminio. Se ocupa este tipo de termopar por el rango al cual se realizan las mediciones cercanas a los 900 ° C.

En la unión por soldadura de los termopares a la probeta, el proceso se inició con Soldadura por TIG (*Tungsten Inert Gas Welding*), sin metal de aporte, los termopares son de 0.7mm de diámetro, alambre desnudo, estos se unían en los extremos a una de las caras de la probeta de acero. El calor aportado por el proceso de TIG, dejaba sensible el alambre del termopar, por lo que, en su manipulación en el horno para el proceso de tratamiento térmico, este se desprendía. Las figuras 23 y 24 muestran las probetas de acero con unión por soldadura al alambre del termopar, antes y después del tratamiento térmico, como se aprecia en la figura 23. El alambre del termopar se desprende póstumo al tratamiento térmico.



Figura 23. Probeta de acero con termopar soldado, antes del proceso de temple. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

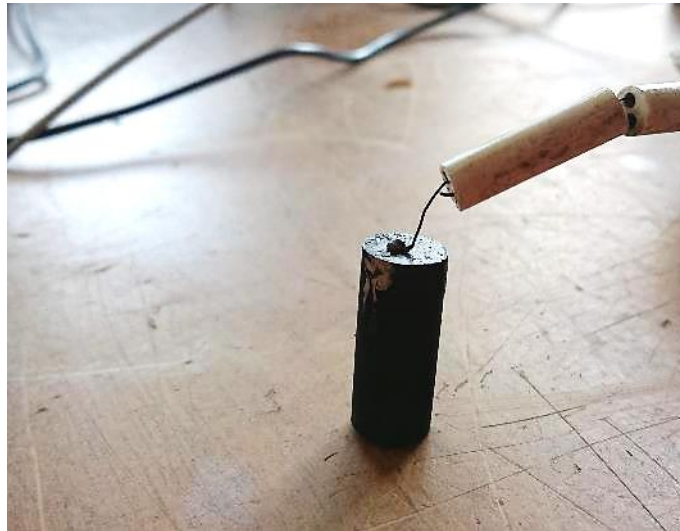


Figura 24. Probeta de acero con termopar soldado, después del proceso de temple. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

Debido a los problemas antes mencionados, se realiza el cambio de termopar por uno con recubrimiento de fibra de vidrio y cubierta de acero inoxidable, cable de 1.00mm de diámetro, del mismo tipo K. El tipo de unión con soldadura ahora se realiza con soldadura por resistencia, que consiste en aplicar un alto amperaje directamente a las puntas de los termopares, de esta manera el termopar resiste el manejo dentro de la mufla y al momento de



ingresarlo a la tina de temple. En las figuras 25 y 26, se aprecia el antes y después del tratamiento térmico respectivamente, el alambre soporte el tratamiento y manipulación de la probeta para ser templada.



Figura 25. Probeta de acero con termopar soldado. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.



Figura 26. Probeta de acero con termopar soldado, después del proceso de temple. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

#### **4.6 CURVAS DE ENFRIAMIENTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.**

Los datos de tiempo-temperatura, se obtienen una vez que se instrumenta el proceso de temple, como lo muestra la figura 27, donde se aprecia el arreglo instrumental, mediante la conexión del termopar unido a la probeta de acero con la tarjeta de adquisición de datos y el software Labview.



Figura 27. Instrumentación del proceso de Temple, de izquierda a derecha, Mufla, Plato caliente con Nanofluido, Tarjeta de adquisición de datos y Labview (software). Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

#### **4.7 PRUEBA DE DUREZA.**

La dureza es la resistencia que opone un objeto al ser penetrado, por lo que, dejara una huella o mejor dicho indentación, esta dependerá de la fuerza que se le aplique, así como el tiempo de permanencia al que es sometido. En la prueba de dureza se mide la profundidad o tamaño de la huella, si la indentación es grande y profunda se dice que el material es blando y viceversa, si la huella es pequeña y poco profunda entonces su dureza es alta o el material es duro.

El tipo de dureza utilizada para este estudio es la microindentación Vickers, el penetrador utilizado es un diamante con geometría piramidal, en la figura 28, se observa el diamante típico para la aplicación de la microdureza Vickers. El rango de fuerza aplicada se comprende entre 1 hasta 1000 gr, en casos especiales se podrá aplicar 2000 gr, en esta escala todavía se considera microdureza.

La microdureza es utilizada principalmente en recubrimientos metálicos, capas tratadas térmicamente, o bien para diferenciar fases contenidas en la microestructura, así como algunos microconstituyentes de la estructura.

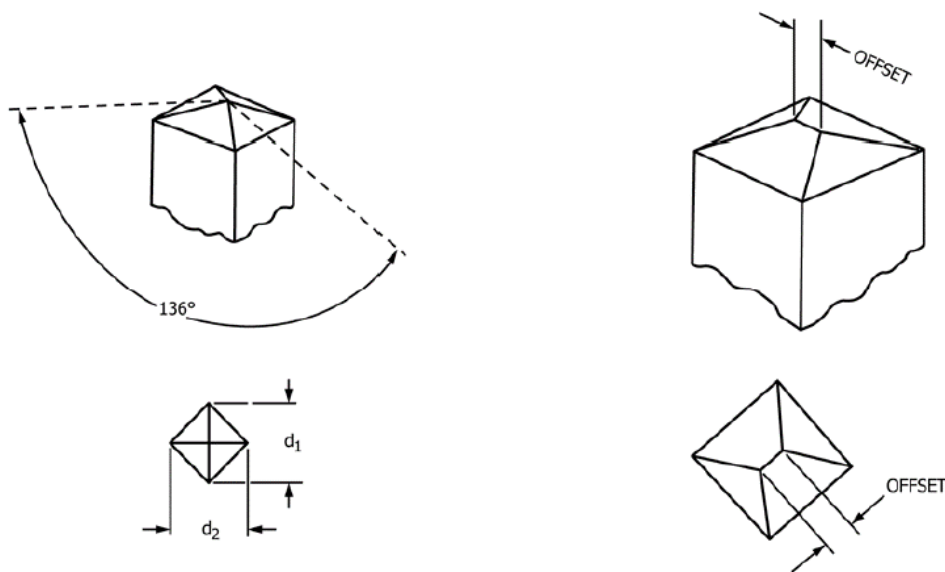


Figura 28. Indentador Vickers, ASTM E384.

$$HV = 1854.4 \times \frac{P}{d^2} \quad (4.7.1)$$

Donde P es la fuerza aplicada en Kgf(N) y  $d^2$  es el promedio de las diagonales de la indentación en mm.

La ecuación (4.7.1) es la indicada para calcular el valor de la microdureza, la dureza es obtenida directamente del equipo Wilson Hardness Modelo Tukon 1202, se puede obtener la conversión a escalas Rockwell (HRC Y HRB) y estas se basan en la norma ASTM E140, Estándar para conversión de Dureza en Metales. La carga aplicada para las pruebas es de 500gf (4.99N) por un tiempo de 10 segundos de permanencia sobre la muestra.

La forma de aplicación sobre el espécimen es un barrido desde la superficie hasta el núcleo o centro de la muestra, recordando que el tamaño de la muestra es de 12mm de

diámetro, por lo que se realiza dicho barrido desde 0.05mm hasta 5mm, el espacio entre indentaciones es de 0.15mm hasta llegar 0.5mm y concluyendo en 1mm entre huellas, en la figura 29, se representa el perfil de microdureza realizada en cada muestra. El propósito de este perfil es obtener la mayor información de la muestra, ya sea una capa tratada térmicamente o bien una descarburación de la superficie.

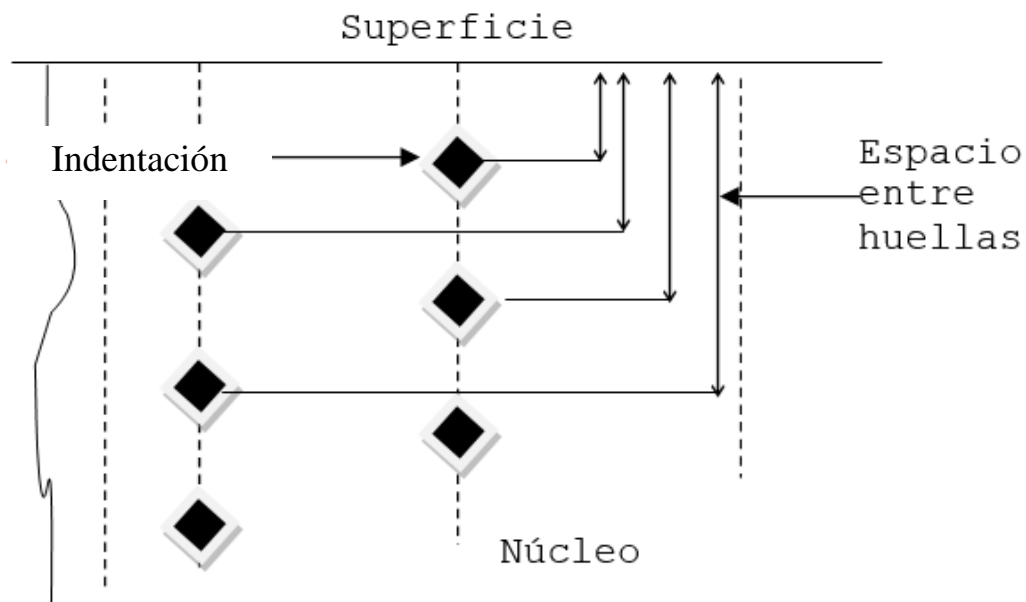


Figura 29. Diagrama de indentación para la probeta de acero. Atlas fotográfico, Proyecto Cidesi-ITQ.

#### 4.8 METALOGRAFÍA.

La ciencia que se ocupa de la constitución y estructura de los metales según se revela a simple vista o mediante el uso de herramientas como la microscopía óptica, la microscopía electrónica y las técnicas de difracción o rayos X, (*ASM Handbook, Metallography and Microstructures, Volume 9, 1985*).

Se utilizará esta técnica para determinar la estructura cristalina del acero, la preparación metalográfica consta de obtener una sección transversal y longitudinal de la muestra a examinar, el corte se realiza con disco abrasivo con sistema de refrigeración, ya

que es indispensable evitar la generación excesiva de calor, lo cual provocaría una transformación de fase y por consecuencia un cambio en la dureza.

Se inicia con un desbaste grueso con papel abrasivo de grado 120, la intención de este primer paso es eliminar zonas con alta deformación por efecto del corte. El desbaste fino se hace con papel abrasivo de grados 240 a 2000, cabe mencionar que podría utilizarse abrasivo de diamante, a partir del paso 600 o 1200 del grado de lija.

Para el pulido fino se utiliza alúmina de 1 micrómetro de tamaño en un paño de terciopelo a fin de eliminar el último paso del desbaste fino, hasta conseguir un acabado espejo.

El ataque químico mediante Nital al 3% (3ml de Ácido Nítrico + 97ml Alcohol Etilico) tiene la finalidad de revelar la microestructura, se trata de una corrosión controlada con el fin de contrastar las fases constituyentes en la muestra. La mezcla química será acorde al tipo de material o metal de la aleación, el estándar ASTM E340, presenta los ataques químicos para cada aleación metálica a nivel macro y micro.

#### **4.9 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE TRANSMISION (TEM).**

Hay cuatro componentes principales en un microscopio electrónico de transmisión (TEM): una columna óptica de electrones, un sistema de vacío, la electrónica necesaria (suministros de lentes para enfocar y desviar el haz y el generador de alto voltaje para la fuente de electrones) y software de control. Un TEM moderno generalmente comprende una consola de operación coronada por una columna vertical y que contiene el sistema de vacío, y paneles de control convenientemente ubicados para el operador. El microscopio puede estar completamente cerrado para reducir la interferencia de fuentes ambientales y puede operarse de forma remota.

La columna de electrones incluye elementos análogos a los de un microscopio óptico. La fuente de luz del microscopio óptico se reemplaza por un cañón de electrones, que está integrado en la columna. Las lentes de vidrio se reemplazan por lentes electromagnéticas. A diferencia de las lentes de vidrio, la potencia (distancia focal) de las lentes magnéticas se puede cambiar cambiando la corriente a través de la bobina de la lente. El ocular u ocular se reemplaza por una pantalla fluorescente y / o una cámara digital. El haz de electrones emerge

del cañón de electrones y atraviesa una muestra delgada, transmitiendo electrones que se recogen, enfocan y proyectan en el dispositivo de visualización en la parte inferior de la columna. Todo el trayecto de los electrones desde la pistola hasta la cámara debe estar al vacío. (2020 septiembre, <https://www.fei.com/introduction-to-electron-microscopy/tem/#gsc.tab=0>).

El equipo utilizado en este estudio pertenece a la UNAM, área de neurobiología campus Juriquilla, Querétaro. El modelo es un TEM 1010 con una resolución de 0.25 micrómetros. Las muestras de nanopartículas fueron preparadas para la técnica de inspección por TEM.

#### **4.10 DIMENSIONAMIENTO MEDIANTE ZETASIZER.**

El Zetasizer Nano-S es un analizador de tamaño de partícula y tamaño molecular de dos ángulos de alto desempeño para la detección mejorada de agregados y la medición de muestras pequeñas (partículas entre 0.6 y 6000nm) o diluidas, y de muestras a una concentración muy baja o alta utilizando la dispersión de luz dinámica con óptica "NIBS".

Mediante el uso de la óptica de retrodispersión no invasiva (NIBS) se logra un desempeño significativamente más elevado en comparación con los sistemas que utilizan la óptica de dispersión de 90 grados.

La dispersión de luz dinámica se utiliza para medir el tamaño de partícula y el tamaño molecular. Esta técnica mide la difusión de partículas en movimiento Browniano, y convierte este valor a tamaño y a una distribución de tamaño utilizando la relación de Stokes-Einstein. La tecnología de retrodispersión no invasiva (NIBS) se incorpora para ofrecer la más alta sensibilidad junto con el mayor rango de concentración y tamaño.

El método de análisis para esta prueba es obtener el nanofluido en base al procedimiento, la muestra para este estudio es de aproximadamente 10ml, esta es entregada al Centro Nacional de Metrología (CENAM) para su ensayo. El equipo de medición corresponde a un Zetasizer, modelo Nano-S, marca: Malvern Instruments.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A VARIAR (FASE 1).

Se plantea un conjunto de experimentos de los diferentes nanofluidos a preparar, con los parámetros a variar, se obtendrá la velocidad de agitación y el tiempo adecuado de agitación y de ultrasonido para la preparación del nanofluido. En la tabla 4 se presenta los valores de los parámetros a variar, se aprecia de izquierda a derecha, Numero del Nanofluido a preparar, Velocidad de la agitación mecánica de las nanopartículas en el fluido base, tiempo de permanencia en agitación mecánica, Tiempo de permanencia del nanofluidos en el ultrasonido y por último, el porcentaje en peso de las nanopartículas usadas para la preparación del nanofluido.

Tabla 4. Diseño de experimentos inicial de los nanofluidos.

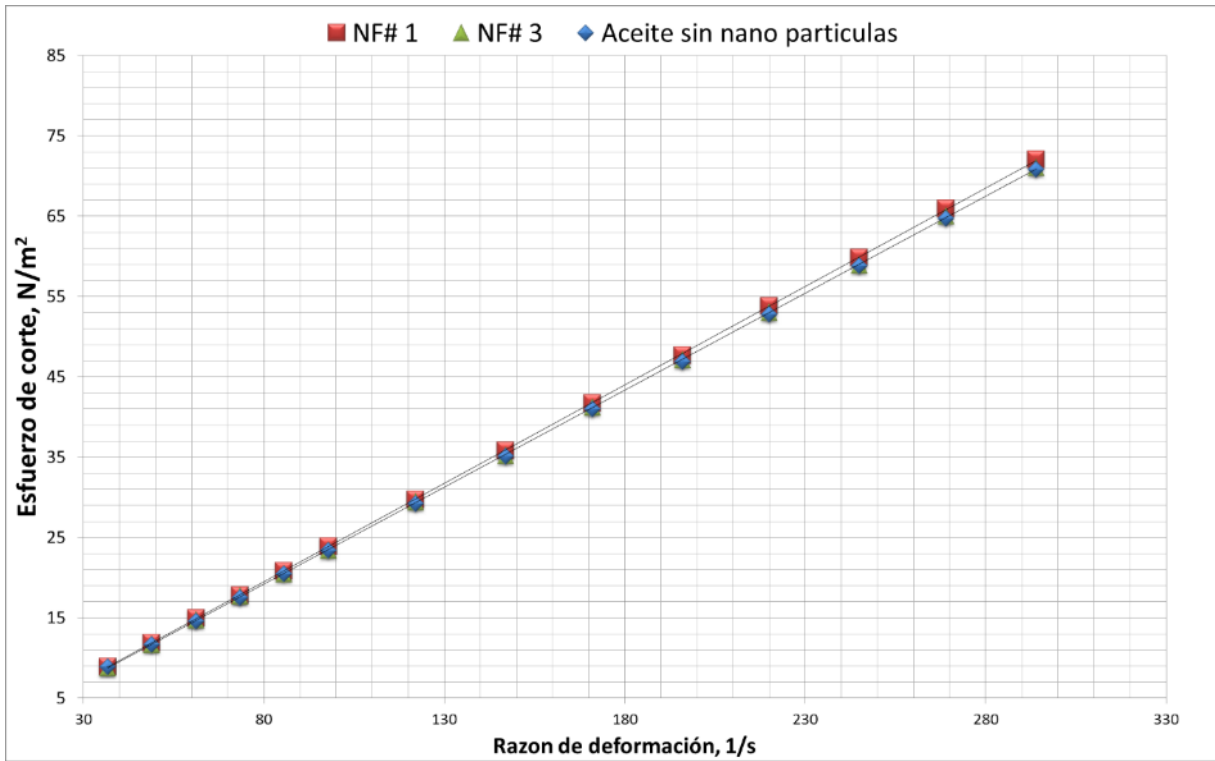
#NF	Agitación (rpm)	Tiempo Agitación (min)	Tiempo Ultrasonido (min)	Porcentaje en Peso (%)
1	600	60	60	0.5
2	1150	60	60	1.0
3	1150	120	120	0.5
4	1150	120	120	1.0

En la tabla 4, los nanofluidos NF# 1, NF# 2, NF# 3 y NF# 4. Se puede apreciar que los nanofluidos 1 y 3 muestran el mismo %peso de nanopartículas, las variables de velocidad y tiempo de agitación, así como el tiempo de sonicación son diferentes. En el caso de los nanofluidos 2 y 3, las variables que cambian son el tiempo de agitación y el tiempo de ultrasónico. Con estos experimentos se busca la variabilidad de la velocidad de agitación y de tiempo de ultrasonido.

A continuación, se presentan los resultados del comportamiento reológico de los nanofluidos y de la difusividad térmica como parte de caracterización del Nanofluido. Se presentan también la caracterización metalográfica y de dureza como parte de la caracterización del acero.

### 5.1.1 Prueba de Viscosidad nanofluidos #1 y #3

De los resultados presentados en la gráfica 1, se puede apreciar que el comportamiento de los nanofluidos es newtoniano, dado que la razón de deformación es directamente proporcional al esfuerzo de corte, se puede ver que el fluido base muestra el mismo comportamiento.

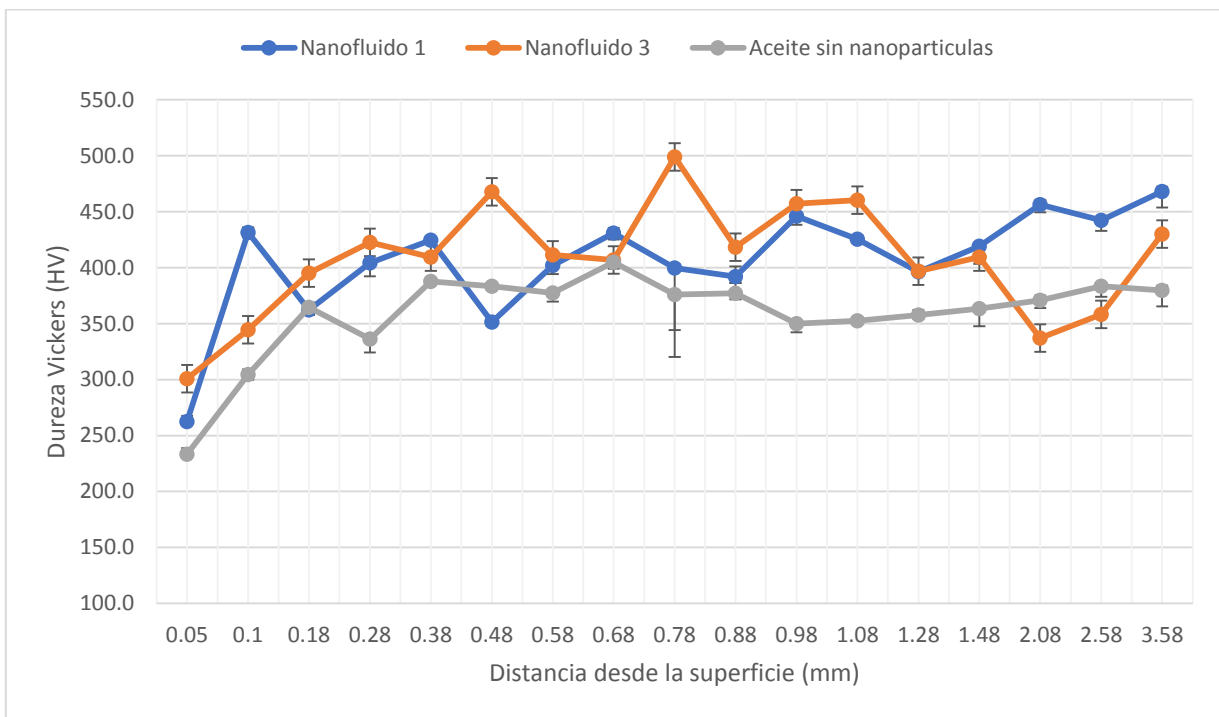


Gráfica 1. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#1 y NF#3, así como del fluido base.



### 5.1.2 Perfil de Durezas nanofluidos #1 y #3

Los resultados de dureza mediante microindentación se realiza con una carga de 500gf con un tiempo de permanecía de 10s, los valores de dureza se registran directamente del equipo. Se inicia en la superficie de la muestra hasta llegar al núcleo de esta misma, un total de 11 mediciones. Como se puede observar en la gráfica 2, los valores de dureza para los nanofluidos #1 y #3, presentan una tendencia por encima de los 250 HV y puntos cercanos a los 500 HV, así mismo tienen semejanza entre puntos. Como se puede apreciar la dureza de la probeta con fluido base se encuentra con valores por debajo de lo 250HV y como punto máximo un valor de 400HV.



Grafica 2. Perfil de dureza Vickers para los NF#1, NF#3 y Fluido Base, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.1.3 Microestructura de los nanofluidos #1 y #3.

Las microestructuras contenidas en las figuras 30-31, corresponden a las fases microestructurales del NF#1 para la superficie y centro de la probeta, respectivamente, se aprecia que consiste de una matriz de martensita (fases café claro) más fases de perlita (fases café oscuras) y pequeñas fases de ferrita (zonas claras), presenta una microestructura homogénea desde la superficie hasta el núcleo esta estructura se corrobora con el perfil de dureza que se muestra en la gráfica 2.

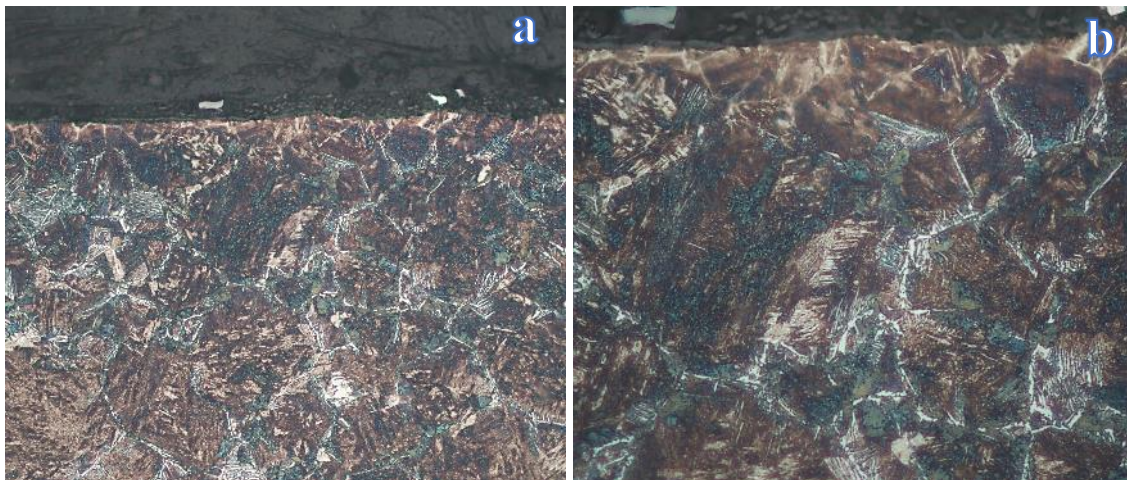


Figura 30. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #1, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

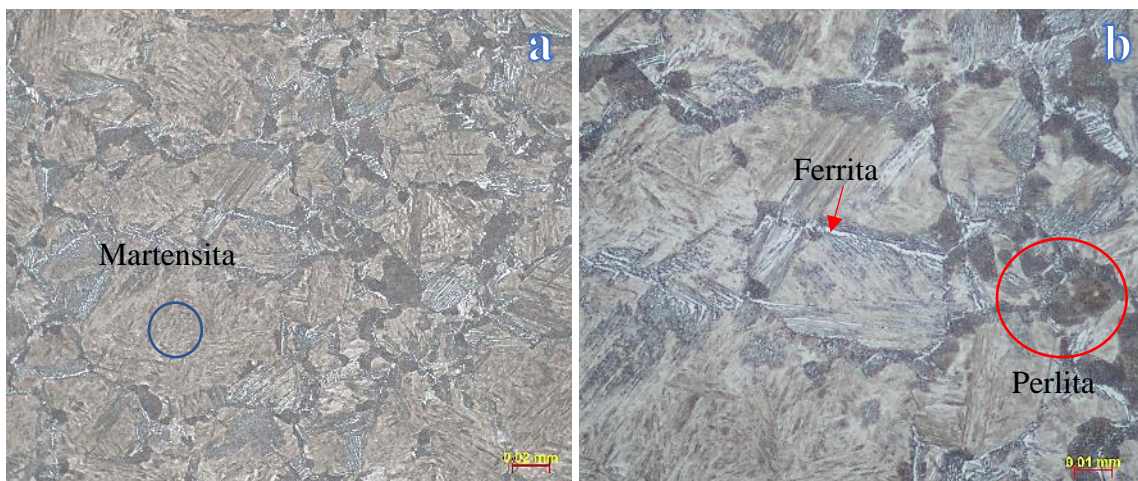


Figura 31. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#1, tomada a: a) 500X y b) 1000X

Las microestructuras contenidas en las figuras 32-33, corresponden a la superficie y centro de la probeta templada con NF#3, consiste de una matriz de martensita (fases café claro) más fases de perlita (fases café oscuras) y pequeñas fases de ferrita (zonas claras), presenta una microestructura homogénea desde el núcleo hasta la matriz, en esta muestra se presenta menor cantidad de ferrita y las zonas de perlita disminuyeron en comparación con el NF #1.

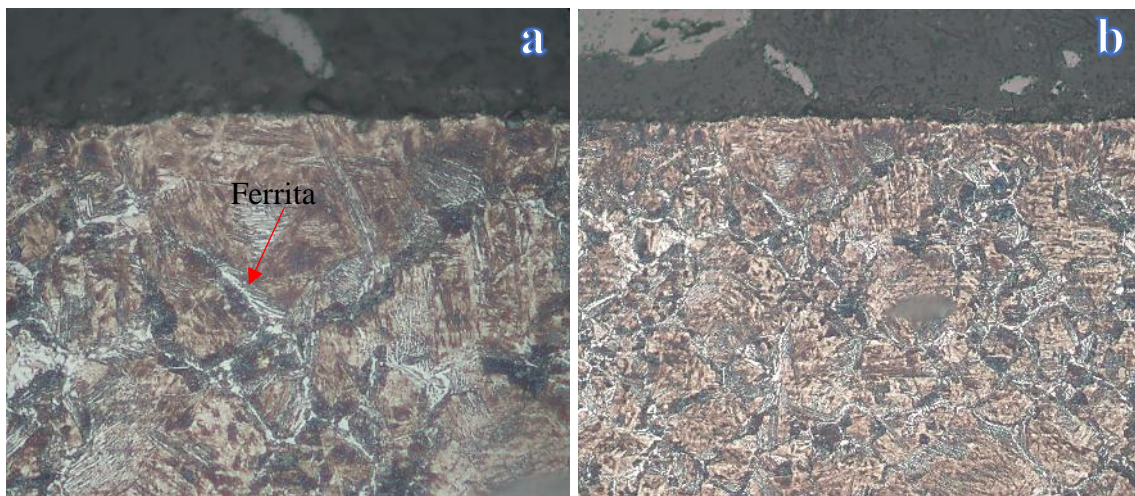


Figura 32. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #3, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

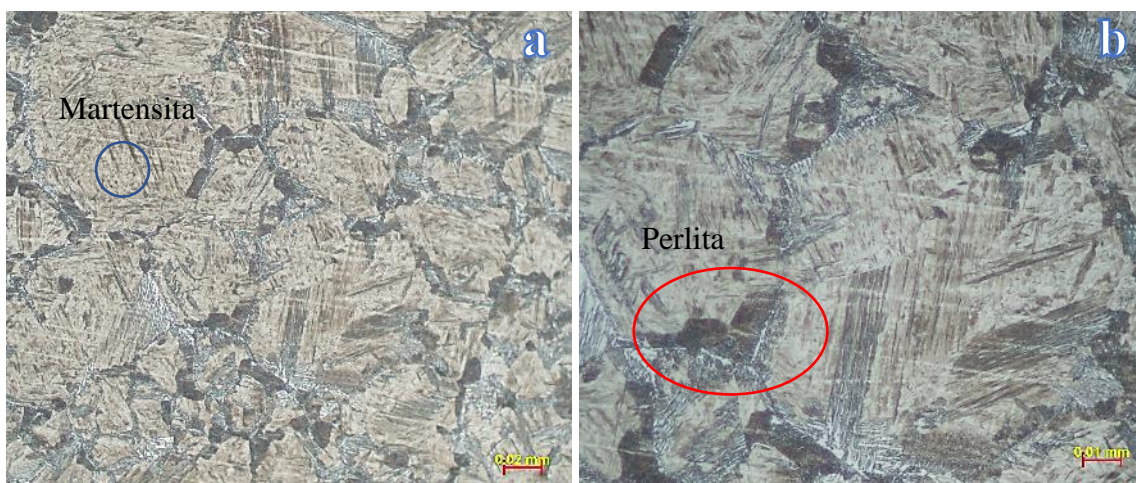
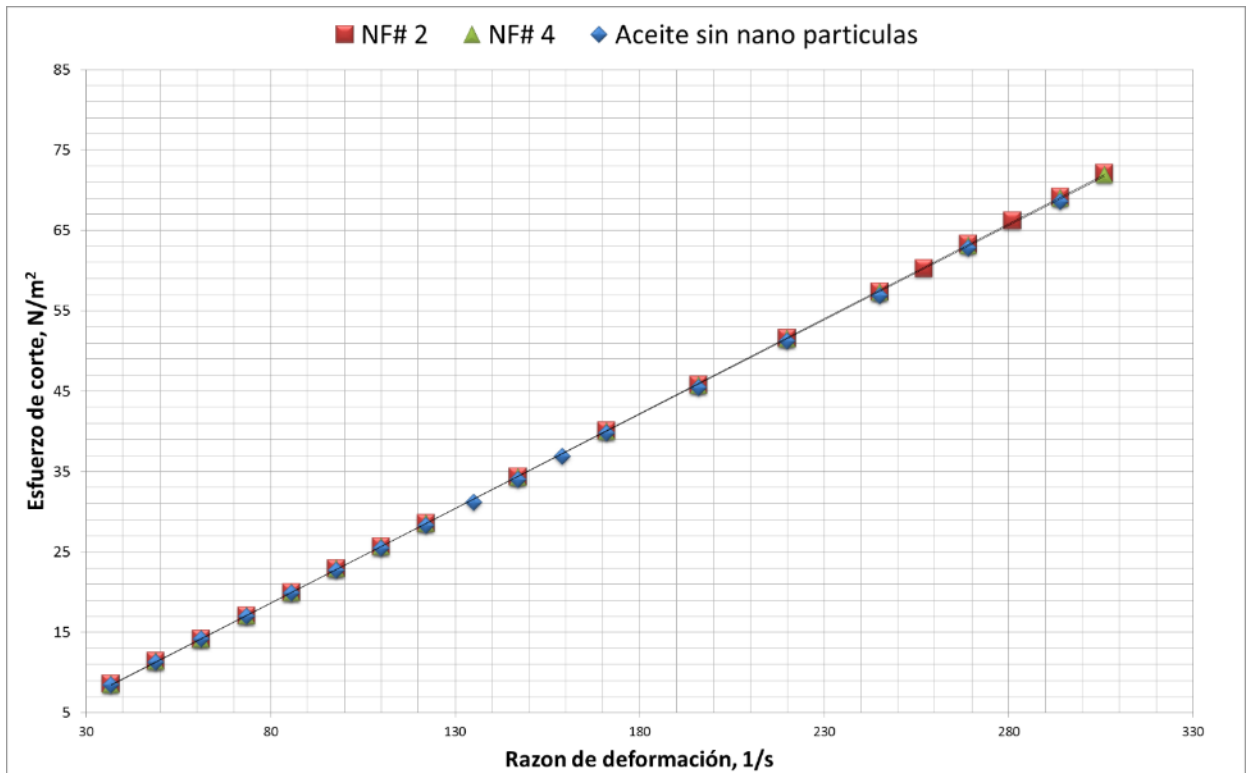


Figura 33. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#3, tomada a: a) 500X y b) 1000X

#### 5.1.4. Prueba de Viscosidad nanofluidos # 2 y #4.

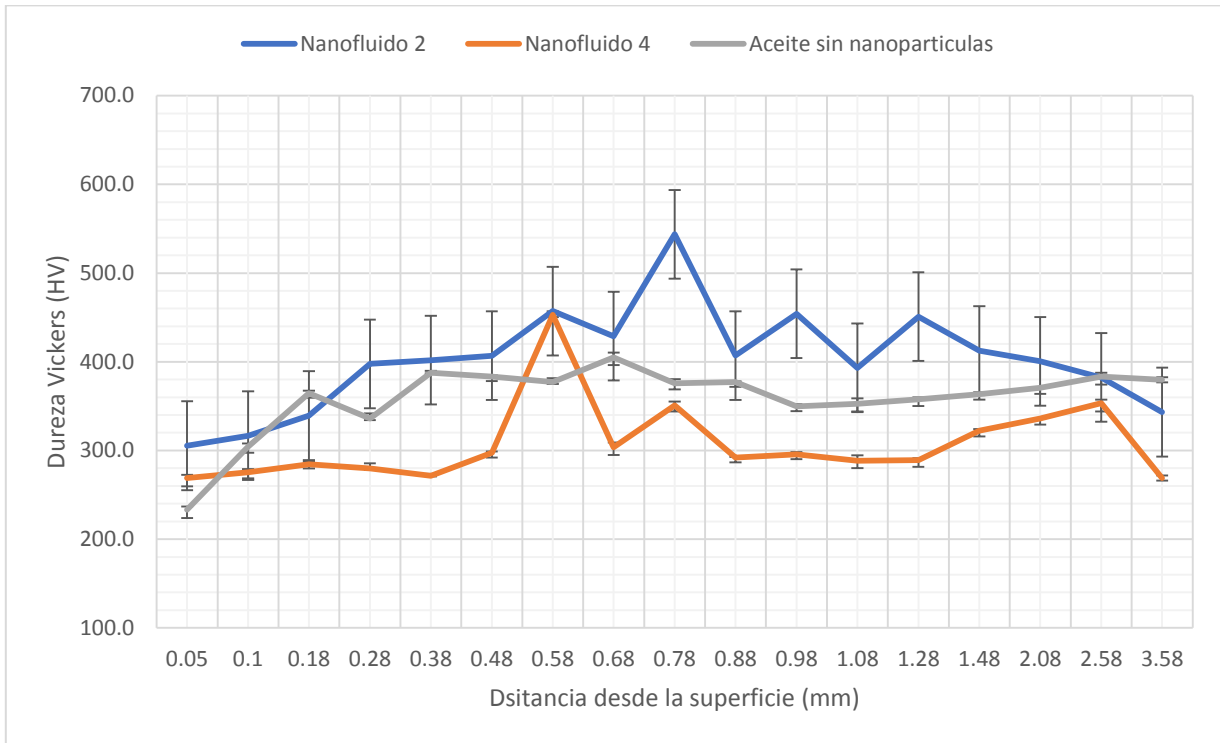
De los resultados presentados en la gráfica 3, se puede concluir que el comportamiento es el de un fluido newtoniano, obsérvese su relación esfuerzo-deformación es similar entre nanofluidos y aceite base.



Gráfica 3. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#2 y NF#4, así como del fluido base.

#### 5.1.5 Perfil de Durezas nanofluidos #2 y #4

Como se puede observar en la gráfica 4, los valores de dureza para los nanofluidos #2 y #4, presentan una tendencia por encima de los 250 HV y puntos superiores a los 500 HV, se observa que los valores de dureza para la probeta #2 son mayores a los de la probeta #4 y a la probeta con enfriamiento en fluido base, mientras la probeta Nanofluido #4 presenta una menor dureza, incluso debajo de la probeta enfriada en fluido sin nanopartículas.



Grafica 4. Perfil de dureza Vickers para los NF#2, NF#4 y Fluido Base, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

#### 5.1.6. Microestructura de los nanofluidos #2 y #4

Las microestructuras contenidas en las figuras 34-35, corresponden a las fases microestructurales del NF#2 para la superficie y centro de la probeta, respectivamente consiste de una matriz de martensita (fases café claro) más fases de perlita (fases café oscuras) y algunas fases de bainita, nótese la ausencia de la fase ferrítica (zonas claras), presenta una microestructura homogénea desde la superficie hasta el núcleo, esta estructura se corrobora con el perfil de dureza encontrado en la probeta.

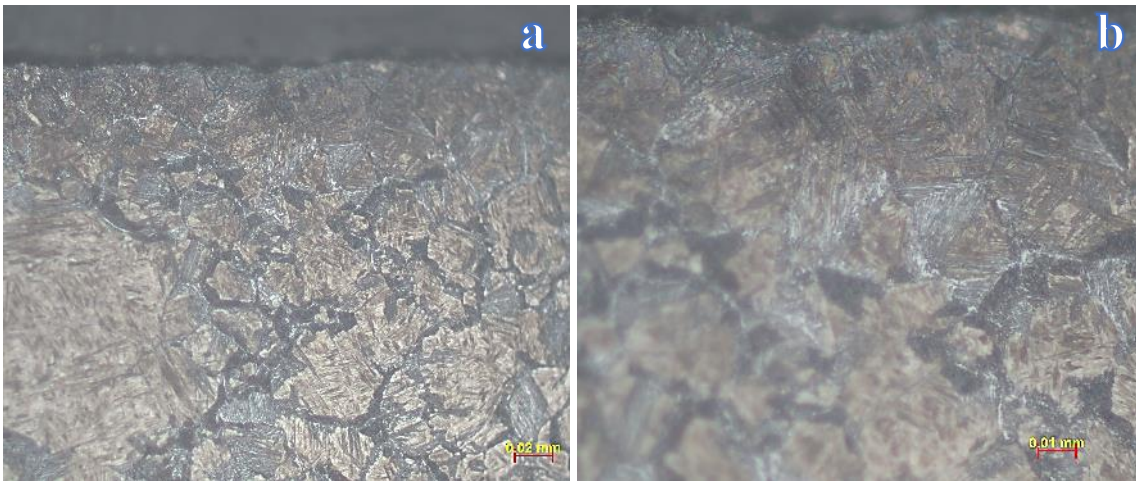


Figura 34. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #2, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

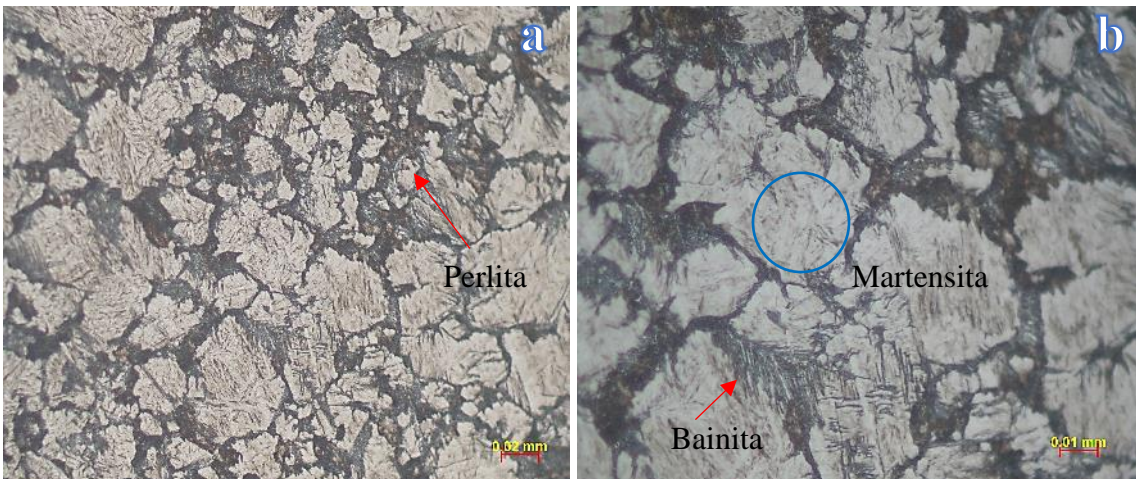


Figura 35. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#2, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

Las microestructuras contenidas en las figuras 36-37, corresponden a las fases microestructurales del NF#4 para la superficie y centro de la probeta, respectivamente, consisten de una matriz de martensita (fases café claro) más fases de perlita (fases café oscuras), y algunas fases de bainita y de la fase ferrítica (zonas claras), las colonias de perlita son bastas en esta muestra, predomina esta fase, en comparación del nanofluido #2, donde se aprecia menor cantidad de fase perlítica y predomina la martensita.

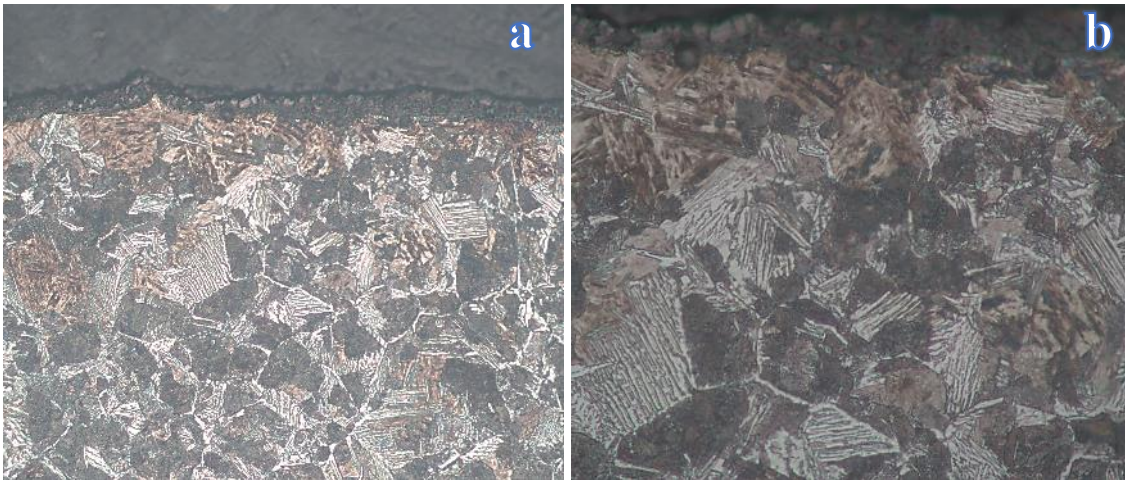


Figura 36. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #4, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

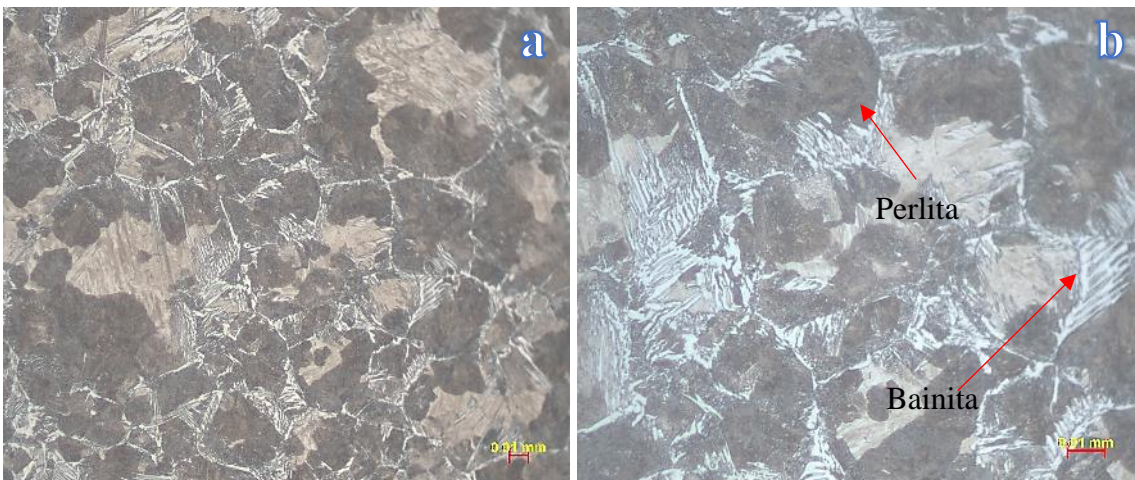


Figura 37. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045 templada en NF#4, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

#### 5.1.7. Microestructura aceite sin nanopartículas

De las figuras 38-39 se puede ver una microestructura de ferrita acicular principalmente, así como algunas bainitas en una matriz perlítica, para zona del núcleo se puede ver una microestructura similar, más sin embargo se puede observar una estructura mayormente perlítica con zonas ricas de bainita, como se aprecia se tienen zonas de perlita en gran cantidad, zonas de ferrita acicular y pequeñas zonas de martensita. Las microestructuras

encontradas en las probetas sometidas en nanofluidos, presentan una mejor transformación, lo que se supone es deseable con el tratamiento térmico.

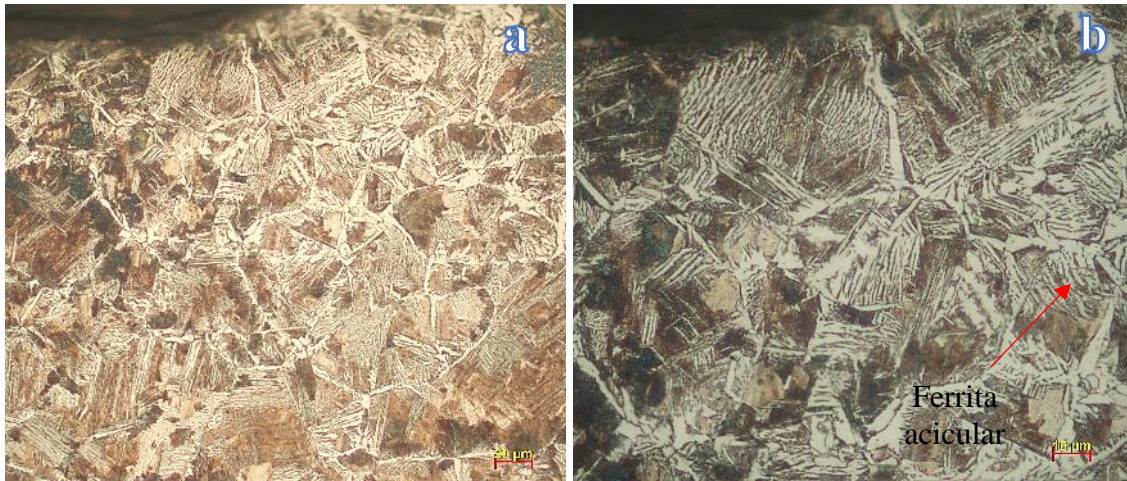


Figura 38. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al temple en el fluido base, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

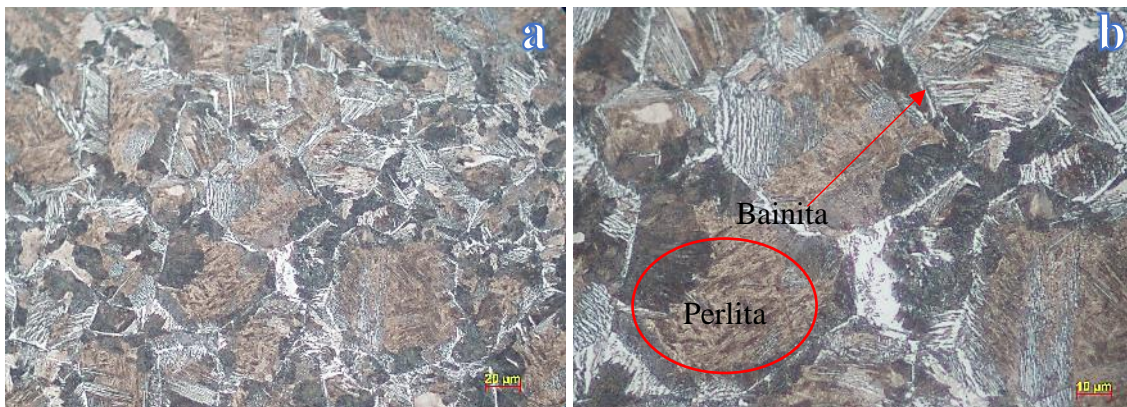


Figura 39. Microestructura del centro de la probeta de acero 1045, correspondiente al temple en el fluido base, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

#### 5.1.8. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos #1, #2, #3 y #4.

La tabla 5 presenta los resultados de la difusividad térmica para los nanofluidos y fluido base, los valores provienen de la sustitución de los parámetros en la ecuación 4.4.1. Para ejemplificar se muestra la sustitución de los parámetros en la ecuación para el fluido base. Se aprecia que el valor de la difusividad térmica para el NF#3 es mayor que el NF#1, tomando como referencia el fluido base. Los resultados obtenidos son valores promedio de 3 mediciones realizadas a



cada espécimen. Comparando el valor de difusividad térmica para el NF#2 y NF#4, se aprecia que los resultados son ligeramente mejores a comparativa de los NF#1 y #3. El NF# 4 se encuentra  $0.49 \times 10^{-04} \text{ cm}^2/\text{s}$ , por encima para el nanofluido # 2.

Tabla 5. Resultados de Difusividad térmica.

$f$ (Hz)	B	$\alpha$ $10^{-04}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	NF#
4.7	188.17	4.17	1
4.9	167.14	5.51	2
4.2	153.77	5.58	3
4.5	153.49	6.00	4
5.1	287.38	1.94	FB

$$\alpha = \frac{\pi f}{B^2} = \frac{\pi (5.1 \text{ hz})}{(287.381)^2} = 1.94 \times 10^{-04} \text{ cm}^2/\text{s}$$

#### 5.1.9. Medición de Nanopartículas por Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM).

Se realizaron mediciones de las nanopartículas para obtener sus dimensiones mediante la técnica de microscopia electrónica de transmisión (TEM). La principal causa es determinar el tamaño de la partícula, ya que las nanopartículas utilizadas en este proyecto son nominalmente menores a 50 nanómetros, según fabricante Sigma-aldrich. Otro punto a estudiar, es la aglomeración de estas misma, una de las particularidades del nanofluido es obtener una dispersión de las nanopartículas en el fluido base, mediante la sonicación en una tina de ultrasonido.

Las figuras 40-41, pertenecen a imágenes de la alúmina utilizada en este proyecto, la medida nominal es de <50 nanómetros, como se puede ver en figura 40, se observan aglomerados de nanopartículas, sin embargo, se puede ver el tamaño aproximado en la figura 41, que bien se ajustan al valor nominal de la nanopartícula.

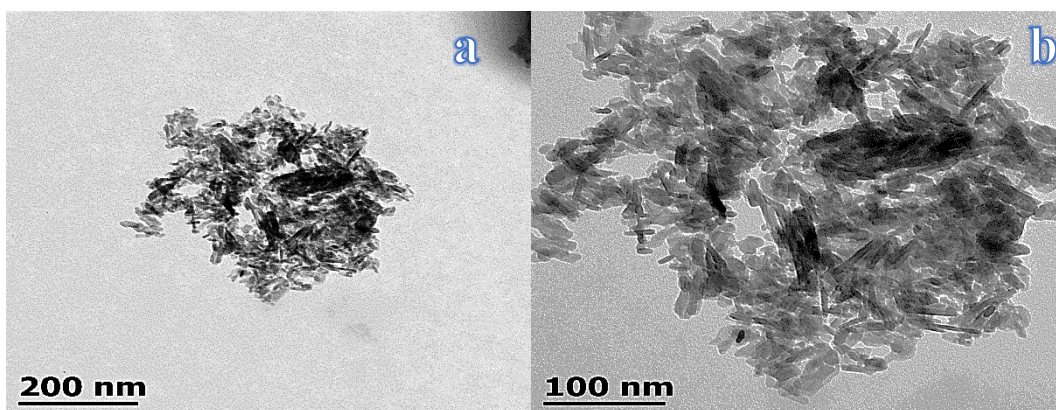


Figura 40. Nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$  tomadas a: a) 90,000X y b) 200,000X.

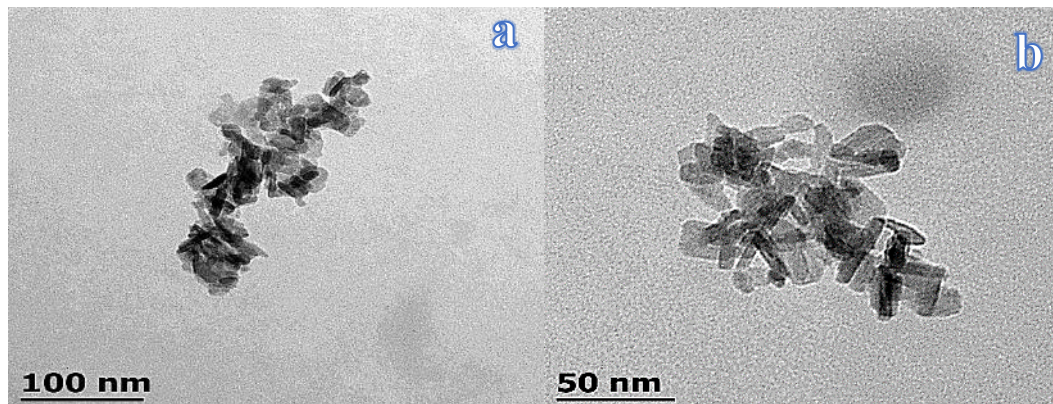


Figura 41. Nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\gamma$  tomadas a: a) 200,000X y b) 300,000X.

#### 5.1.10. Medición de Nanopartículas por Zetasizer.

Los resultados de las mediciones por el equipo Zetasizer Nano-S, proveen valores del tamaño de partícula en promedio de 3 mediciones en diferentes puntos del nanofluido. Dichos valores se expresan en nanómetros.

En la tabla 6, se presentan los resultados de los nanofluidos #1, #2, #3 y #4, así como del aceite base (sin nanopartículas). En la tabla 6 se indican dos columnas que muestran los resultados sin filtrar y con filtro. El filtro que se uso sirve para retener las partículas que se encuentran por encima de un valor de  $100\ \mu\text{m}$ . Los resultados arrojados por el equipo muestran

valores similares entre fluidos, tanto en modo filtrado como sin el proceso de filtrado, que bien este proceso se estimó para eliminar las micropartículas de origen y determinar la influencia de estas con las nanopartículas, más los resultados obtenidos indican una buena dispersión de las nanopartículas.

Tabla 6. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 1

#NF	Velocidad Agitación (rpm)	Tiempo Agitación (min)	Tiempo Ultrasonido (min)	% En Peso de NP	Tamaño de Partícula	
					Sin Filtrar	Filtrado
NF#1	600	60	60	0.5	220.067	0.175
NF#2	1150	60	60	1.0	209.000	0.206
NF#3	1150	120	120	0.5	223.900	0.145
NF#4	1150	120	120	1.0	210.360	0.245
Fluido Base	---	---	---	---	297.100	0.175
					Nanómetros	Nanómetros

#### 5.1.11 Discusión de los resultados.

De los resultados obtenidos para los NF#1 y #3, que bien son fluido similares ya que contienen misma cantidad de peso (porcentaje) de NP, pero diferentes parámetros de preparación, arroja valores similares entre estos para la parte de Reología, la viscosidad entre NF es proporcional al esfuerzo de corte, por lo que se considera un fluido newtoniano, lo que significa una excelente parámetro para ser usado como medio de temple, teniendo en cuenta que el aceite sin nanopartículas arrojó valores similares de viscosidad y características reológicas.

Las probetas templadas en estos NF demuestran en propiedades mecánicas, dureza, que el NF#3 presenta una dureza alta, alcanzando los 500HV, a comparativa del NF#1, que rebasa los 450HV, mientras que el fluido base llega los 400HV. Más se puede mencionar que el NF#1 tiene menor tendencia, valores semi homogéneos, corroborando estos resultados, la microestructura indica que el NF#3 tiene menor cantidad de ferrita y colonias de perlita, por ende, mayor martensita, una dureza alta, pero no homogénea puesto que se tiene una matriz

con más microconstituyentes, como es el caso del NF#1 donde su densidad de fases perlitas y ferríticas es mayor, y solo se tienen zonas de martensita distribuidas en la matriz.

De los resultados de la medición de tamaño de partícula, arroja valores similares entre NF antes del filtrado, después del filtrado, los valores son distintos, para el NF#3 se tienen 0.145nm contra 0.175nm del NF#1, cabe mencionar que el NF#3 tiene mayor tiempo de preparación (120minutos, ver tabla 6), el doble que NF#1, por lo que se puede suponer que este tiene mejores condiciones de estabilidad.

Los resultados obtenidos para los NF#2 y #4, que bien son fluido similares ya que contienen misma cantidad de peso (porcentaje) de NP, pero diferentes parámetros de preparación, arroja valores similares entre estos para la parte de Reología, la viscosidad entre NF es proporcional al esfuerzo de corte, por lo que se considera un fluido newtoniano.

Las probetas templadas en estos NF demuestran en propiedades mecánicas, dureza, que el NF#2 presenta una dureza alta, por encima de los 500HV, a comparativa del NF#4, que alcanza los 450HV, mientras que el fluido base llega los 400HV. Más se puede mencionar que el NF#4 tiene menor tendencia, valores semi homogéneos, corroborando estos resultados, la microestructura indica que el NF#2 tiene menor cantidad colonias de perlita, que bien no alcanzaron a transformar por completo, por ende mayor martensita, una dureza alta, como es el caso del NF#4 donde su densidad de fases perlitas es mayor, la ferrita está distribuida en el límite de grano austenítico y solo se tienen zonas de martensita distribuidas en la matriz.

De los resultados de la medición de tamaño de partícula, arroja valores similares entre NF antes del filtrado, después del filtrado, los valores son distintos, para el NF#2 se tienen 0.205nm contra 0.246nm del NF#4, cabe mencionar que el NF#4 tiene mayor tiempo de preparación (120minutos, ver tabla 6), el doble que NF#2, más el porcentaje en peso de NP es el doble que en los NF# 1 y 3, lo cual podría conducir a la conclusión que el porcentaje de las NP afecta la estabilidad del nanofluido.

Como se había mencionado antes el FB tiene una dureza cercana los 400HV, lo que indica una microestructura de matriz de perlita más fases de ferrita y algunas zonas de bainita, algunas zonas de martensita están presentes en la matriz, mas no hay una transformación por completo de las otros microconstituyentes (ferrita-perlita). Se demuestra que con la adición de las nanopartículas al fluido base existe una mejora en el tratamiento térmico de temple para el acero al carbono, ya que mejora las propiedades mecánicas.

## 5.2 EFECTO DEL TIEMPO DE ULTRASONIDO (FASE 2).

De los resultados de la sección 5.1, se parte para el planteamiento de otro conjunto de experimentos, en los cuales se incluye la adición del surfactante como variable, con la finalidad de mejorar la dispersión de las nanopartículas y evitar su aglomeración. Cada nanofluido de esta fase 2 se preparó por duplicado.

La tabla 7 muestra que los parámetros a variar son el tiempo de ultrasonido, el porcentaje en peso de las nanopartículas y el porcentaje en peso del surfactante, se mantendrán constante el tiempo de agitación mecánica igual a 120 minutos y la velocidad de agitación en un valor de 1150 rpm, la temperatura es constante y tiene un valor de 60°C para todas las composiciones de nanofluido.

Tabla 7. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 2.

#NF	t (ultrasonido), min	%peso, NP	%peso, span80
5	30	0.5	0
6	30	0.5	0.5
7	30	0.5	1
8	60	0.5	0
9	60	0.5	0.5
10	60	0.5	1
11	120	0.5	0
12	120	0.5	0.5
13	120	0.5	1

### 5.2.1 Análisis de curvas de enfriamiento

Un análisis de las curvas de enfriamiento es particularmente útil cuando se estudian los fluidos de temple, porque ilustran los mecanismos involucrados en el proceso de enfriamiento en un amplio rango de temperatura. Las curvas de enfriamiento también se pueden analizar para proporcionar datos cuantitativos de transferencia de calor en función de la temperatura.

Dos de los parámetros más comunes obtenidos de las curvas de enfriamiento son la velocidad máxima de enfriamiento;  $CR_{max}$  a una temperatura de 700°C y la velocidad de enfriamiento a aproximadamente 300 ° C ( $CR_{300}$ ). Normalmente, es deseable que el  $CR_{max}$  se produzca a temperaturas más altas, en la región de transformación de ferrita y perlita si se desea la máxima dureza, porque esto minimiza la formación de ferrita y perlita. Las velocidades

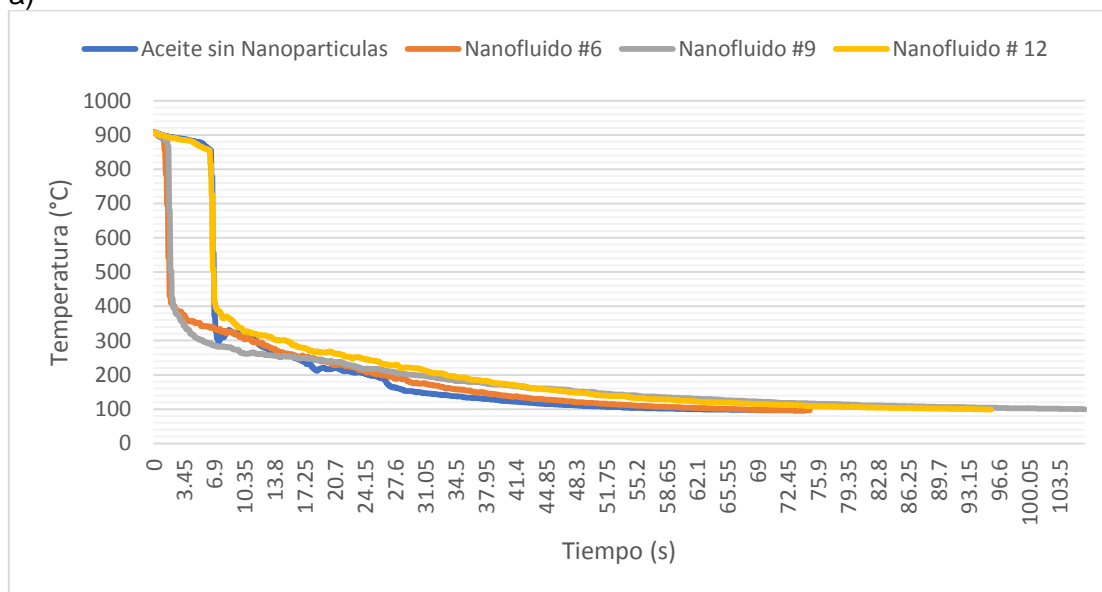
de enfriamiento en la región donde la martensita comienza a formarse a partir de la austenita,  $M_s$ , deben minimizarse para reducir el potencial de agrietamiento y distorsión.

Por lo que utilizaremos la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) que se estima a  $700^{\circ}\text{C}$  en las curvas de enfriamiento obtenidas del proceso de temple de las probetas de acero 1045. Para obtener el valor de la  $T_{max}$  se graficarán los resultados más cercanos a  $700^{\circ}\text{C}$  hacia arriba y hacia abajo (rango de  $850^{\circ}\text{C}$ - $550^{\circ}\text{C}$ ), de esta ecuación se podrá obtener el valor esperado a dicha temperatura con mayor exactitud.

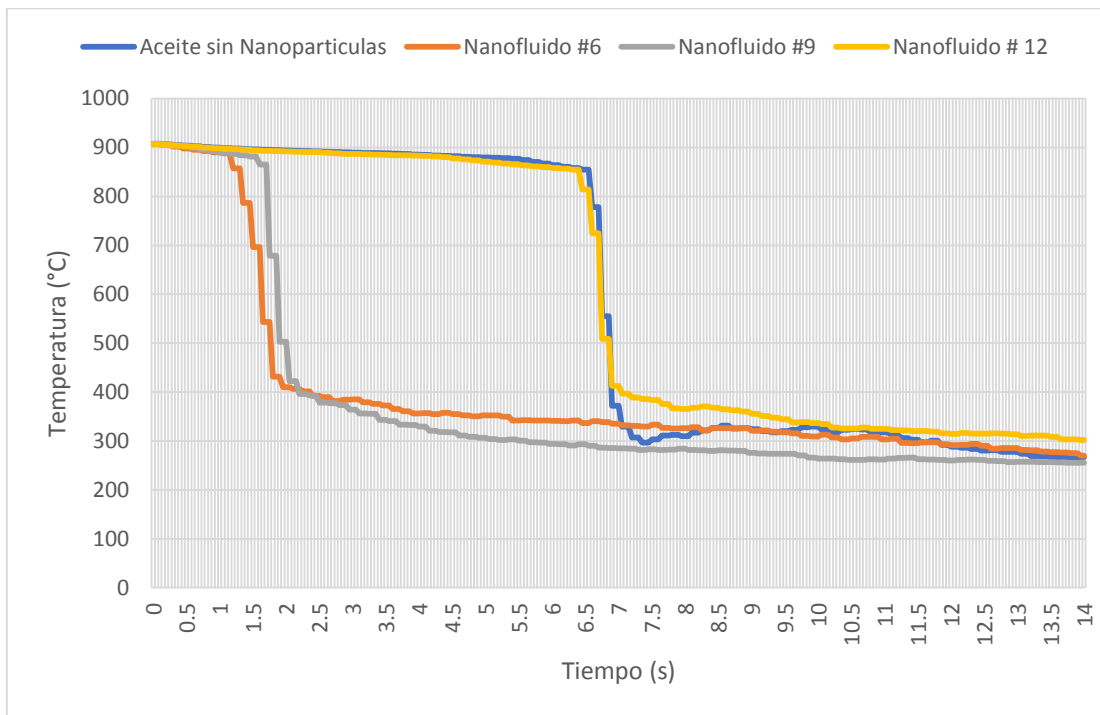
### 5.2.2 Curvas de enfriamiento nanofluidos #6, #9 y #12

De la instrumentación del proceso de tratamiento térmico de las probetas 1045, en la gráfica 5 se muestran las curvas de enfriamiento para los nanofluidos #6, #9 y #12. Se puede ver que la probeta sin nanopartículas y el NF#12, presentan una velocidad de enfriamiento que se calcula en  $999.49^{\circ}\text{C/s}$  para ambos. Mientras que para los NF #6 y NF#9, se observa una curva que registra una velocidad de enfriamiento de  $811.4^{\circ}\text{C/s}$  y  $1209.1^{\circ}\text{C/s}$  respectivamente.

a)



b)



Grafica 5. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #6, #9 y #12, respectivamente, para un %peso\_np=0.5 y un %peso\_span80=0.5. b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de  $T_{max}$  a 700°C.

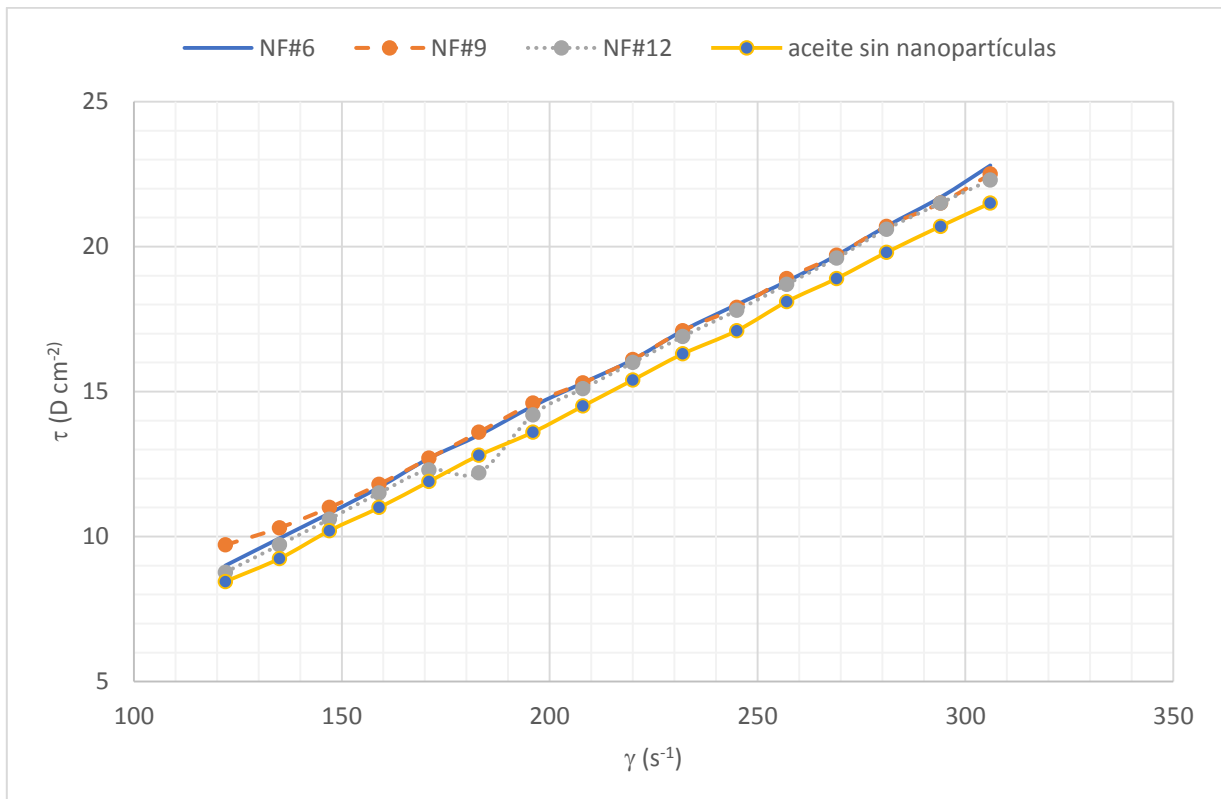
En la tabla 8 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Se reportan las ecuaciones que provienen de los datos graficados de tiempo contra temperatura, donde la pendiente representa la velocidad de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 8. Velocidades de enfriamiento a  $T_{max}=700^{\circ}\text{C}$  para nanofluidos #6, #9 y #12.

Expresiones lineales t-T			
NF#6	NF#9	NF#12	FB
$T=811.4t+1933$	$T=1209.1t+2858.7$	$T=999.49t+7376.2$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C (°C/s)			
811.4	1209.1	999.49	999.49

### 5.2.3. Prueba de Viscosidad nanofluidos #6, #9 y #12

Los resultados presentados en la gráfica 6 se obtienen valores muy similares entre nanofluidos, podemos apreciar que se trata de un fluido newtoniano.



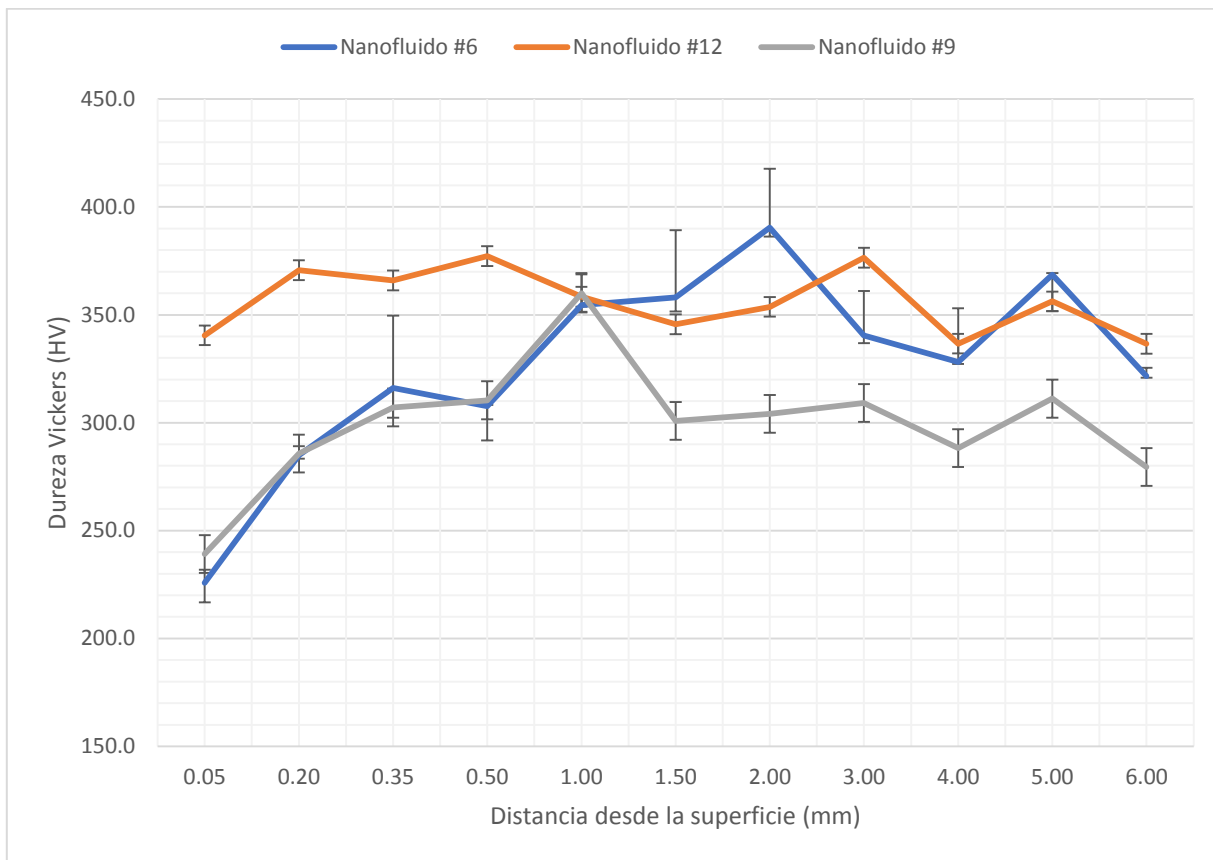
Grafica 6. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#6, NF#9 y NF#12 así como del fluido base.

### 5.2.4 Perfil de Durezas nanofluidos #6, #9 y #12

Como se puede observar los valores de dureza para los nanofluidos #6 y #9, presentan una dureza en la superficie por debajo de los 250 HV y algunos puntos superiores a los 350 HV, se observan valores muy similares entre estas dos muestras hasta una distancia aproximada de 1mm, sin embargo, la probeta correspondiente al nanofluido #9 tiende a disminuir su dureza contrario a la tendencia de la probeta del nanofluido #6; en el caso del nanofluido #12 los



valores de dureza se observan superiores por encima de los 300HV manteniendo una dureza mayormente homogénea, lo que se podrá corroborar con la microestructura.



Grafica 7. Perfil de dureza Vickers para los NF#6, NF#9 y NF#12, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

#### 5.2.5. Microestructura nanofluidos #6, #9 y #12

De la figura 42a-42b se puede apreciar una microestructura para la probeta enfriada en el NF#6 de zonas de perlita, ferrita y algunas zonas de bainita en una matriz martensítica, se pueden ver zonas bastas de ferrita, esto se refleja en la dureza, una dureza de baja escala.

Para la figura 43a-43b se muestra el área del núcleo de la probeta enfriada en el NF#6, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita, se observa menor cantidad que en la superficie, así como podemos ver una mejor definición en la fase de perlita en la matriz de martensita revenida.

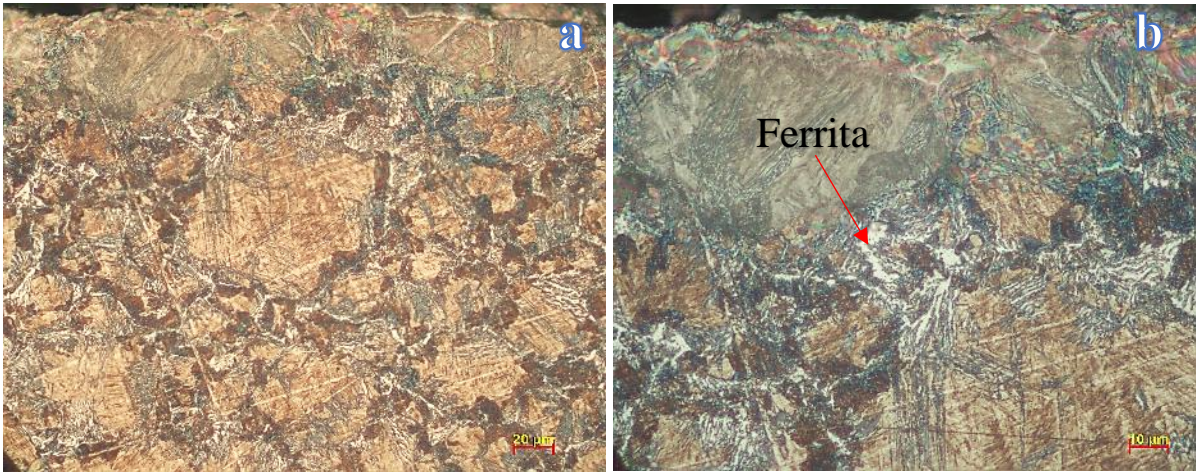


Figura 42. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #6, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

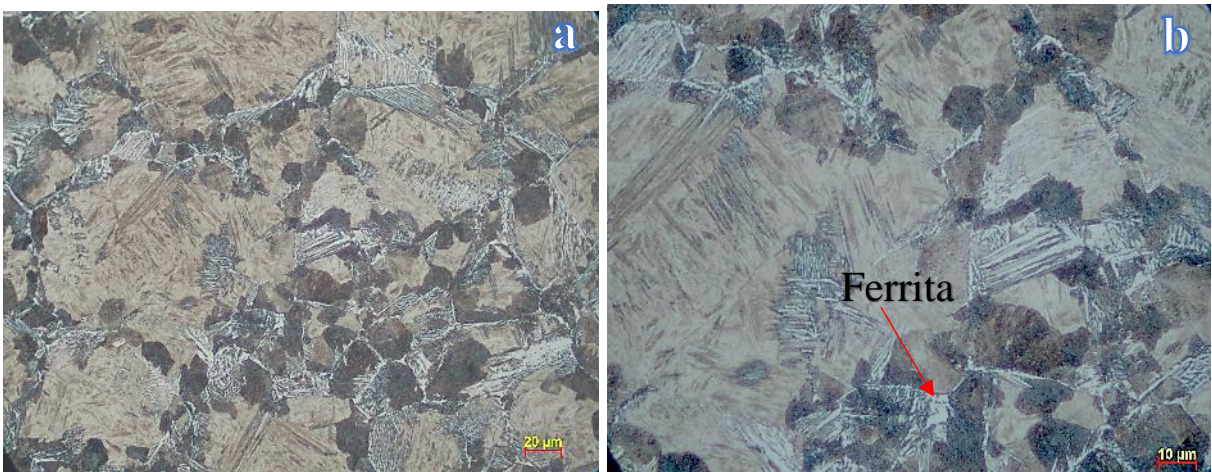


Figura 43. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045, correspondiente al nanofluido #6, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

La figura 44a-44b de la probeta enfriada en el NF#9, se puede apreciar una microestructura de zonas ferrita acicular y algunas zonas de bainita en una matriz martensítica, así como se aprecia una descarburación total en esta zona, se pueden ver zonas bastas de ferrita, esto se refleja en la dureza, una dureza de baja escala.

Para la figura 45a-45b área del núcleo de la probeta enfriada en el NF#9, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita, se observa menor cantidad que en la superficie, más presenta la fase perlítica en coalescencia, se puede ver una insípida fase de martensítica.

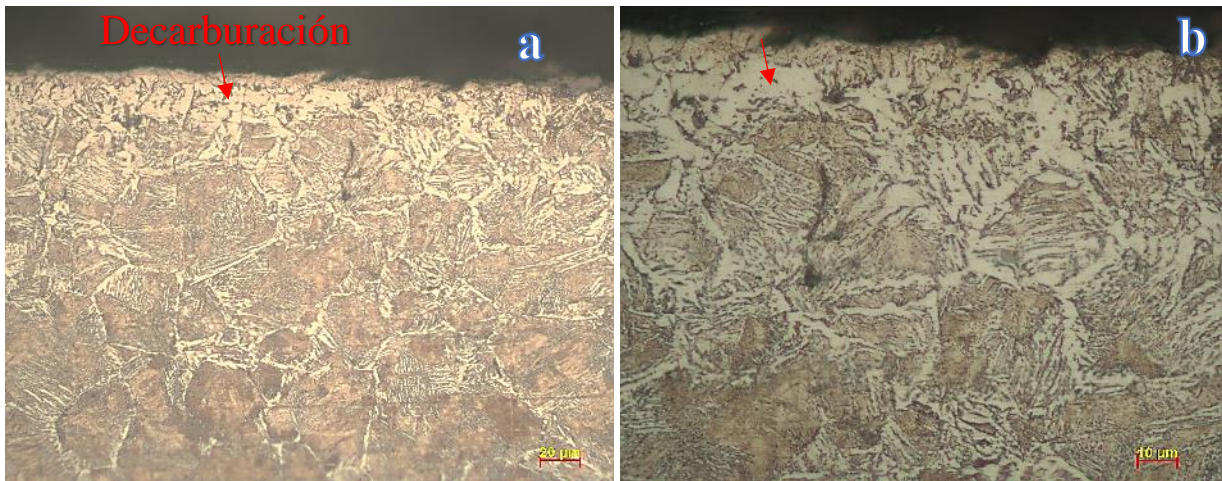


Figura 44. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#9, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

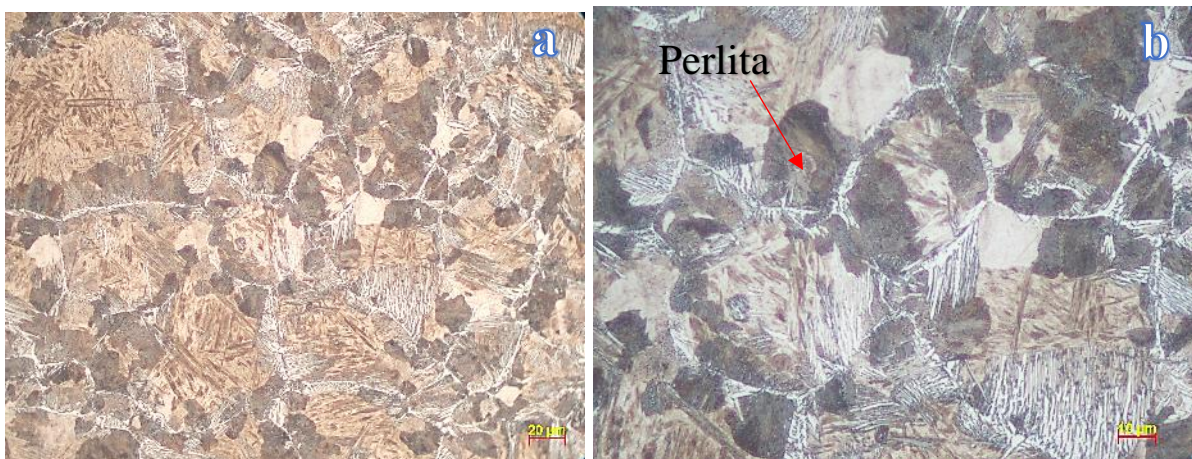


Figura 45. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#9, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

La figura (46a-46b) de la probeta enfriada en el NF#12, se puede apreciar una microestructura de zonas de perlita, ferrita y algunas zonas de bainita en una matriz martensítica en la zona de la superficie, se pueden ver zonas bastas de ferrita, esto se refleja en la dureza.

En la figura 47a-47b que corresponde al área del núcleo de la probeta enfriada en el NF#12, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita con respecto a la superficie, así como podemos ver la fase de perlita en la matriz de martensita revenida.

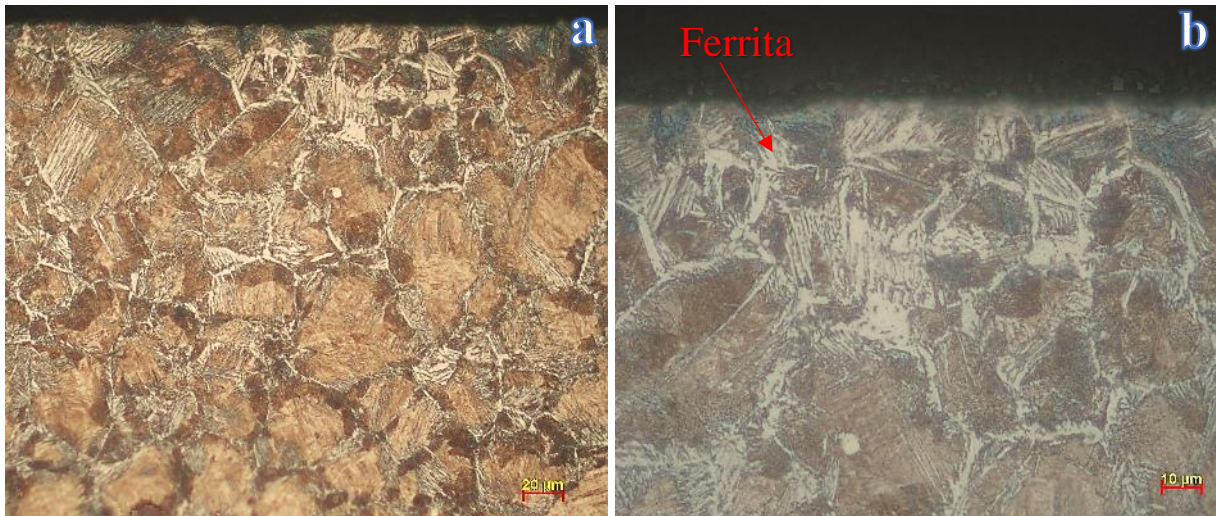


Figura 46. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#12, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

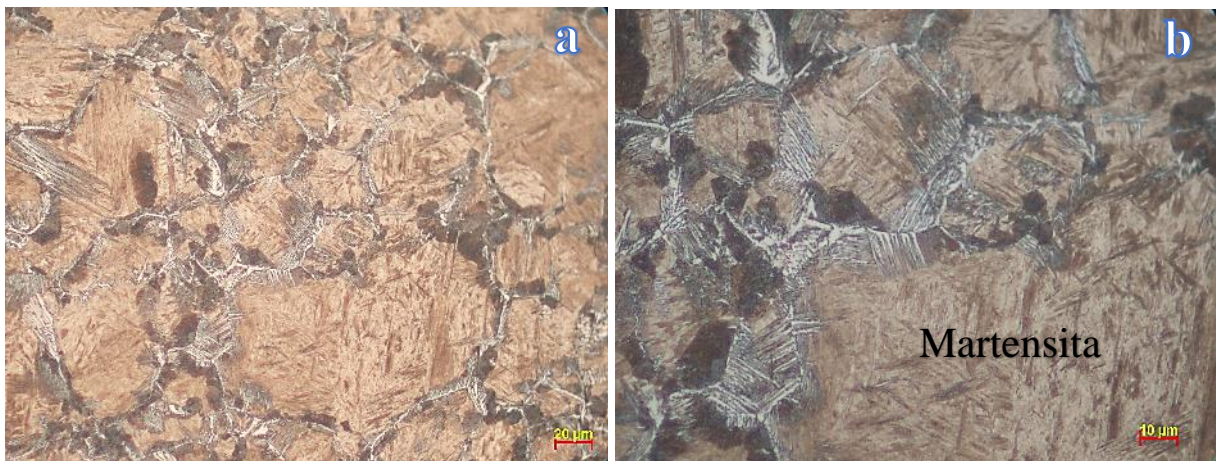


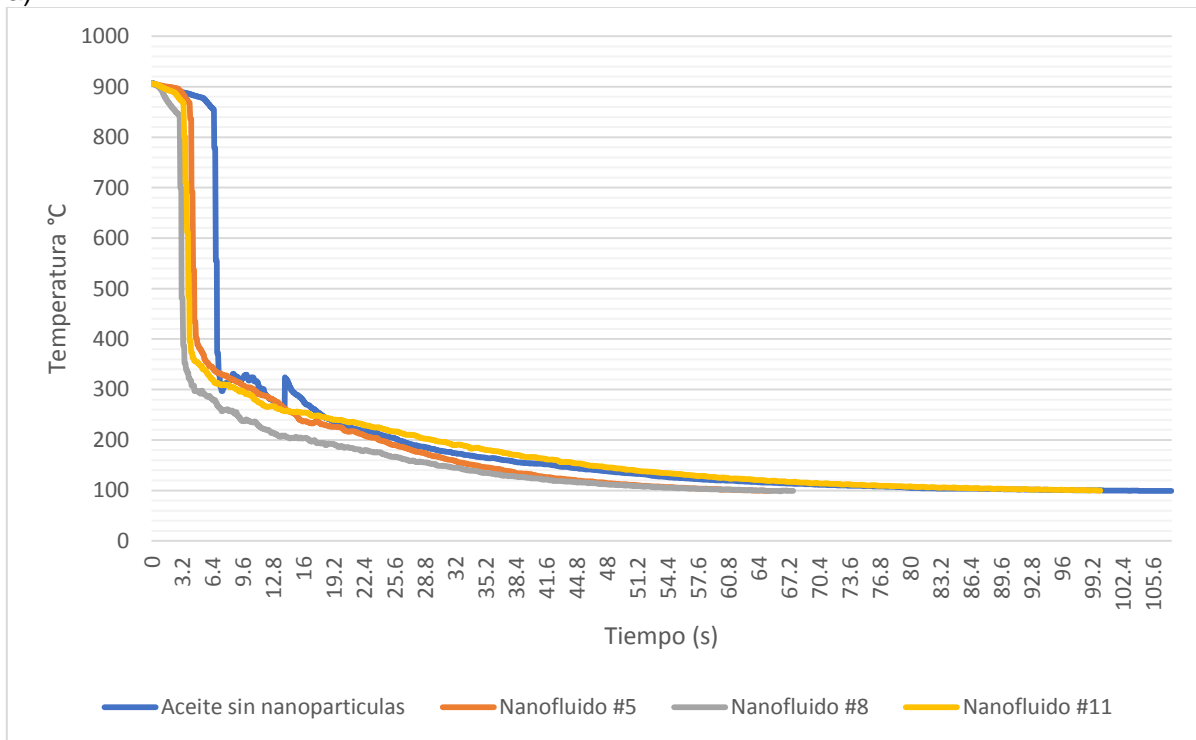
Figura 47. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#12, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

Las tres probetas presentan resultados diferentes, la muestra nanofluido #9 es la que presenta mayor cantidad de ferrita, las colonias de perlita son bastas, por lo que se puede mencionar que el enfriamiento no fue lo suficientemente severo para generar la transformación martensítica. Mientras que para la probeta NF#6 presenta una menor cantidad de ferrita, las colonias de perlita se observan en menor proporción así como en tamaño de la colonia, tomando como referencia la probeta con NF#9 Para la muestra del nanofluido #12, presenta una microestructura similar a la NF#6, más sin embargo la ferrita es menor, se tienen mayor proporción de martensita, que bien es lo que se busca en el tratamiento térmico de temple.

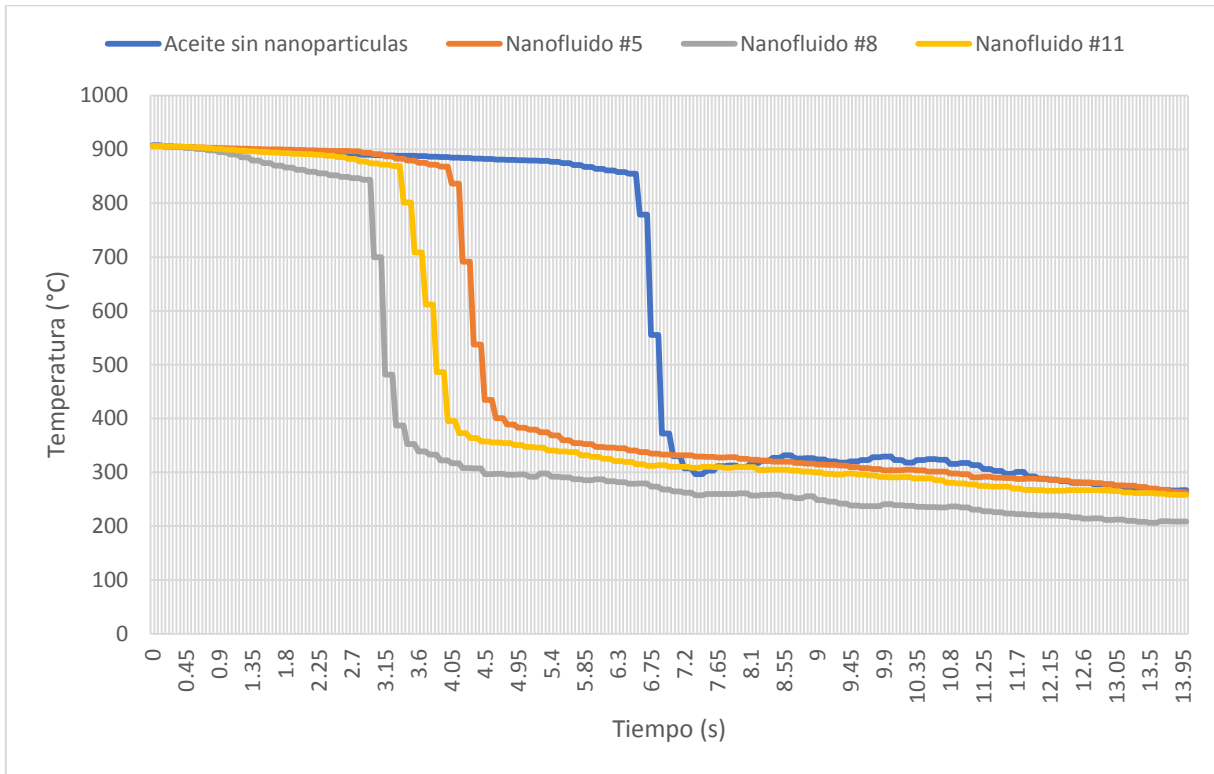
### 5.2.6. Curvas de enfriamiento nanofluidos #5, #8 y #11

La grafica 8 (a-b) muestra las curvas de enfriamiento de las probetas en los nanofluidos #5, #8 y #11, así como el aceite base, sin nanopartículas. Los nanofluidos presentan un comportamiento similar, con respecto al aceite base. Sin embargo, en la gráfica 8b, se reduce la escala de tiempo para obtener una mejor perspectiva del enfriamiento, el nanofluido #8 tiene una mayor velocidad de enfriamiento de  $1207.4^{\circ}\text{C/s}$ , el nanofluido #5 se encuentra cercano a la velocidad del FB, presenta una velocidad de enfriamiento de  $995.91^{\circ}\text{C/s}$  y  $999.49^{\circ}\text{C/s}$ , respectivamente, mientras que el NF#11 con  $631.1^{\circ}\text{C/s}$ .

a)



b)



Grafica 8. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #5, #8 y #11, respectivamente, para un %peso\_np=0.5 y un %peso\_span80=0.

b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de  $T_{max}$  a 700°C.

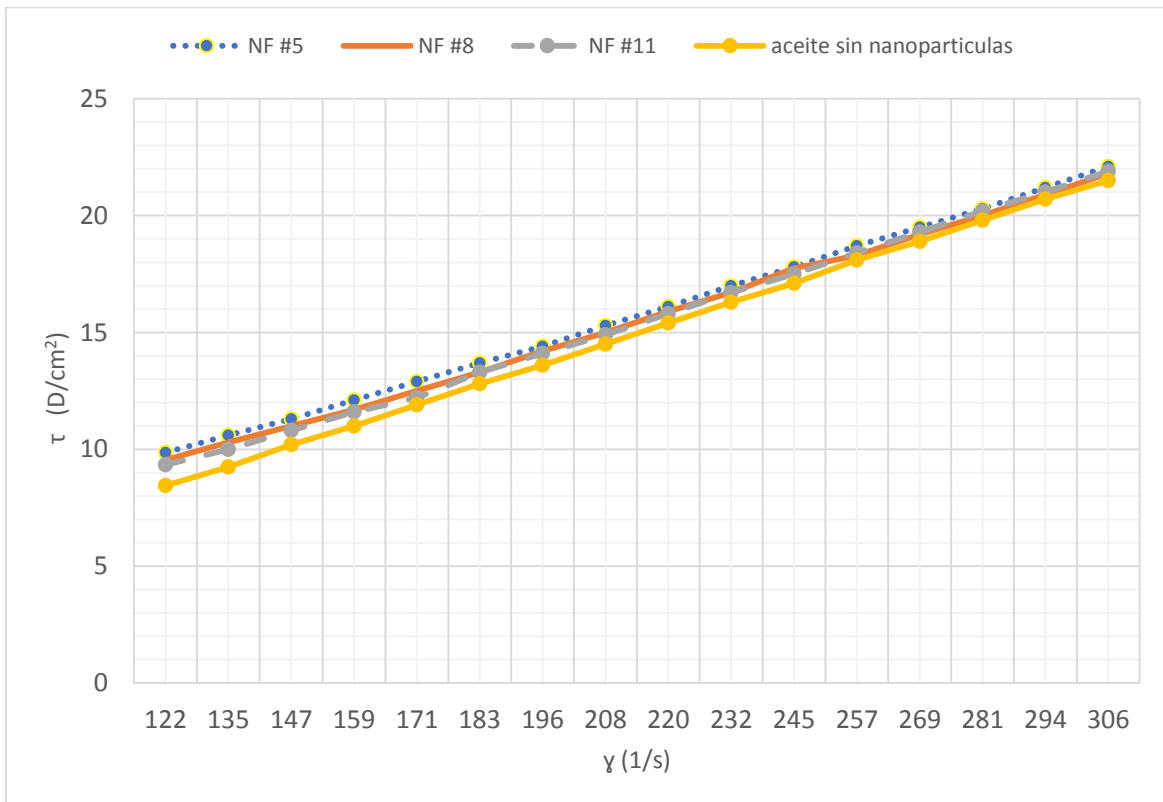
En la tabla 9 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 9. Velocidades de enfriamiento a  $T_{max}=700^{\circ}\text{C}$  para nanofluidos #5, #8 y #11

Expresiones lineales t-T			
NF#5	NF#8	NF#11	FB
$T=995.91t+4921.1$	$T=1207.4t+4357.5$	$T=631.1t+2979.4$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C (°C/s)			
995.91	1207.4	631.1	999.49

### 5.2.7. Prueba de Viscosidad nanofluidos #5, #8 y #11

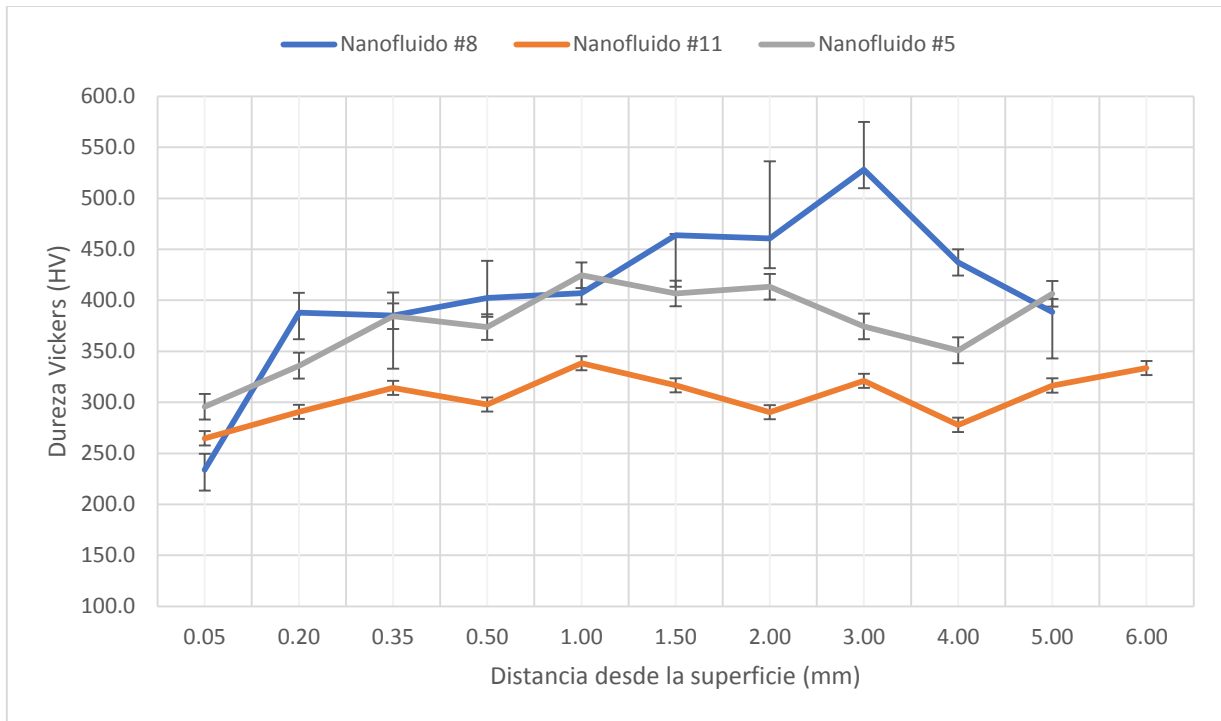
De los resultados presentados en la gráfica 9, se obtienen valores muy similares entre nanofluidos, podemos apreciar la tendencia de un fluido newtoniano.



Gráfica 9. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#5, NF#8 y NF#11.

### 5.2.8. Perfil de Dureza nanofluidos #5, #8 y #11

Como se puede observar los valores de dureza de la gráfica 10, el nanofluido #8, es el que presenta un mayor dureza, sin embargo aparentemente se observa descarburación en la superficie, ya que inicia con dureza menor a 250HV, para los nanofluidos #5 y #11, presentan durezas por debajo de los 250 HV, lo que indica descarburación en la superficie, se observa la misma tendencia, más no alcanzan durezas superiores a 400HV, el nanofluido #11 no alcanza los 350 HV, más sin embargo, presenta una menor dispersión en los resultados de los valores de dureza, lo contrario a los otros dos nanofluidos.



Grafica 10. Perfil de dureza Vickers para los NF#5, NF#8 y NF#11, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.2.9. Microestructura nanofluidos #5, #8 y #11

La figura 48a-48b de la probeta NF#5, se puede apreciar una microestructura de martensita, pequeñas zonas de perlita, ferrita y algunas zonas de bainita.

Para la figura 49a-49b el área del núcleo de la probeta NF#5, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita, se observa menor cantidad que en la superficie, así como podemos ver lo mismo para las pequeñas fases de perlita en la matriz de martensita.



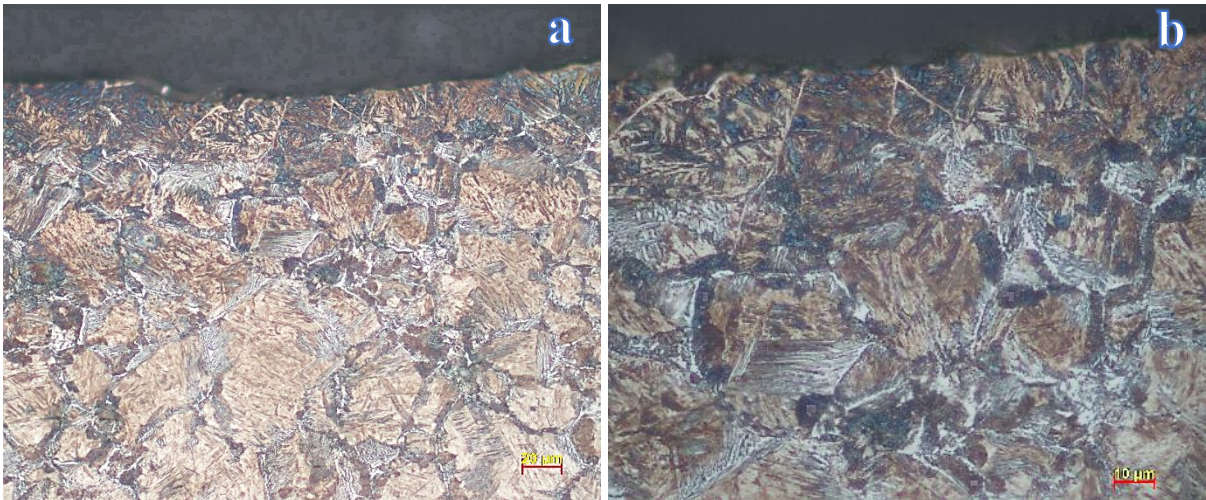


Figura 48. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#5, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

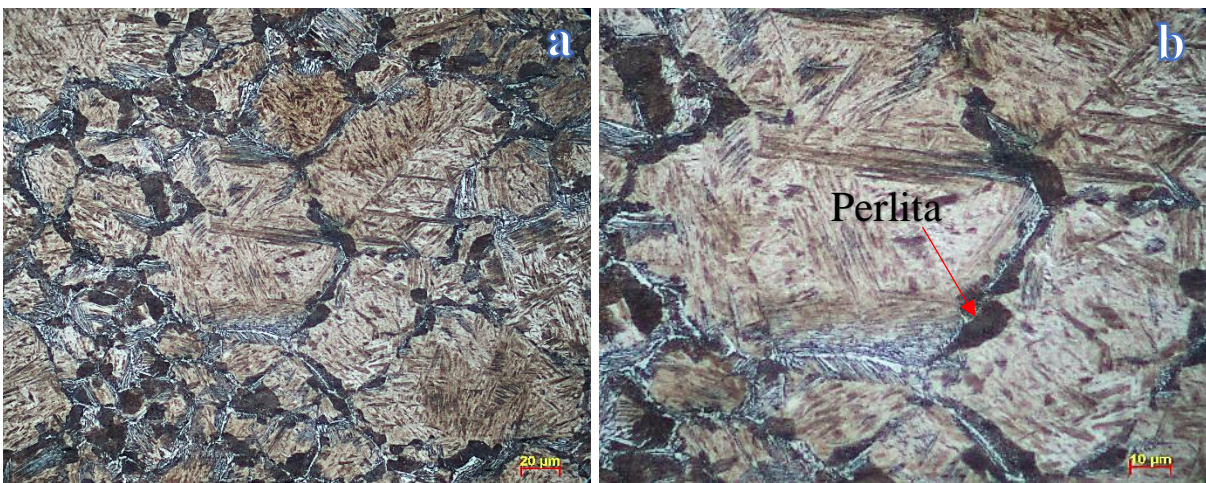


Figura 49. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#5, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

La Figura 50a-50b de la probeta NF#8, se puede apreciar una microestructura de ferrita más pequeñas zonas de perlita distribuidas aleatoriamente en una matriz de martensita, la presencia de ferrita se traduce en una descarburación de la superficie.

La figura 51a-51b muestra el área del núcleo de la probeta NF#8, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita, se observa menor cantidad que en la superficie, así como la fase de perlita en la matriz de martensita revenida, se alcanzan a notar algunas zonas de bainita.

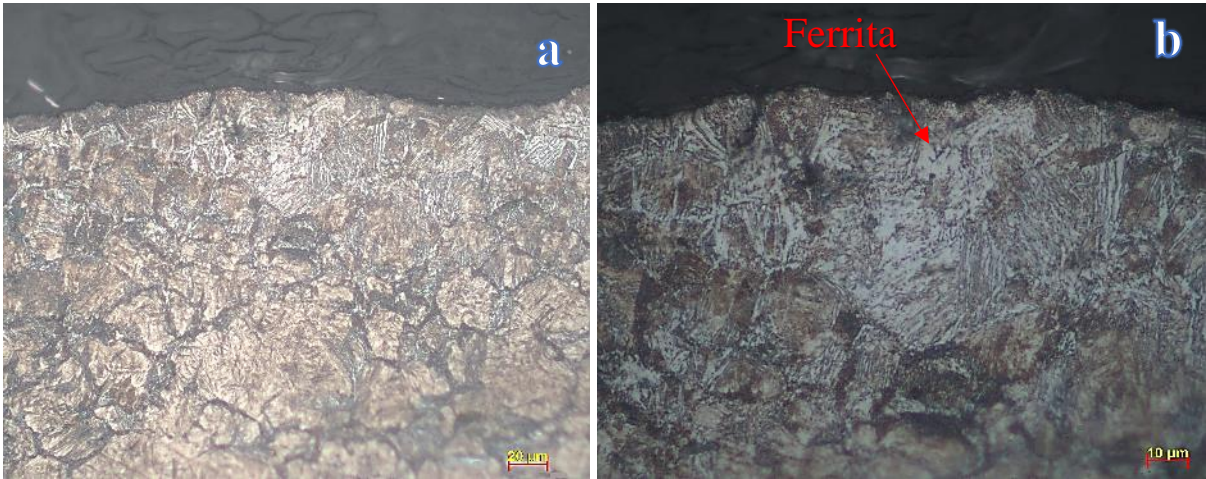


Figura 50. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#8, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

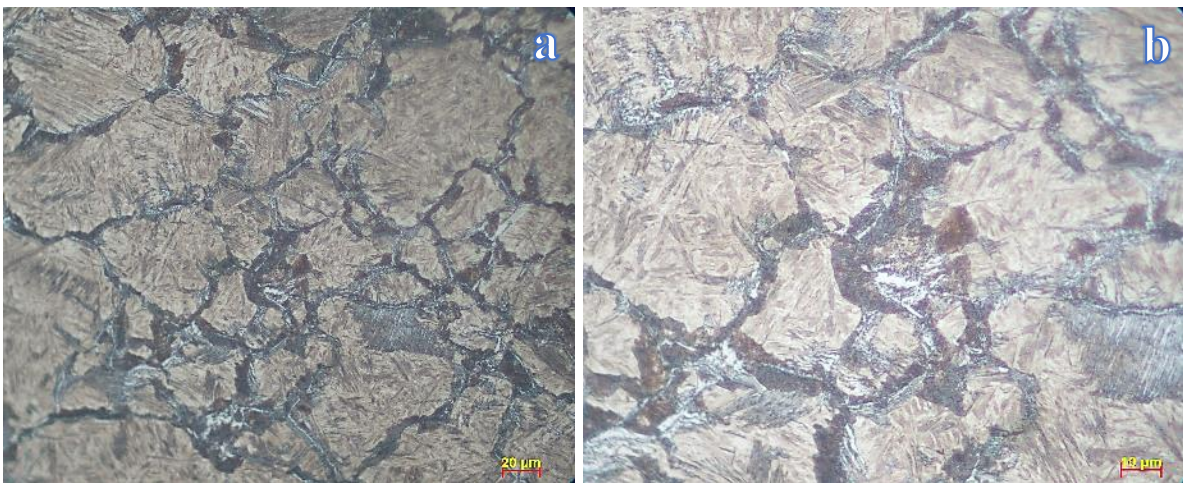


Figura 51. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#8, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

La figura 52a-52b de la probeta NF#11, se puede ver una microestructura de martensita más pequeñas fases de perlita y ferrita delineando el grano austenítico.

La figura 53a-53b muestra el área del núcleo de la probeta NF#11, presenta una microestructura similar a la de la superficie, sin embargo, la ferrita es de menor cantidad y en zonas aleatorias se observan colonias de perlita de mayor tamaño, en comparación con la superficie.

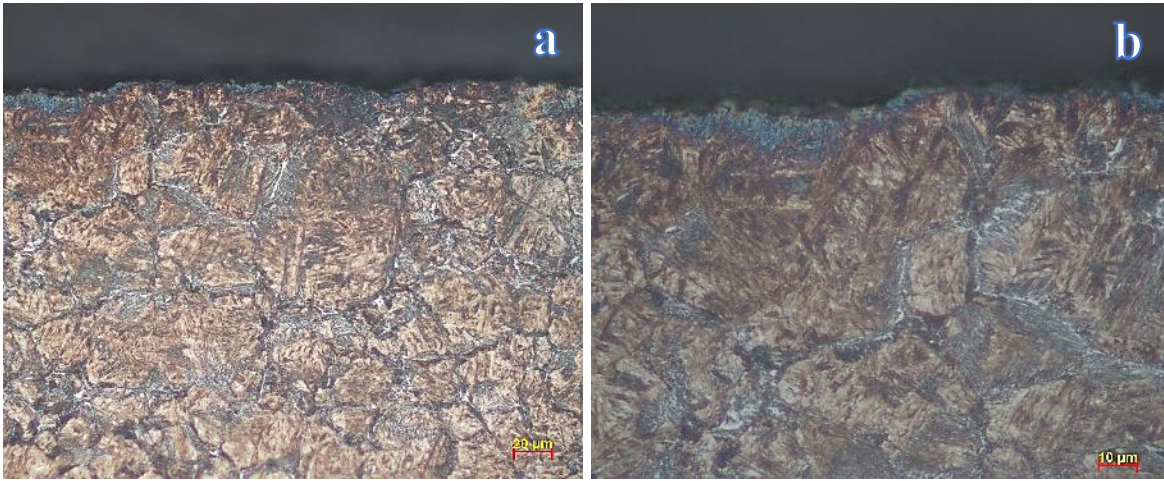


Figura 52. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#11, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

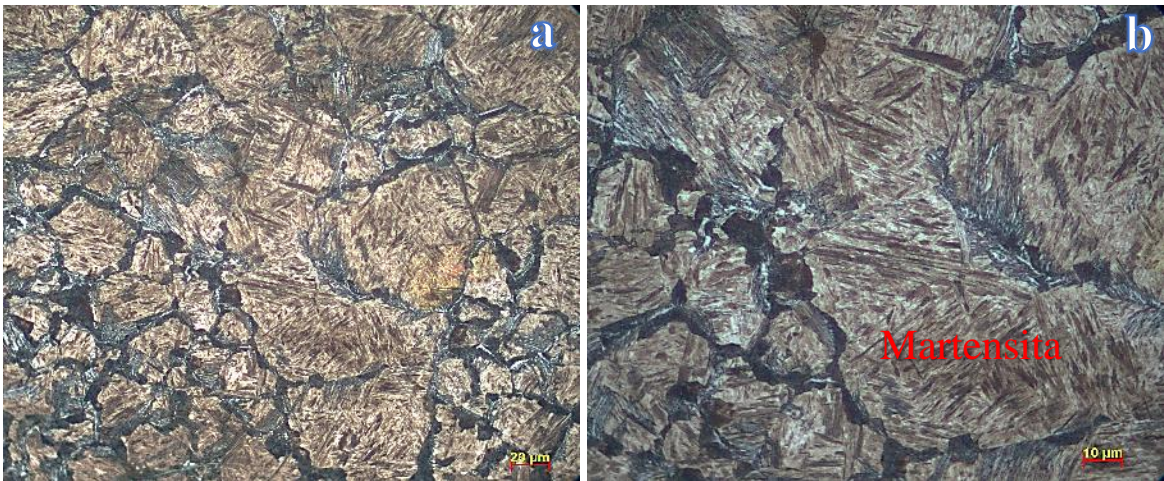


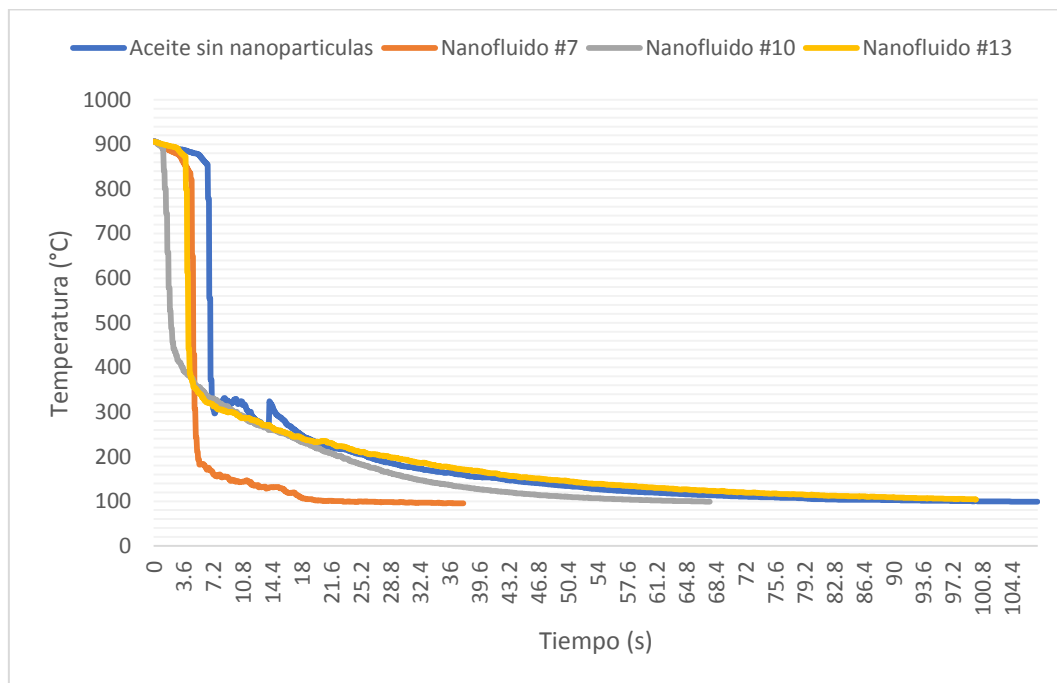
Figura 53. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#11, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

La probeta templada con el nanofluido #11, se considera la de mejor transformación, puesto que se tienen menor cantidad de perlita así como de ferrita, ya que la intención del tratamiento térmico es obtener una sola fase, idealmente martensita. Las probetas con nanofluidos #5 y #8, presentan una mayor cantidad de ferrita y perlita, así como zonas de perlita de mayor tamaño.

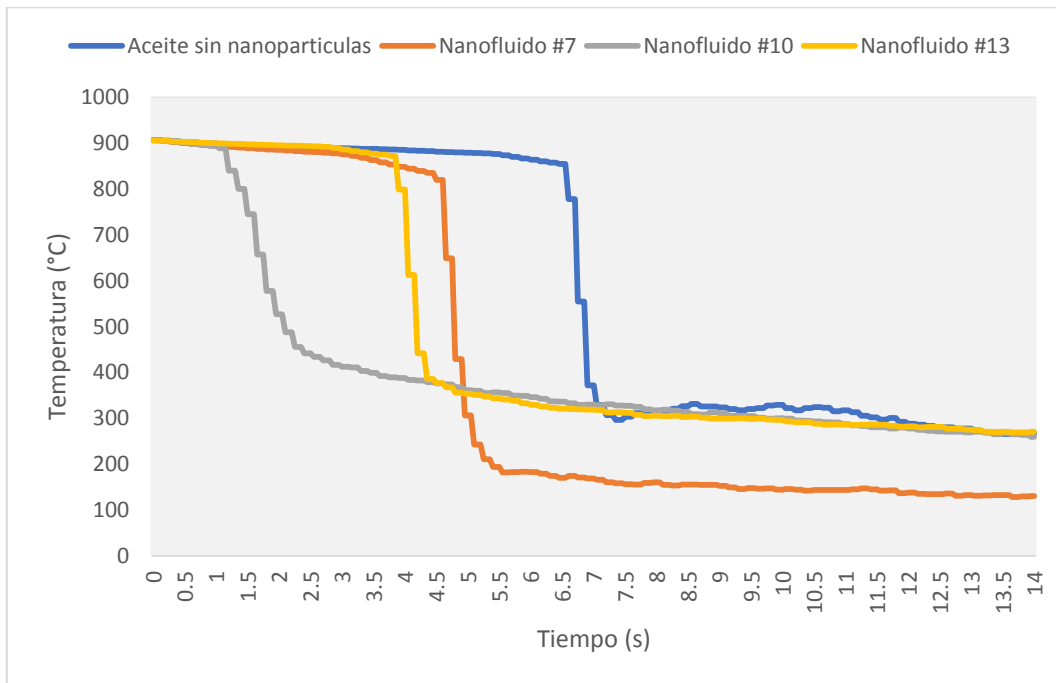
### 5.2.10. Curvas de enfriamiento nanofluidos #7, #10 y #13.

La grafica 11 muestra las curvas de enfriamiento de las probetas en los nanofluidos #7, #10 y #13, así como el aceite base, sin nanopartículas. Comparando los nanofluidos #7 y #13 se aprecia una curva de comportamiento similar respecto a los tiempos de enfriamiento. También se puede ver que se tiene similitud entre NF #10 y NF#13, ya que mantienen un enfriamiento lento a partir de los 300°C, como se puede ver en la gráfica 11b, donde se reduce la escala del tiempo para obtener mayor información del enfriamiento. El nanofluido #7 es el que presenta una velocidad de enfriamiento mayor a 1304.3 °C/s, mientras que los NF#10 y #13 presentan 475.71 °C/s y 865.94 °C/s, respectivamente, quedando por debajo del FB, con 999.45 °C/s.

a)



b)



Grafica 11. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 variando el tiempo de ultrasonido, 30min, 60min y 120min para los nanofluidos #7, #10 y #13, respectivamente, para un %peso\_np=0.5 y un %peso\_span80=1

b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de  $T_{max}$  a 700°C.

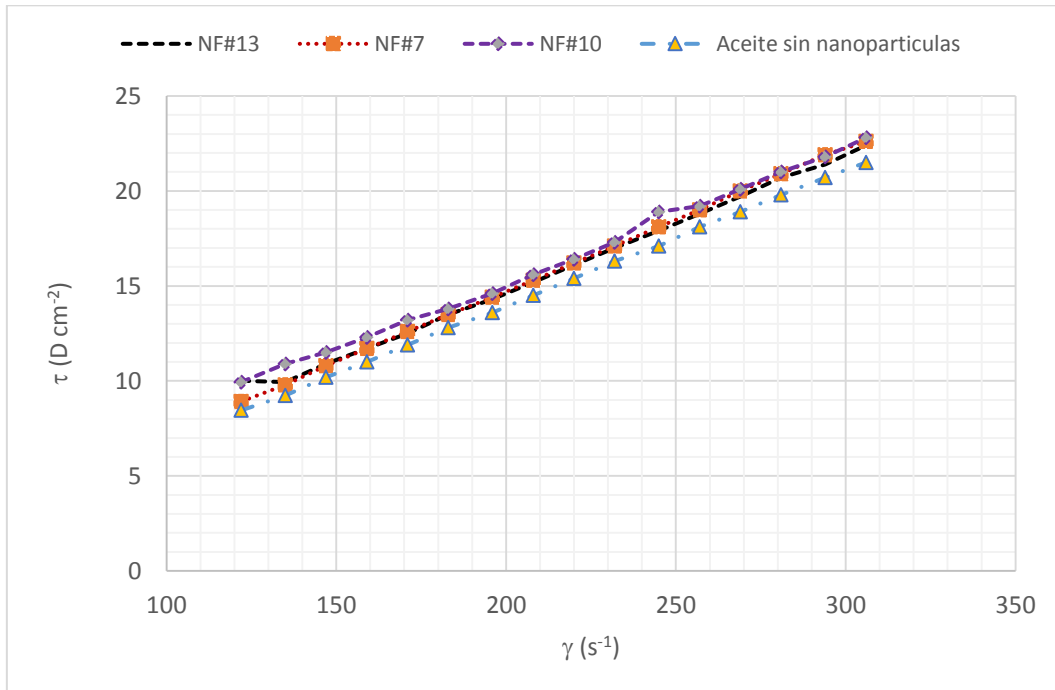
En la tabla 10 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 10. Velocidades de enfriamiento a  $T_{max}=700^{\circ}\text{C}$  para nanofluidos #7, #10 y #13

Expresiones lineales t-T			
NF#7	NF#10	NF#13	FB
$T=1304.3t+6763.1$	$T=475.41t+1471.5$	$T=865.94t+4182.5$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C (°C/s)			
1304.3	475.71	865.94	999.49

### 5.2.11. Prueba de Viscosidad nanofluidos #7, #10 y #13

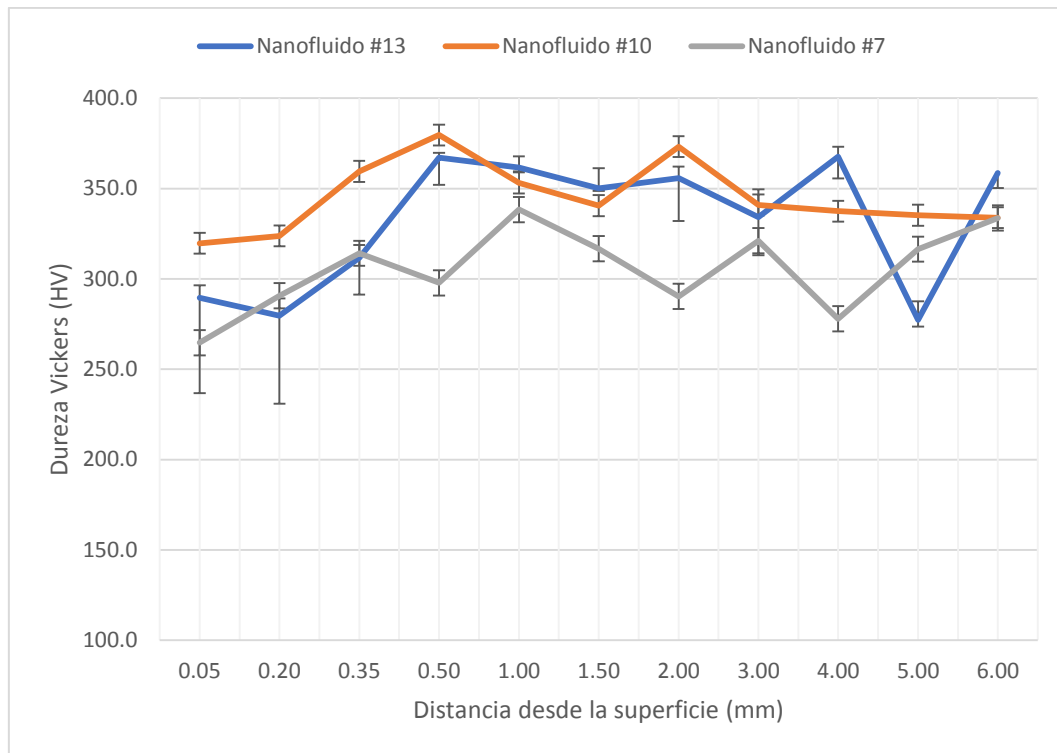
De los resultados presentados en la gráfica 12, se concluye el comportamiento newtoniano de los nanofluidos.



Grafica 12. Comportamiento del esfuerzo contra la razón de deformación para los NF#7, NF#10 y NF#13, así como del fluido base.

### 5.2.12. Perfil de Durezas nanofluidos #7, #10 y #13

Como se puede observar los valores de dureza para los nanofluidos #7 y #13, presentan una dureza por debajo de los 300 HV y puntos superiores a los 350 HV, se observan valores muy similares entre estas dos muestras, para la probeta #10 los valores de dureza se observan superiores por encima de los 300HV manteniendo una dureza mayormente homogénea, lo que se podrá corroborar con la microestructura.



Grafica 13. Perfil de dureza Vickers para los NF#7, NF#10 y NF#13, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.2.13. Microestructura nanofluidos #7, #10 y #13

De la figura 54a-54b, para la probeta NF#7, se aprecia una microestructura de zonas de perlita, bainita y algunas pequeñas zonas de ferrita en una matriz martensítica en la zona de la superficie.

Para la figura 55a-55b que muestra el área del núcleo de la probeta NF#7, se aprecia una microestructura similar a la anterior, solo que las colonias de perlita son más grandes en esta zona, así como las zonas de bainita en una matriz martensítica.

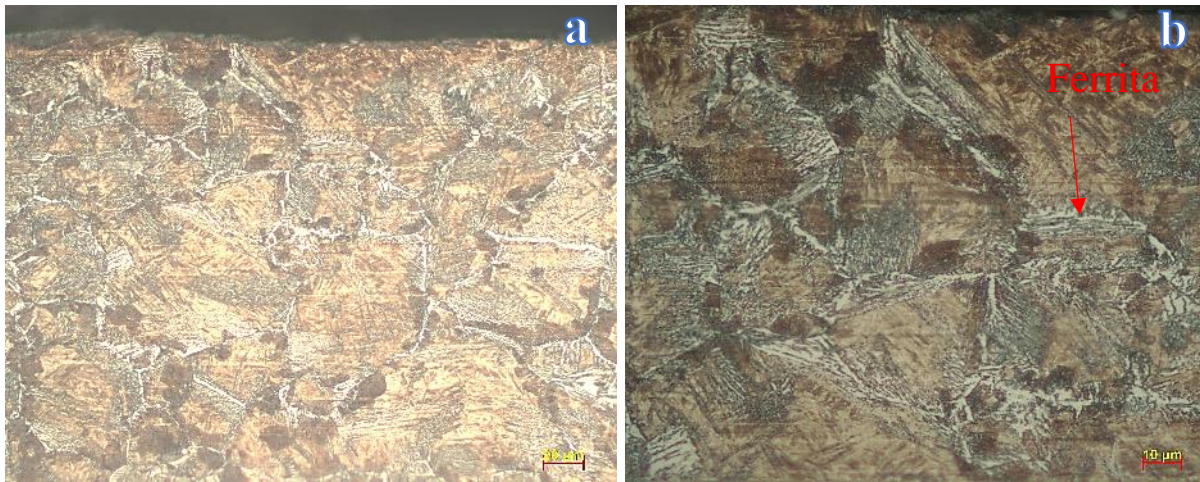


Figura 54. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#7, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

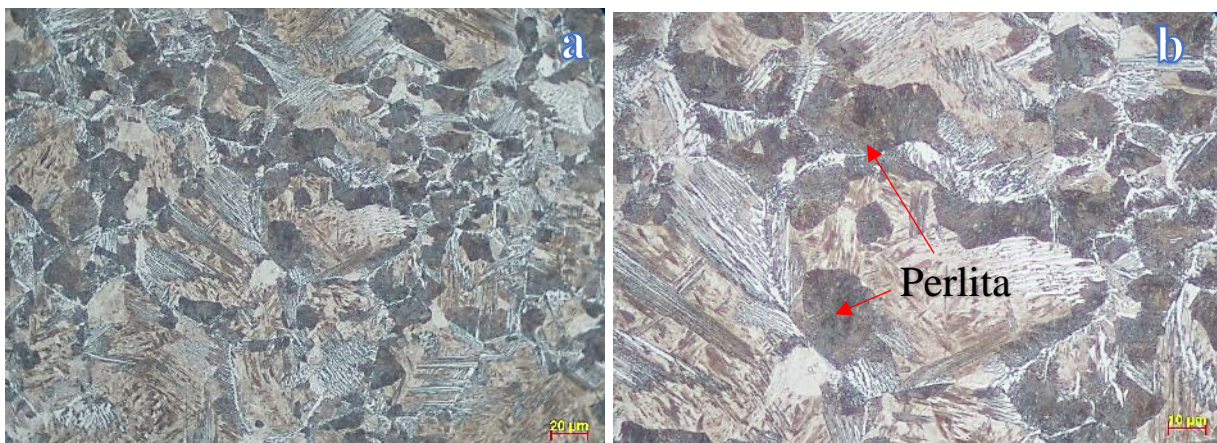


Figura 55. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#7, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

De la figura 56a-56b para la probeta NF#10, se aprecia una microestructura de zonas de perlita, bainita y algunas zonas de ferrita en una matriz martensítica en la zona de la superficie.

Para la figura 57a-57b que muestra el área del núcleo de la probeta NF#10, se puede ver una reducción en la cantidad de zonas de ferrita, se observa menor cantidad que en la superficie, las colonias de perlita aumentan de tamaño, se puede notar mayor cantidad de zonas de bainita en la matriz de martensita.



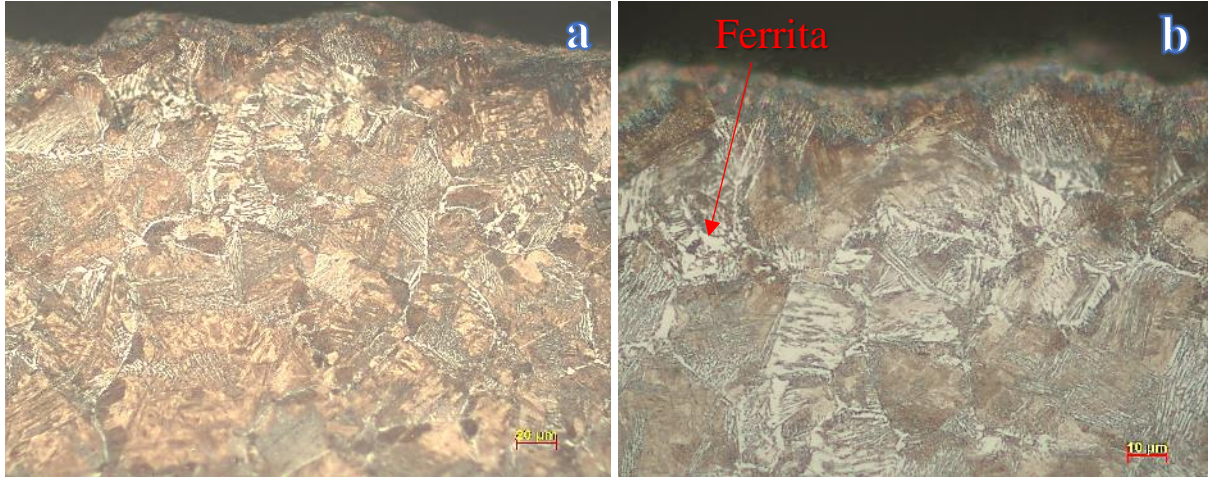


Figura 56. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#10, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

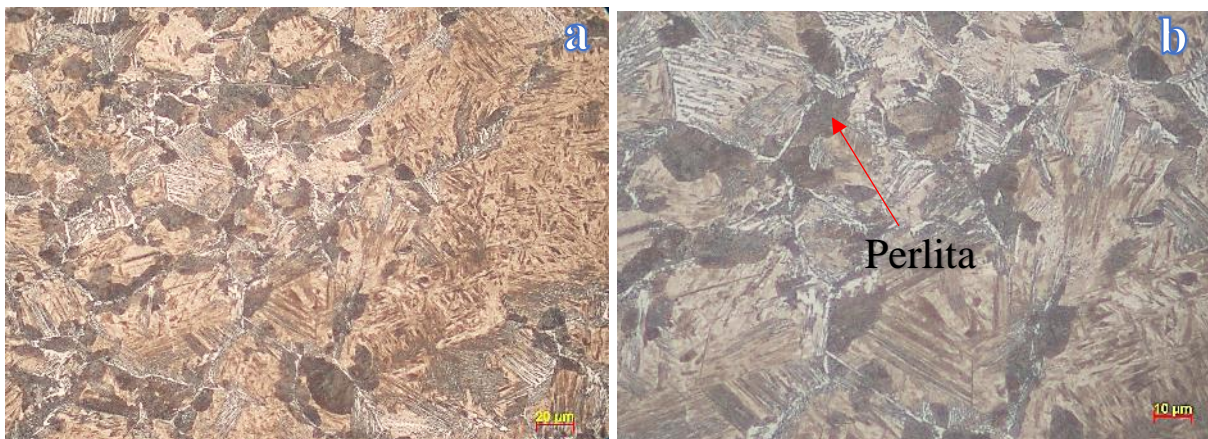


Figura 57. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#10, tomada a: a) 500X y b) 1000X

De la figura 58a-58b para la probeta NF#13, se aprecia una microestructura de zonas de perlita, bainita y algunas zonas de ferrita en una matriz martensítica en la zona de la superficie.

Para la figura 59a-59b que corresponde al área del núcleo de la probeta NF#13, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, las colonias de perlita son más grande en esta zona, la ferrita delinea el límite grano austenítico, la bainita es evidente en esta zona ferrítica.

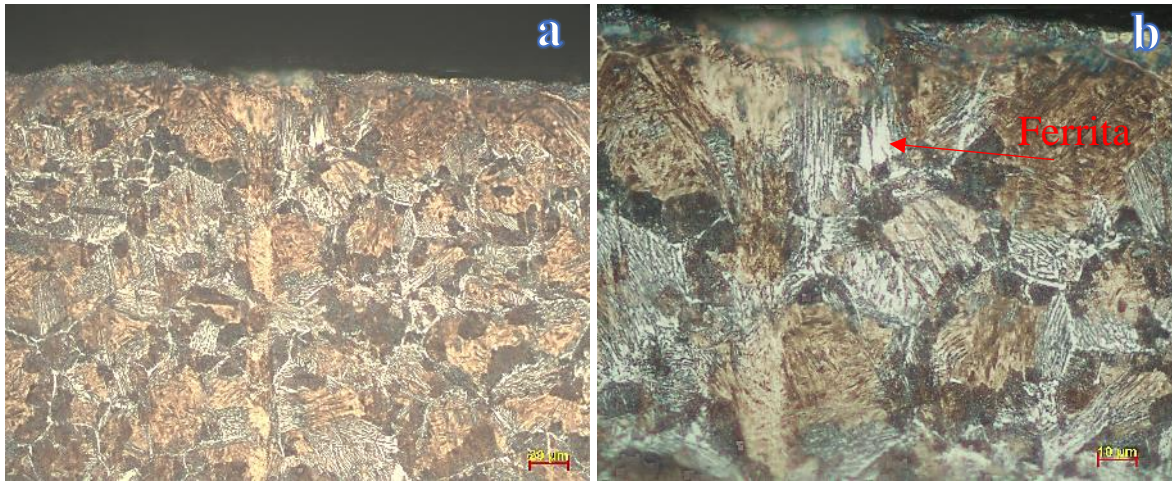


Figura 58. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#13, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

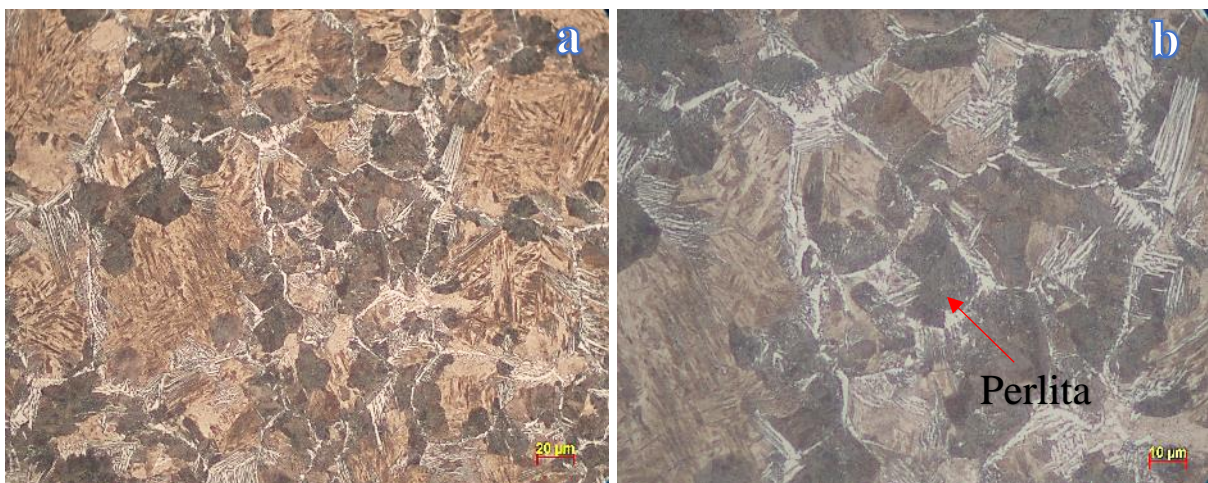


Figura 59. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#13, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

#### 5.2.14. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos de la fase 2.

La tabla 11 presenta los resultados de la difusividad térmica para los nanofluidos y fluido base, los valores provienen de la sustitución de los parámetros en la ecuación 4.4.1. Se aprecia que el valor de la difusividad térmica para el NF#11 es mayor que el NF#5 y NF#8 que comparten parámetros de preparación, siendo el NF#11 el que contiene mayor tiempo de ultrasonido. En el caso del NF#12 presenta una mayor difusividad térmica que NF#6 y NF#9 que comparten valores de preparación similares con la adición del surfactante. De la última tercia de NF, se obtiene que el NF#13 es de mayor valor, en comparación con los NF#10 y NF#7, en estos últimos la cantidad de surfactante es mayor de acuerdo con tabla 7. Los valores anteriores se basan tomando como referencia el valor reportado del fluido base. Los resultados obtenidos son valores promedio de 3 mediciones realizadas a cada espécimen.

Tabla 11. Resultados de Difusividad térmica.

$f$ (Hz)	B	$\alpha$ $10^{-04}$ (cm <sup>2</sup> /s)	NF#
5.1	178.83	5.01	5
3.9	128.67	7.40	6
4.1	119.23	9.06	7
4.3	168.11	4.78	8
4.2	128.67	6.15	9
4.9	139.41	7.92	10
3.9	154.69	5.12	11
4.5	135.85	7.66	12
3.2	100.26	10.0	13
5.1	287.38	1.94	FB

### 5.2.15. Medición de Nanopartículas por Zetasizer.

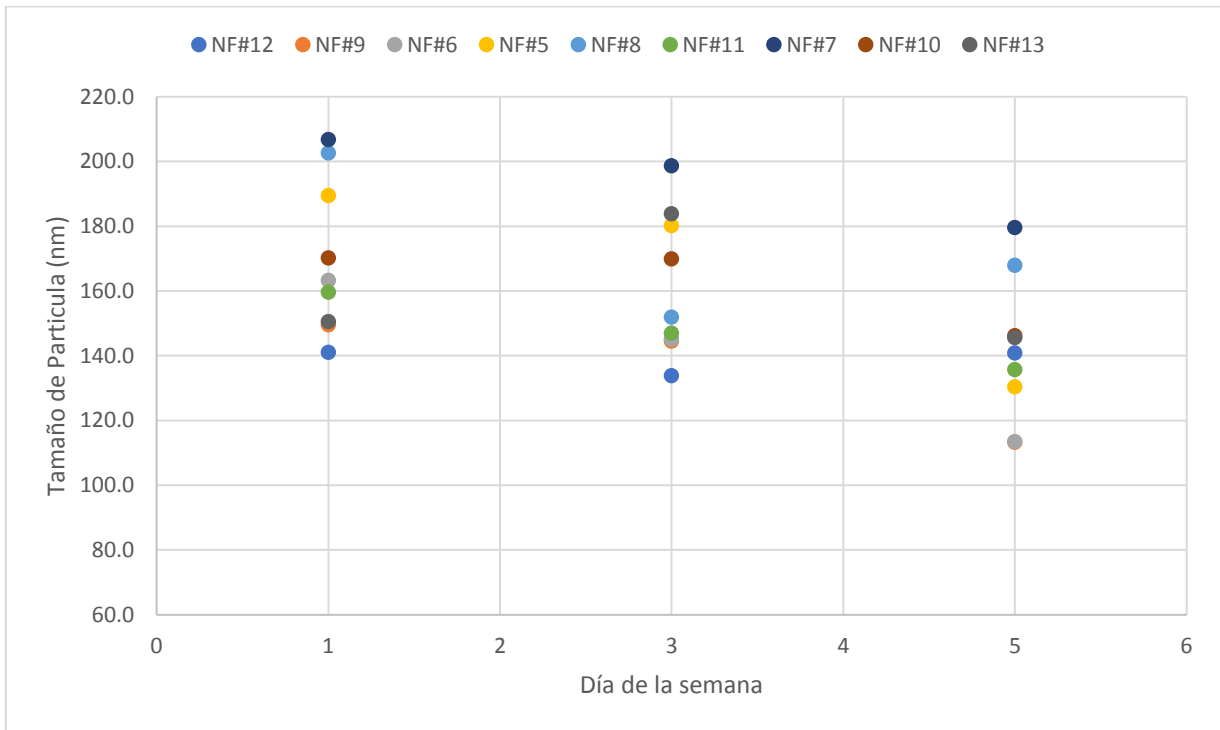
Los resultados de las mediciones por el equipo Zetasizer Nano-S, proveen valores del tamaño de partícula en promedio de 3 mediciones en diferentes días del nanofluido. Dichos valores se expresan en nanómetros.

En la tabla 12, se presentan los resultados de los nanofluidos preparados en esta fase. La columna de los días indica que estos fueron sometidos a la prueba en diferentes días, por lo que se puede ver el tamaño de partícula a lo largo de una semana, lo cual indicaría un criterio de estabilidad en el NF. Los resultados arrojados por el equipo muestran valores similares entre fluidos para los NF# 6, 9 y 12, ligeramente por encima el NF#6. Para los NF# 5, 8 y 11, hay una similitud entre el NF#5 y NF#8, mientras que para el NF#11, muestra un menor tamaño de partícula, lo que se traduce en una mejor dispersión de las nanopartículas y al no mostrar un incremento sustancial del tamaño de partícula al transcurrir los días es un indicativo de la estabilidad del fluido. Para la última terna, NF#7, 10 y 13, el NF#7 presenta un mayor tamaño de partícula, mientras que los NF#10 y NF#13 muestran resultados similares, con menor tamaño.

En la gráfica 14 presentan los valores de tamaño de partícula con respecto al tiempo, para la fase 2.

Tabla 12. Pruebas experimentales de los nanofluidos de fase 2.

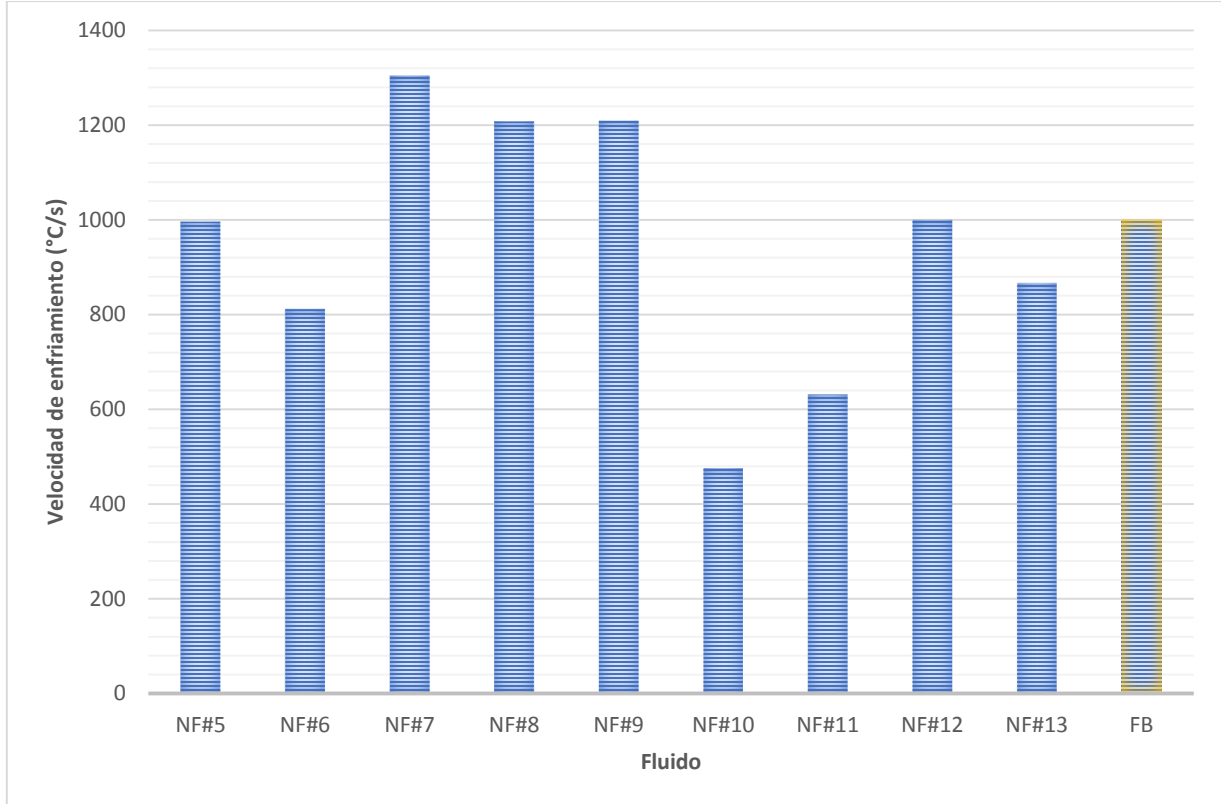
#NF	Tiempo de Ultrasonido (min)	% En Peso de NP	% En Peso de Surfactante (Span80)	Tamaño de Partícula			Promedio	Desviación Estándar
				Día de Prueba				
				1	3	5		
NF#6	30	0.5	0.5	163.3	145.1	113.4	140.6	25.253
NF#9	60	0.5	0.5	149.5	144.5	113.2	135.7	19.674
NF#12	120	0.5	0.5	141.0	133.8	140.8	138.5	4.100
NF#5	30	0.5	0.0	189.5	180.2	130.3	166.7	31.829
NF#8	60	0.5	0.0	202.6	151.9	167.9	174.1	25.932
NF#11	120	0.5	0.0	159.6	147	135.7	147.4	11.957
NF#7	30	0.5	1.0	206.7	198.6	179.6	195.0	13.949
NF#10	60	0.5	1.0	170.2	169.9	146.1	162.1	13.811
NF#13	120	0.5	1.0	150.5	183.9	145.5	160.0	20.837
				Nanómetros	Nanómetros	Nanómetros		



Grafica 14. Monitoreo del tamaño de partícula (Considerando el día 1 como el día de preparación del nanofluido).

#### 5.2.16 Discusión de los resultados de la fase 2.

En la Grafica 15 se presentan las velocidades de enfriamiento de la probeta de acero en los diferentes NF de la Fase 2. Los resultados de la fase 2, muestran que el NF#7 es el que presenta una mayor velocidad de enfriamiento con 1300°C/s, posteriormente el NF#8 y NF#9, con 1200°C/s. Los NF#5 y NF#12, presentan 990°C/s cercanos al valor del FB con 999°C/s, mientras que el NF#14 rebasa los 1000°C/s.



Grafica 15. Velocidad de enfriamiento de los Nanofluidos de la Fase 2

De la comparación entre los nanofluidos NF#5, 8 y 11 que se prepararon con un tiempo de sonicación de 30, 60 y 120min respectivamente sin surfactante, de acuerdo a la tabla 7, se puede destacar como el mejor el NF#8 alcanzando una velocidad de enfriamiento de 1207.4 °C/s, para el NF#5 y NF#11, presentan una velocidad de enfriamiento a 995.91 y 631.1 °C/s, cabe mencionar que el FB obtiene una velocidad de enfriamiento de 999.45 °C/s, por lo que estos últimos se quedan debajo de este valor. En la parte de la difusividad térmica el NF# 11 es ligeramente mayor al NF#5, mientras que el NF#8, es el menor de los 3. Para la parte de propiedades mecánicas y metalúrgicas del acero, se puede ver una mayor dureza para el NF#8, posterior el NF#5 y al final el NF#11, esto se puede corroborar con la microestructura encontrada en las 3 probetas tratadas con estos NFs, presentan la misma estructura martensita más fases de ferrita y perlita, pero se destaca la probeta tratada con el NF#8, puesto que las colonias de perlita son de menor tamaño y cantidad, de ahí la mayor dureza.

De la comparación entre los NF#6, 9 y 12 donde de acuerdo a la tabla 7, se preparan con 0.5% en peso de surfactante y tiempos de ultrasonido de 30, 60 y 120min respectivamente,

se puede destacar el NF#9 como el de mayor velocidad de enfriamiento, alcanzando 1209.1 °C/s, el NF#6 y NF#12 reportan 841.4 °C/s y 999.49 °C/s respectivamente. La difusividad térmica el NF# 12 es ligeramente mayor al NF#6, mientras que el NF#9, es el menor de los 3. Para la parte de propiedades mecánicas y metalúrgicas del acero, se puede ver una mayor dureza para el NF#6, posterior el NF#12 y al final el NF#9, más el NF#12 es el que presenta una dureza más homogénea, con menor tendencia como sus semejantes. Esto se puede corroborar con la microestructura encontrada en las 3 probetas tratadas con estos NFs, presentan la misma estructura martensita más fases de ferrita y perlita, pero se destaca la probeta tratada con el NF#12, puesto que las colonias de perlita son de menor tamaño y cantidad, de ahí la dureza homogénea.

Del análisis comparativo de los NF#7, 10 y 13 los cuales tienen 1% en peso de surfactante y tiempos de ultrasonido de 30, 60 y 120 min, respectivamente, se puede destacar que el NF#7 tiene la mayor velocidad de enfriamiento, presenta 1304.3 °C/s, mientras que para el NF#10 y NF#13, obtienen 475.41 y 864.94 °C/s, respectivamente, no obstante estos valores se quedan por debajo del valor de 999.45 °C/s que presenta el FB. La difusividad térmica el NF# 13 es ligeramente mayor al NF#7, mientras que el NF#10, es el menor de los 3. Para la parte de propiedades mecánicas y metalúrgicas del acero, se puede ver una mayor dureza para el NF#10 con dureza más homogénea, le sigue el NF#13 y al final el NF#7 con menor tendencia como sus semejantes, cabe resaltar que ninguno de los NF alcanza los 400HV. Esto se puede corroborar con la microestructura encontrada en las 3 probetas tratadas con estos NFs, presentan la misma estructura martensita más fases de ferrita y perlita, pero se destaca la probeta tratada con el NF#10, puesto que las colonias de perlita son de menor tamaño y cantidad, de ahí la dureza homogénea.

El efecto del surfactante sobre los NF, dejó ver diferencias entre estos, por ejemplo, los NF# 5, 8 y 11, no contienen surfactante, son los NF de mayor dureza, mejor dicho, que alcanzaron puntos con valores dureza, pero su dureza no es homogénea. A diferencia de los NF#6, 9 y 12 que contienen el 0.5% de porcentaje en peso de surfactante y el mismo peso que las NP, se puede ver una menor dureza, sin embargo, esta se observa más homogénea.

Como se ha mencionado anteriormente la idea de un tratamiento térmico es mejorar las propiedades mecánicas, en este sentido el análisis microestructural del acero es parte del proceso, la fase de interés es la martensita, la cual es un producto de transformación a partir de las fases suaves, como la Ferrita y Perlita. Las durezas encontradas en los NFs no superaran a los valores encontrados con el FB, sin embargo, en algunos NFs como NF#5 y NF#8, en especial este último, los valores de dureza fueron mejores, cabe mencionar que estos no tienen surfactante, por lo que este aditivo está ocasionando un efecto en el enfriamiento de la probeta de acero, evitando la adecuada transformación de las fases en la microestructura y de esta manera se ve afectada la dureza.

Por otro lado, los NF sin surfactante presentaron menor difusividad térmica, esto para la serie de NF# 5, 8 y 11. Los NF # 7, 10 y 13, presentan los valores mayores de difusividad térmica, lo que se traduce en una mejora para los NF en cuanto a propiedades térmicas, pero como ya se ha mencionado merma la transformación de fases en los aceros.

La preparación de los NFs consta de agitación magnética y homogenización mediante impulsos de alta frecuencia, ultrasonido, en esta fase se presentan nanofluidos preparados con diferentes tiempos de ultrasonido, para evaluar el efecto del tiempo de ultrasonido sobre la dispersión de las nanopartículas, lo cual está relacionado con la estabilidad del nanofluido. Los resultados muestran que un tiempo de ultrasonido de 120min presenta la menor dispersión de los resultados de perfil de dureza.



### 5.3 EFECTO REDUCCIÓN DEL PESO EN SURFACTANTE Y TAMAÑO DE PARTÍCULA (FASE 3).

En esta última fase del proyecto se plantea otro conjunto de experimentos en los cuales se disminuye la cantidad del surfactante y se mantiene constante el tiempo de ultrasonido en 120min, derivado de los resultados de la fase 2, se concluye que la reducción en peso del Span80 podría influir en la transformación de la microestructura (menor cantidad de ferrita o casi inexistente). Otro factor que se incluirá en esta fase es el tamaño de la partícula, se preparan nanofluidos con un tamaño de nanopartícula de 20nm y 50nm, con la intención de estudiar el efecto del tamaño de partícula sobre de la dureza y transformación martensítica.

La tabla 13 muestra que los parámetros a variar son el porcentaje en peso de las nanopartículas, tamaño de nanopartícula y el porcentaje en peso del surfactante, se mantendrán constantes el tiempo de agitación mecánica igual a 120 minutos, la velocidad de agitación en un valor de 1150 rpm y el tiempo de ultrasonido en un valor de 120min, la temperatura es constante y tiene un valor de 60°C para todas las composiciones de nanofluido.

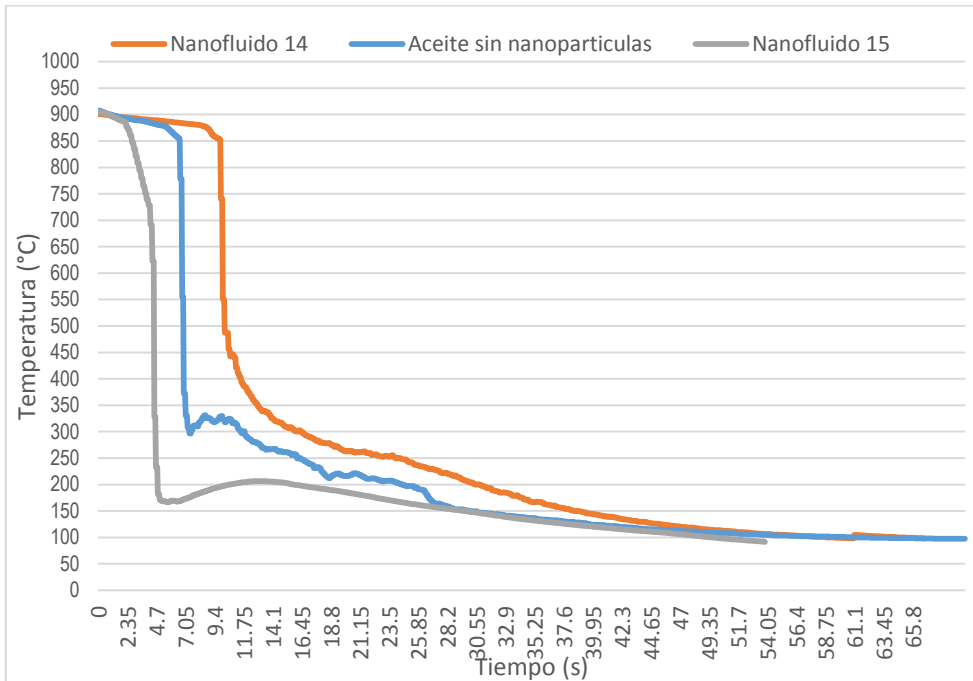
Tabla 13. Pruebas experimentales de fase 3.

NF#	%peso, nanopartícula	%peso, surfactante (span80)
14	0.5	0.1
15	1	0.1
16	0.5 (20 nanómetros)	0.1
17	1 (20 nanómetros)	0.1
18	0.5	0
19	1	0

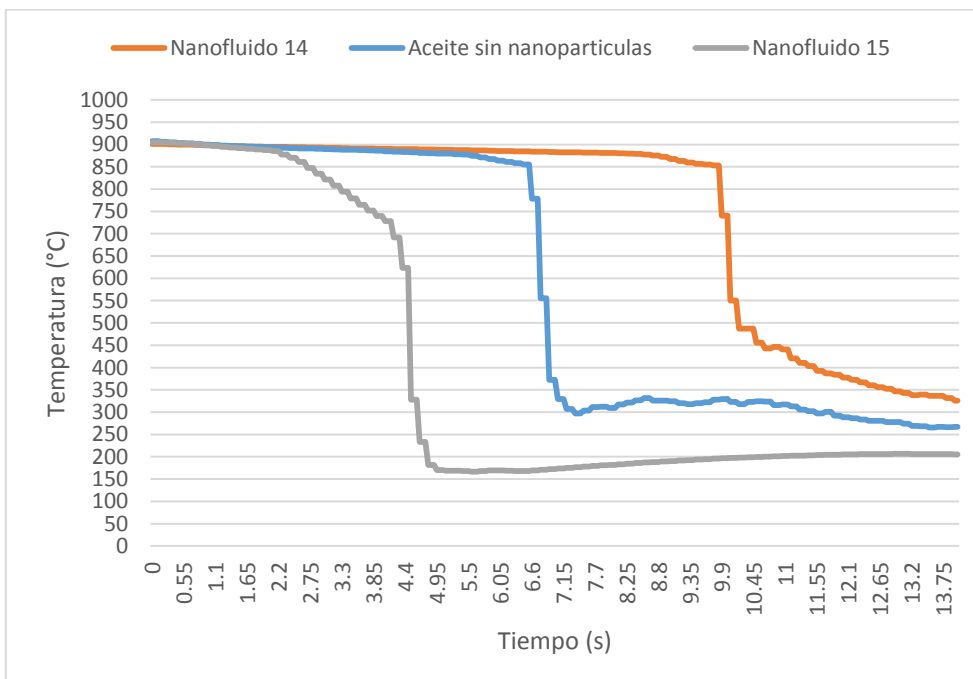
#### 5.3.1 Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #14 y #15

La grafica 16a muestra las curvas de enfriamiento de las probetas en los nanofluidos #14 y #15, así como el aceite base, sin nanopartículas. En la gráfica 16b, se acortan los datos de tiempo para obtener una mejor perspectiva del enfriamiento, entre nanofluidos se aprecia una notaría diferencia, el aceite base quedando en medio de los nanofluidos, siendo el nanofluido #14 como el destacable con 1009.8 °C/s de velocidad de enfriamiento, sin embargo, es gradual su enfriamiento, mientras que el NF #15 obtiene 350.17 °C/s, pero su enfriamiento se observa más brusco, el FB presenta una velocidad de enfriamiento de 999.45 °C/s.

Grafica 16a



Grafica 16b



Grafica 16. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos #14 con un %peso\_np=0.5 y NF#15 con un %peso\_np=1.0 y un %peso\_span80=0.1 en ambos casos.  
 b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de  $T_{max}$  a 700°C.

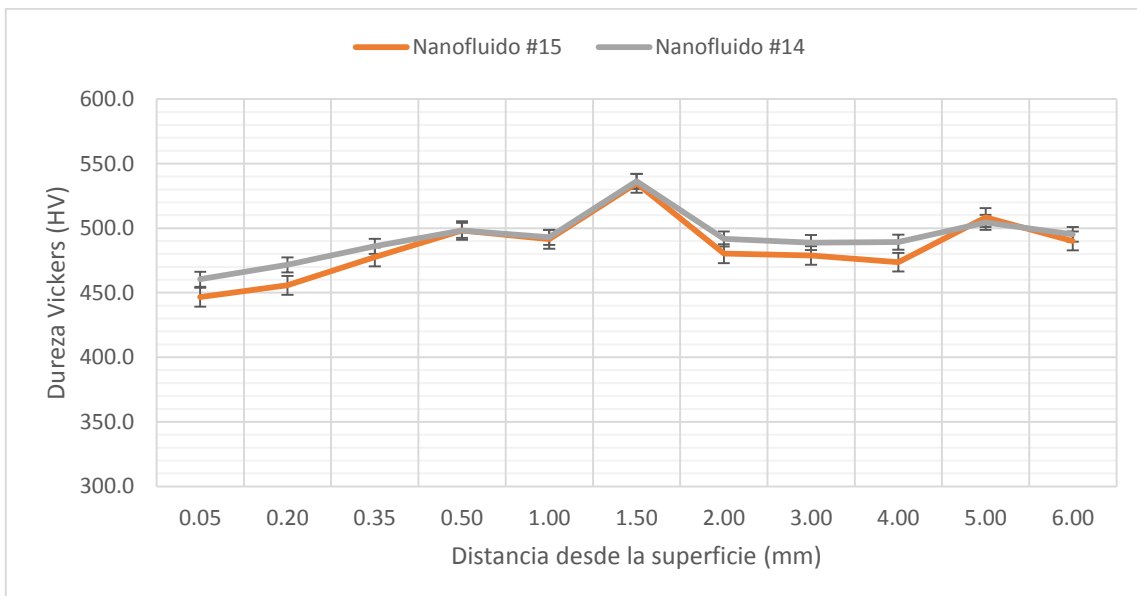
En la tabla 14 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 14. Velocidades de enfriamiento a Tmax=700°C para nanofluidos #14 y NF#15

Expresiones lineales t-T		
NF#14	NF#15	FB
$T=1009.8t+10762$	$T=350.17t+2169.2$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C (°C/s)		
1009.8	350.17	999.49

### 5.3.2 Perfil de Durezas nanofluidos #14 y #15

Como se puede observar en la gráfica 17 los valores de dureza para los nanofluidos #14 y #15, presentan valores muy similares entre sí, aunque para el nanofluido #14 la dureza es mayor, ambos presentan solo un punto cercano a los 550 HV, ambos presentan una dureza homogénea desde la superficie hacia el núcleo de la muestra.



Gráfica 17. Perfil de dureza Vickers para los NF#14 y NF#15, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.3.3. Microestructura nanofluidos #14 y #15

De la figura 60a-60b para la probeta NF#14, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de perlita distribuida al azar.

Para la figura 61a-61b se muestra el área del núcleo de la probeta NF#14, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita, no se observa la fase de ferrita.

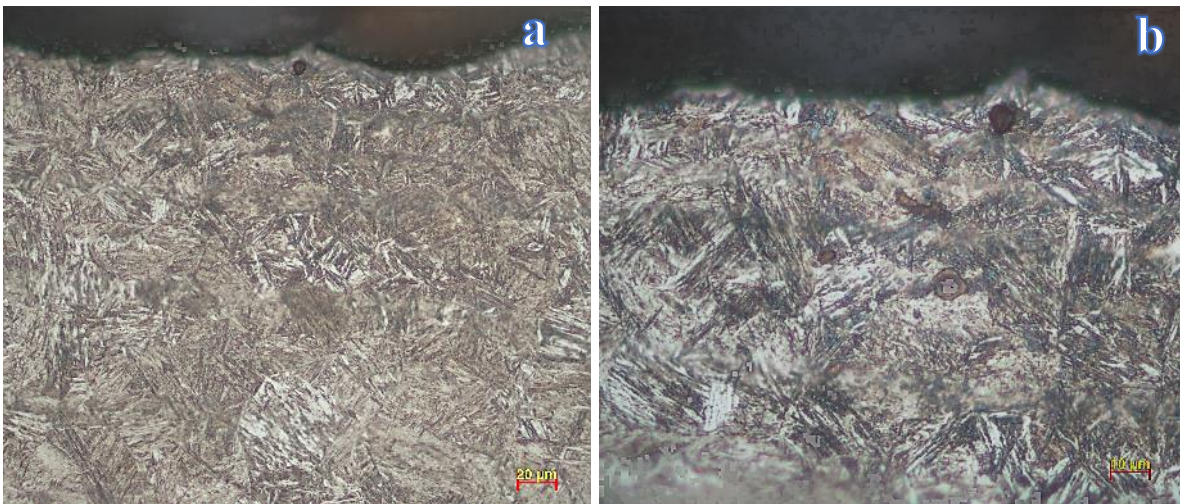


Figura 60. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#14, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

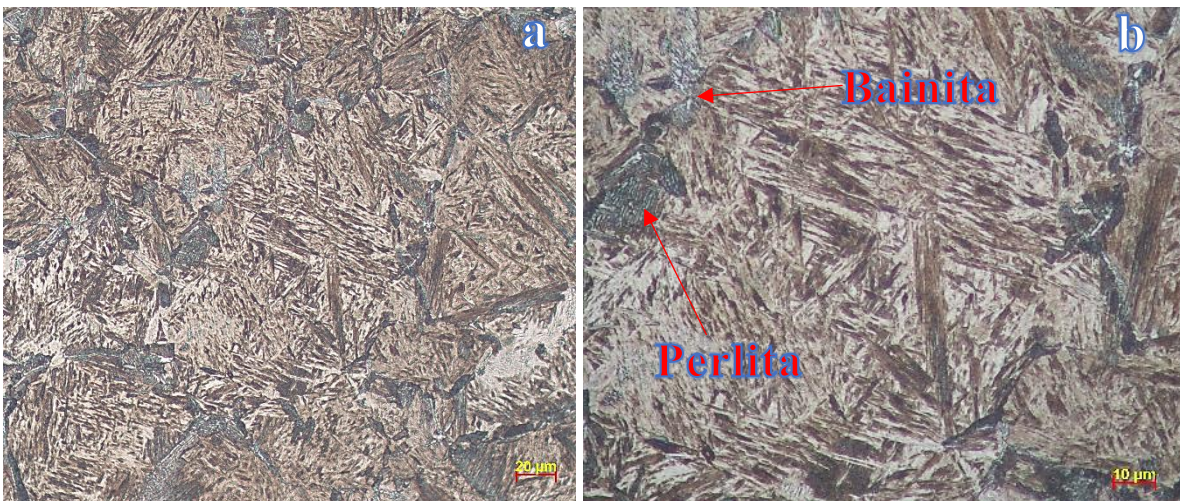


Figura 61. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#14, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

De la figura 62a-62b para la probeta NF#15, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de perlita distribuida al azar, la fase ferrítica se encuentra distribuida en el límite de grano austenítico.

Para la figura 63a-63b que muestra el área del núcleo de la probeta NF#15, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita más fases de ferrita delineando el grano austenítico.

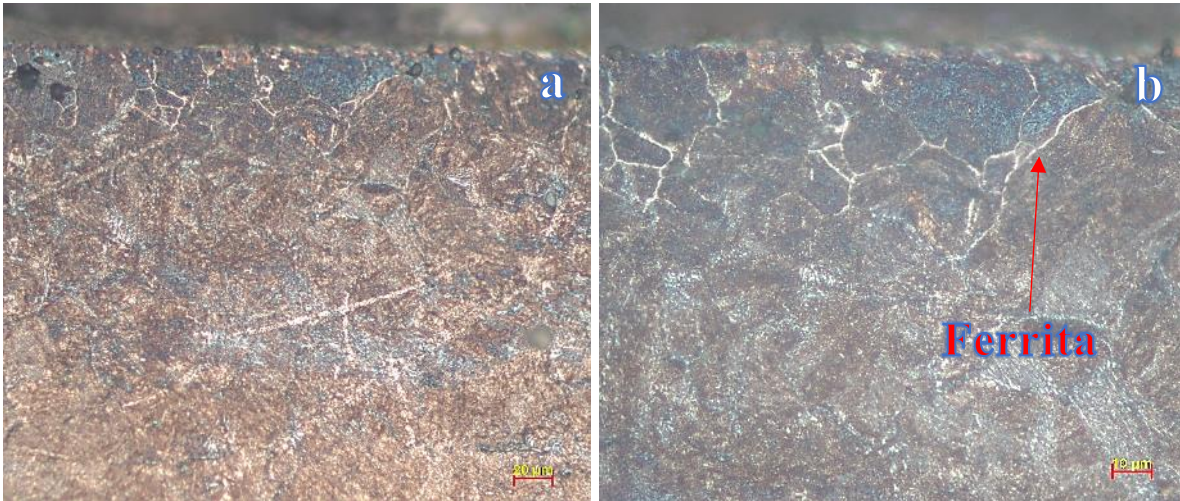


Figura 62. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#15, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

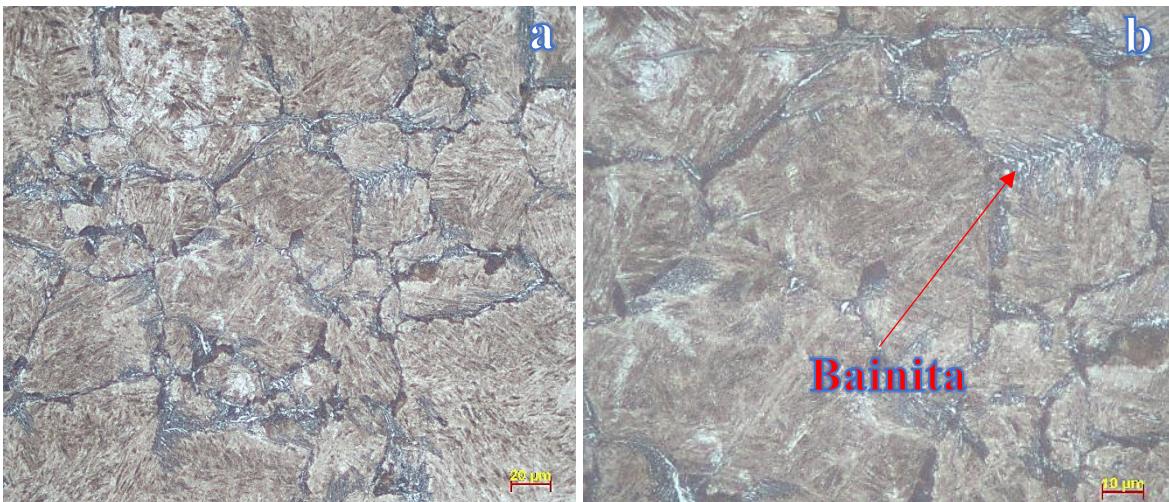
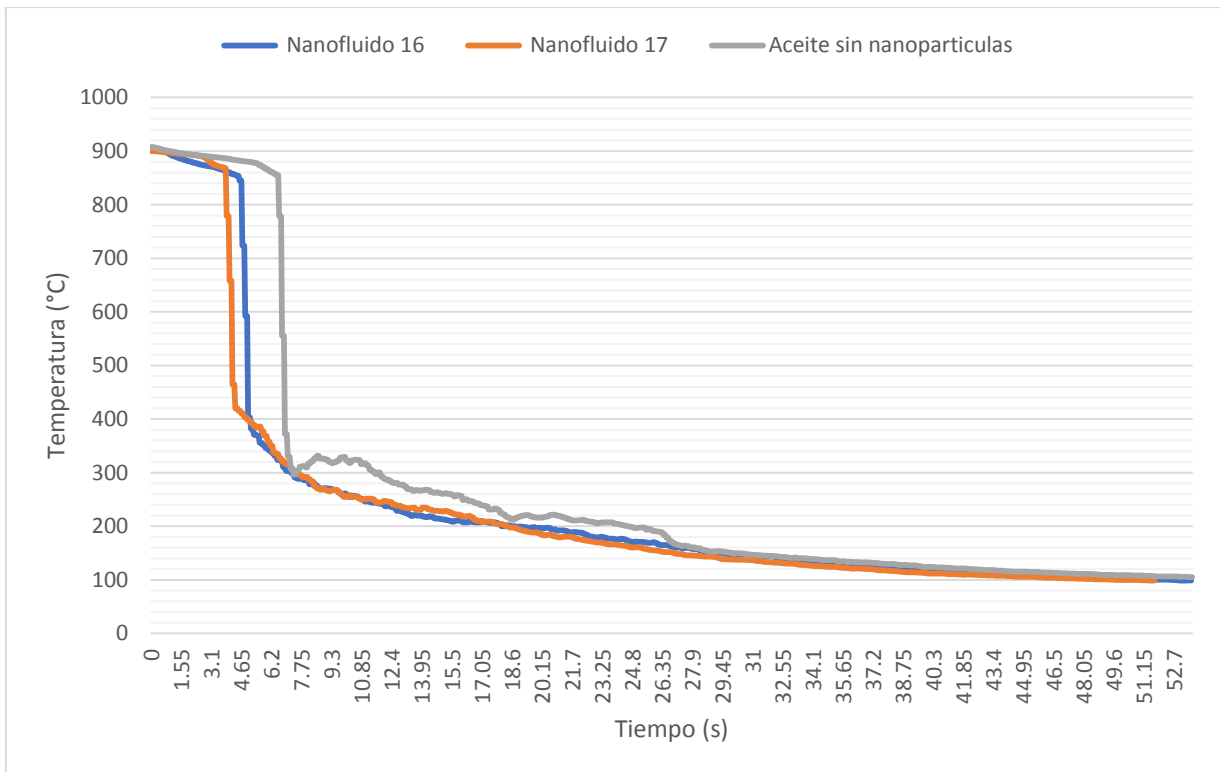


Figura 63. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#15, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

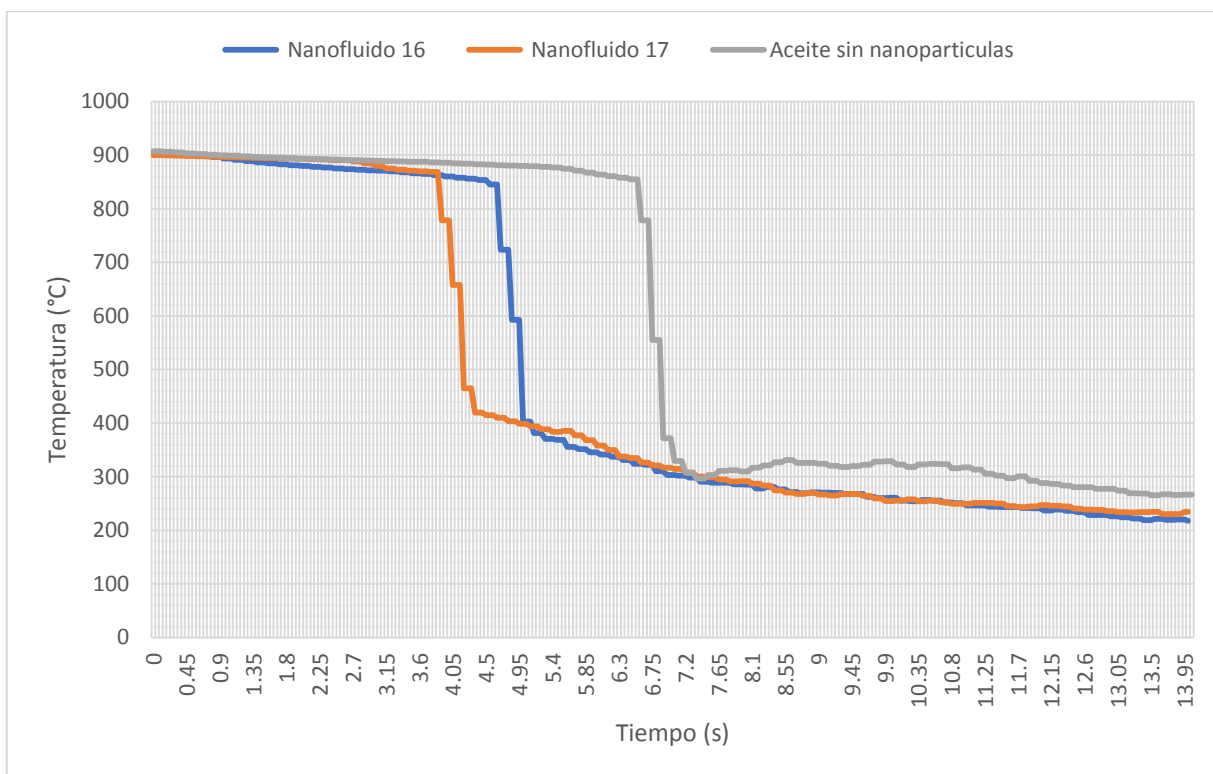
### 5.3.4. Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #16 y #17

La grafica 18a muestra las curvas de enfriamiento de las probetas en los nanofluidos #16 y #17, presentan curvas de enfriamiento similares, por su parte el aceite base sin nanopartículas, muestra un periodo más prolongado durante la etapa de enfriamiento brusco. En la gráfica 18b, se acorta la escala de tiempo para obtener una mejor perspectiva del enfriamiento entre nanofluidos, se aprecia una notaría diferencia, siendo el nanofluido #17 como el destacable con una velocidad de enfriamiento de  $979.52\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , mientras que el NF #16 alcanza una velocidad de enfriamiento de  $841.77\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , el FB presenta una velocidad de enfriamiento de  $999.45\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , por lo que ambos nanofluidos se quedan por debajo de este valor.

a)



b)



Grafica 18. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos NF#16 con un %peso\_np=0.5 y NF#17 con un %peso\_np=1.0 y un %peso\_span80=0.1, el tamaño de la nanopartícula es de 20 micrómetros en ambos casos.

b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de Tmax a 700°C.

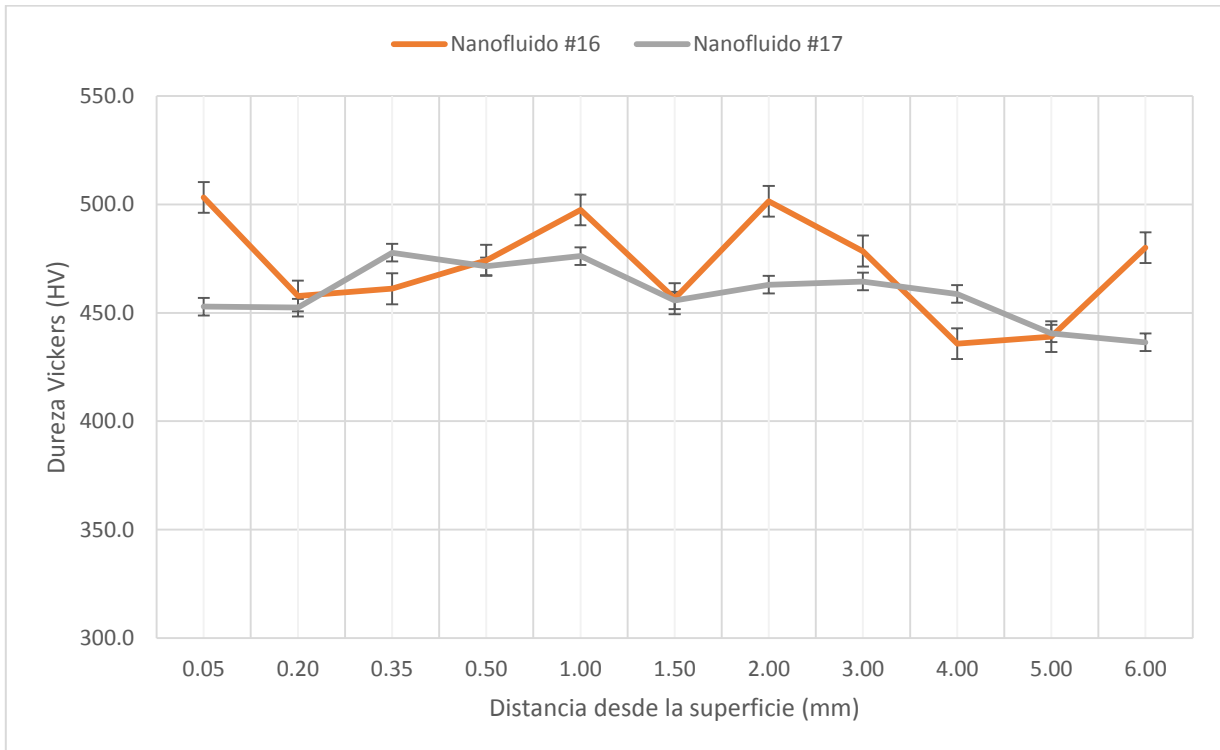
En la tabla 15 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 15. Velocidades de enfriamiento a Tmax=700°C para nanofluidos #16 y NF#17

Expresiones lineales t-T		
NF#16	NF#17	FB
$T=841.77t+4718.8$	$T=979.52t+4834.7$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C (°C/s)		
841.77	979.52	999.49

### 5.3.5. Perfil de Durezas nanofluidos NF#16 y NF#17

Como se puede observar en la gráfica 19 los valores de dureza para los nanofluidos NF#16 y NF#17, presentan valores muy similares entre sí, aunque para el nanofluido #17 los valores se mantienen homogéneos, para el #16 la dureza es mayor, pero se tiene puntos altos y hacia el núcleo puntos bajos.



Grafica 19. Perfil de dureza Vickers para los NF#16 y NF#17, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.3.6. Microestructura nanofluidos #16 y #17

De la figura 64a-64b para la probeta NF#16, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de ferrita más bainita distribuida al azar, la fase ferrítica se encuentra distribuida en el límite de grano austenítico.

Para la figura 65a-65b se muestra las áreas del núcleo de la probeta NF#16, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita más fases de ferrita en menor cantidad.



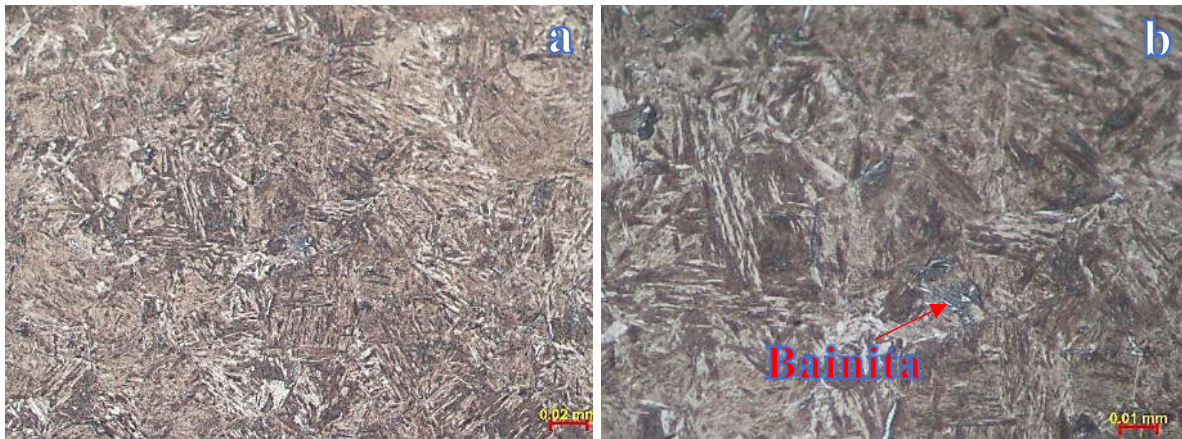


Figura 64. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#16, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

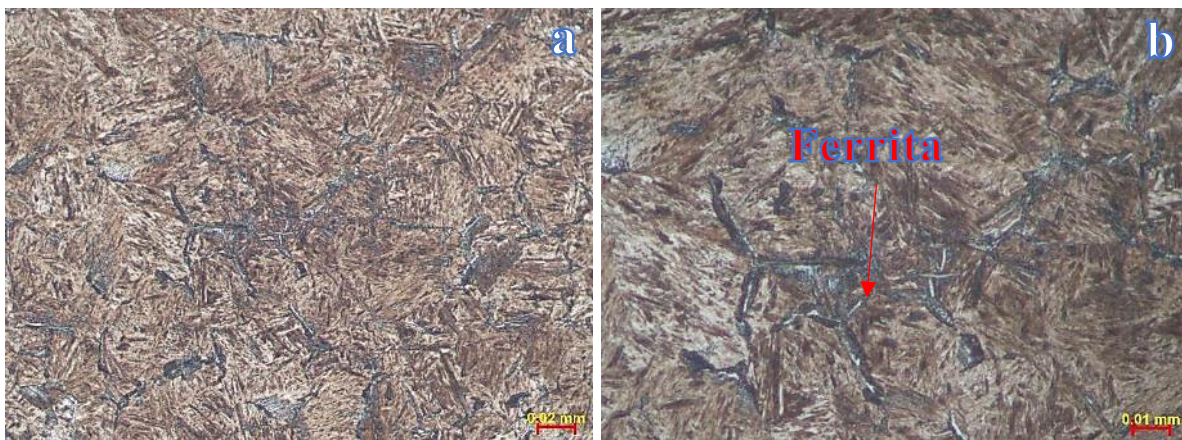


Figura 65. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#16, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

De la figura 66a-66b para la probeta NF#17, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de ferrita, mismas que se encuentra distribuida en el límite de grano austenítico.

Para la figura 67a-67b se muestra el área del núcleo de la probeta NF#17, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita más fases de ferrita delineando el grano austenítico.

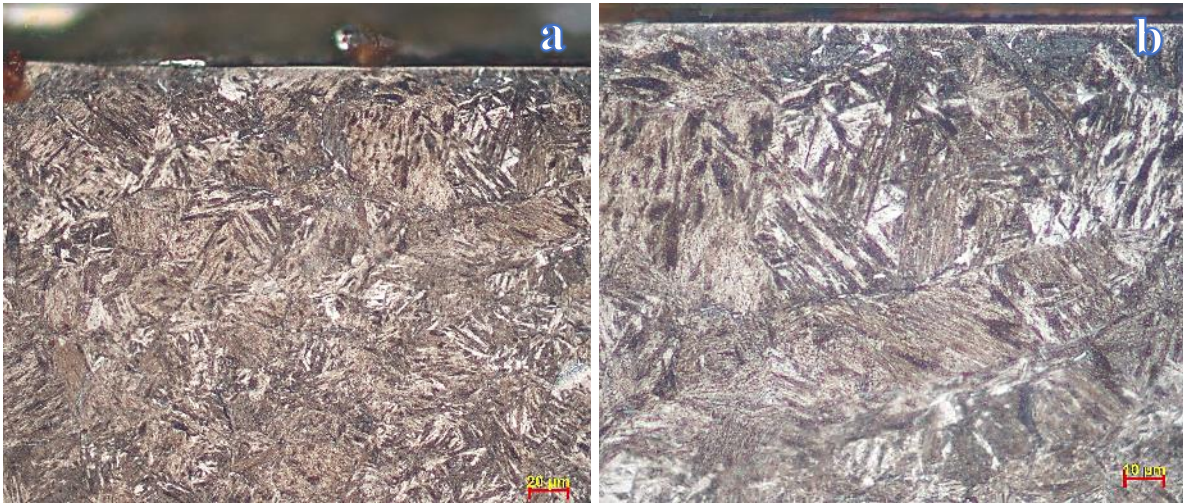


Figura 66. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#17, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

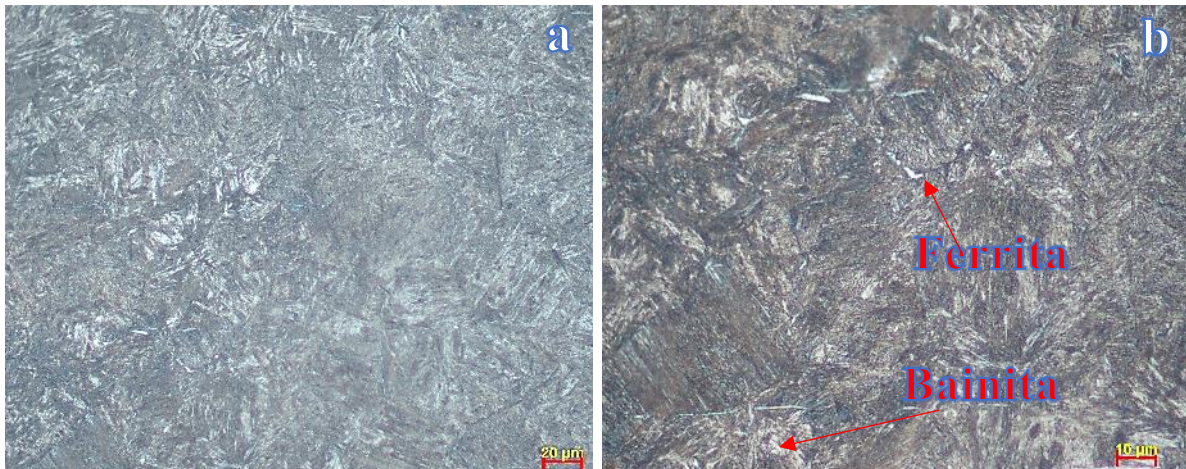
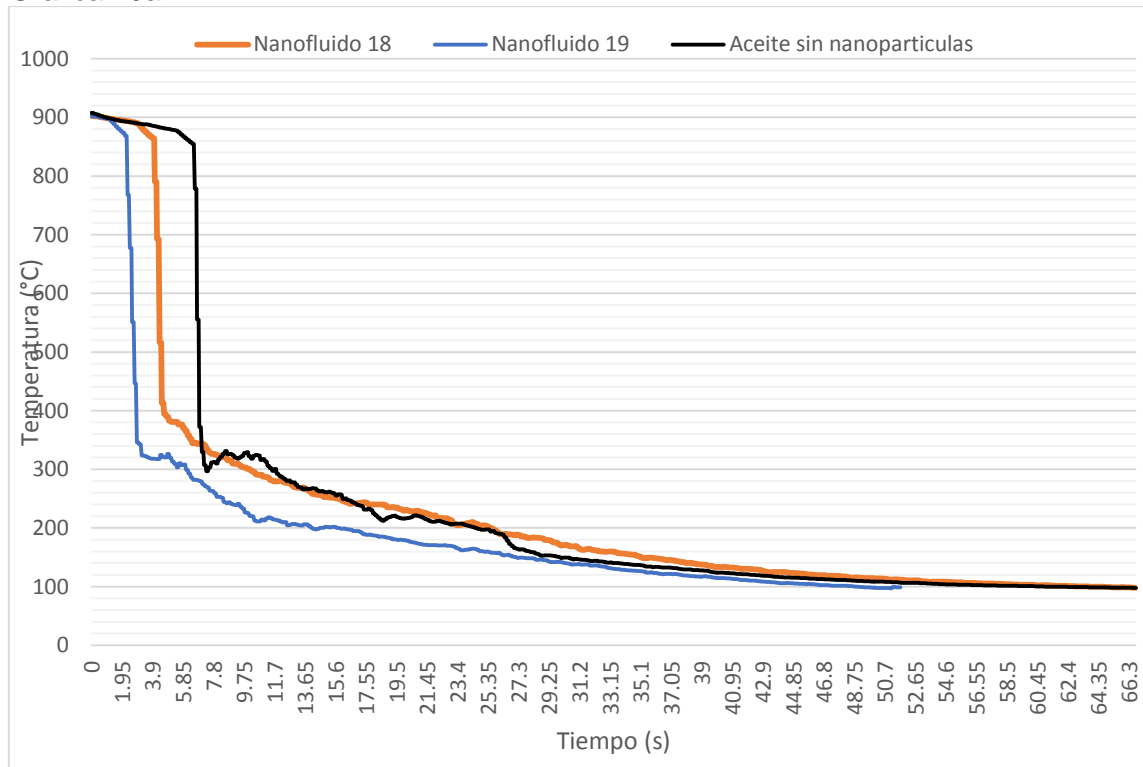


Figura 67. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#17, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

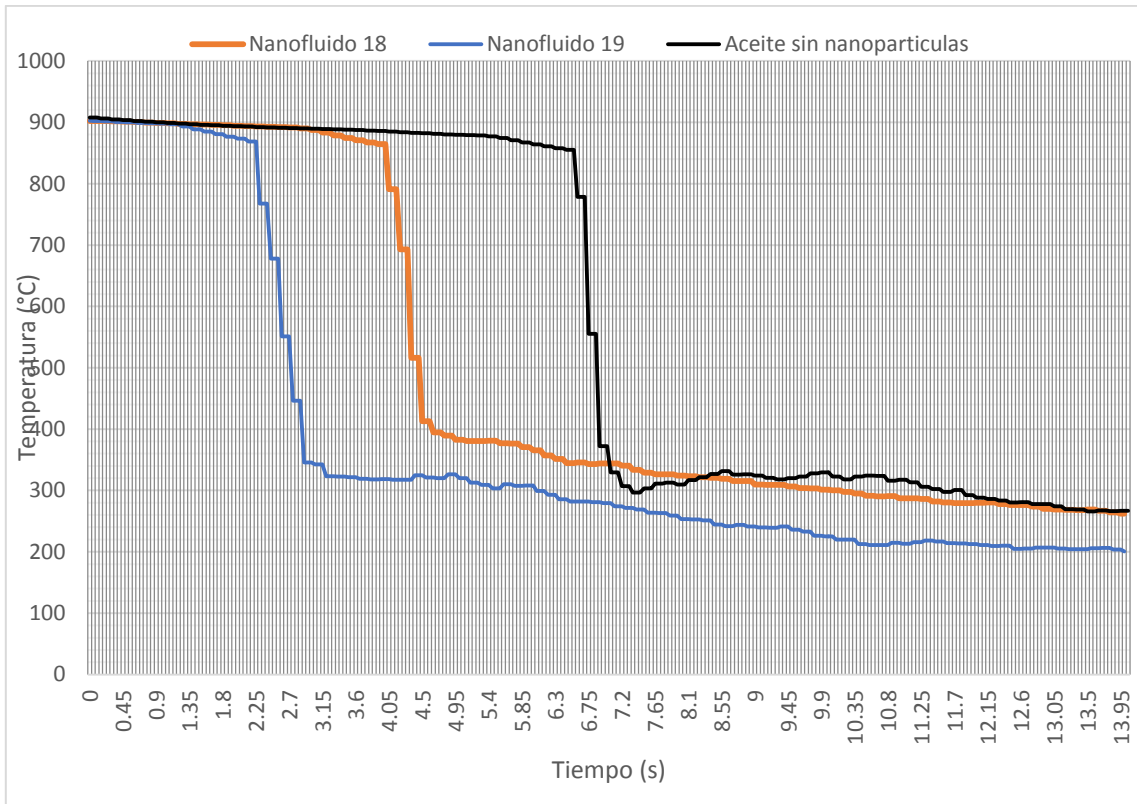
### 5.3.7. Curvas de Enfriamiento para Nanofluidos #18 y #19

La grafica 20a muestra las curvas de enfriamiento de las probetas en los nanofluidos #18 y #19, presentan curvas de enfriamiento similares entre sí. El aceite base, sin nanopartículas, tiene una curva similar, pero un periodo prolongado en el enfriamiento brusco, lo que significa en un mayor tiempo en la cual se puede tener una transformación de la estructura. En la gráfica 20b, se acorta la escala de tiempo para obtener una mejor perspectiva del enfriamiento, siendo el nanofluido #19 como el destacable con una velocidad de enfriamiento de  $979.52^{\circ}\text{C/s}$ , mientras que el NF #18 presenta una velocidad de enfriamiento de  $841.77^{\circ}\text{C/s}$ , el FB tiene un valor de  $999.45^{\circ}\text{C/s}$ .

Grafica 20a



Grafica b)



Grafica 20. a) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045 para los nanofluidos; NF#18 con un %peso\_np=0.5 y NF#19 con un %peso\_np=1.0, sin surfactante Span80 en ambos casos.

b) Curvas de enfriamiento de la probeta 1045, ampliación de la zona de  $T_{max}$  a 700°C.

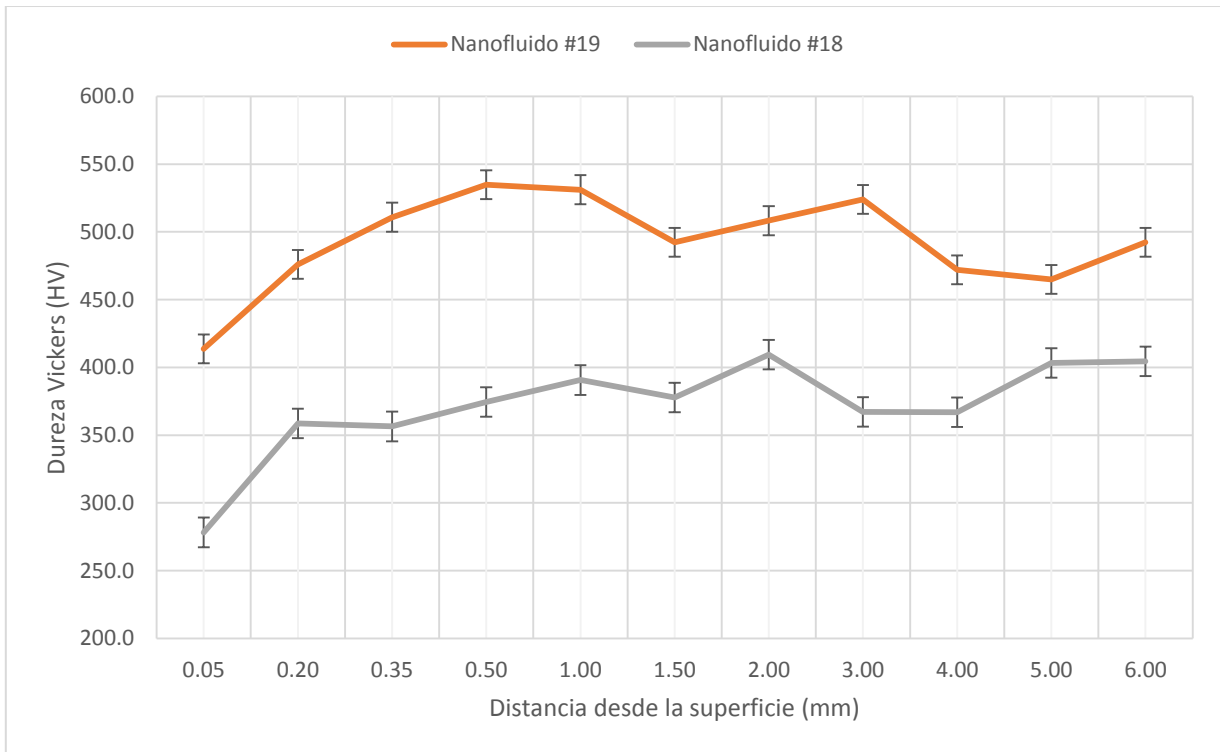
En la tabla 16 se muestran los resultados procesados de las curvas de enfriamiento. Cada expresión lineal que se reporta proviene de un conjunto de datos t-T a una temperatura de 700°C.

Tabla 16. Velocidades de enfriamiento a  $T_{max}=700^{\circ}\text{C}$  para nanofluidos #18 y NF#19

Expresiones lineales t-T		
NF#18	NF#19	FB
$T=841.77t+4718.8$	$T=979.52t+4834.7$	$T=999.49t+7376$
Velocidad de enfriamiento a 700°C °C/s)		
841.77	979.52	999.49

### 5.3.8. Perfil de Durezas nanofluidos #18 y #19

Como se puede observar en la gráfica 21 los valores de dureza para los nanofluidos #18 y #19, presenta valores totalmente distintos entre muestras, en el nanofluido #18 se nota que los valores de dureza son inferiores con respecto al #19, aunque este último su dureza muestra una menor dispersión.



Gráfica 21. Perfil de dureza Vickers para los NF#18 y NF#19, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

### 5.3.9. Microestructura nanofluidos #18 y #19

De La figura 68a-68b para la probeta NF#18, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de perlita distribuida al azar, la fase ferrítica se puede ver en la superficie, así como algunas zonas con ferrita acicular.

Para las figuras 69a-69b área del núcleo de la probeta NF#19, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita más fases de ferrita delineando el grano austenítico.

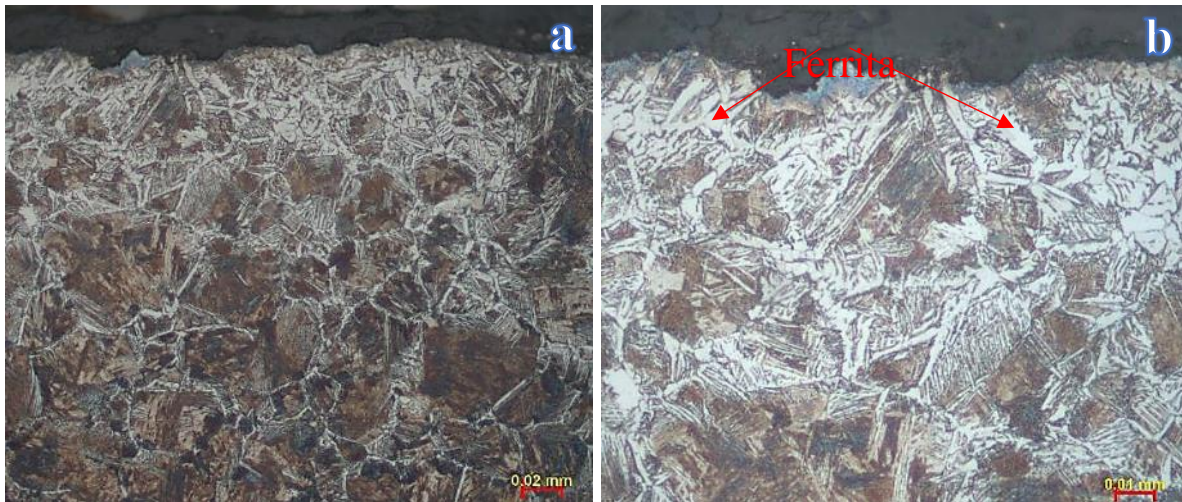


Figura 68. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#18, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

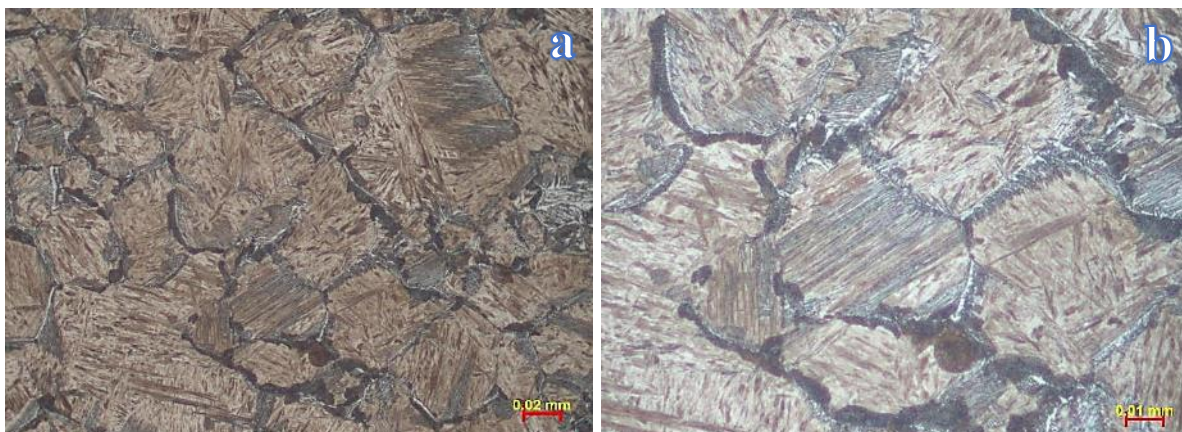


Figura 69. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#18, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

De la figura 70a-70b para la probeta NF#19, se aprecia una microestructura de martensita más algunas pequeñas fases de ferrita distribuida en el límite de grano austenítico.

Para la figura 71a-71b se muestra el área del núcleo de la probeta NF#19, se puede ver una microestructura similar a la de la superficie, presenta algunas zonas de bainita más fases de ferrita delineando el grano austenítico.

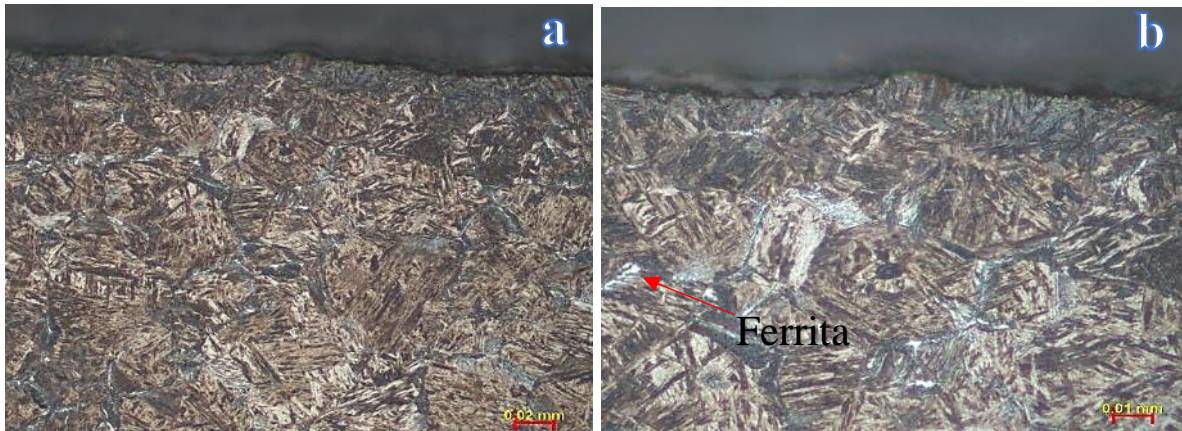


Figura 70. Microestructura de la superficie de la probeta de acero 1045 templada en NF#19, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

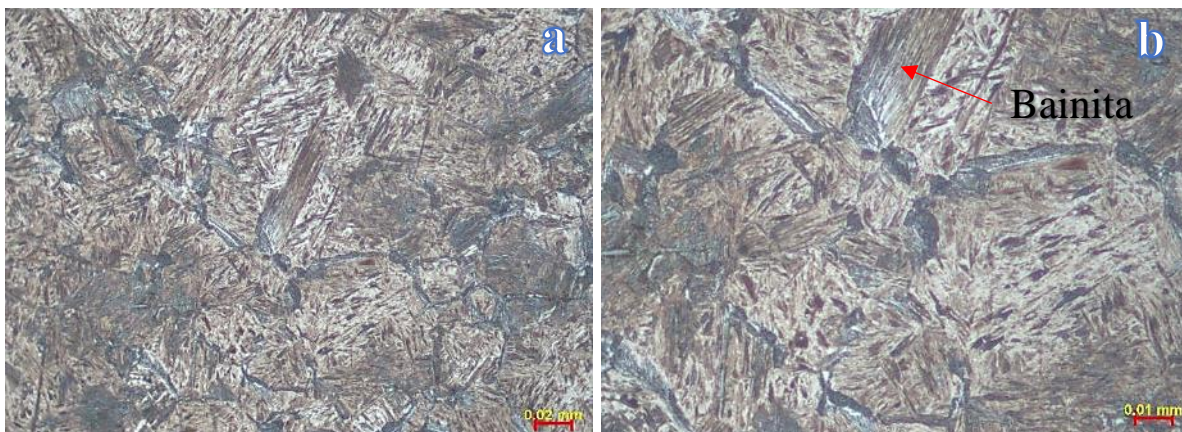


Figura 71. Microestructura del núcleo de la probeta de acero 1045 templada en NF#19, tomada a: a) 500X y b) 1000X.

### 5.3.10. Cálculo de la Difusividad Térmica nanofluidos #14 y #15

La tabla 17 presenta los resultados de la difusividad térmica para los nanofluidos y fluido base, los valores provienen de la sustitución de los parámetros en la ecuación 4.4.1. Para ejemplificar se muestra la sustitución de los parámetros en la ecuación para el fluido base. Se aprecia que el valor de la difusividad térmica para el NF#14 es mayor que el NF#15, tomando como referencia el fluido base. Los resultados obtenidos son valores promedio de 3 mediciones realizadas a cada espécimen.

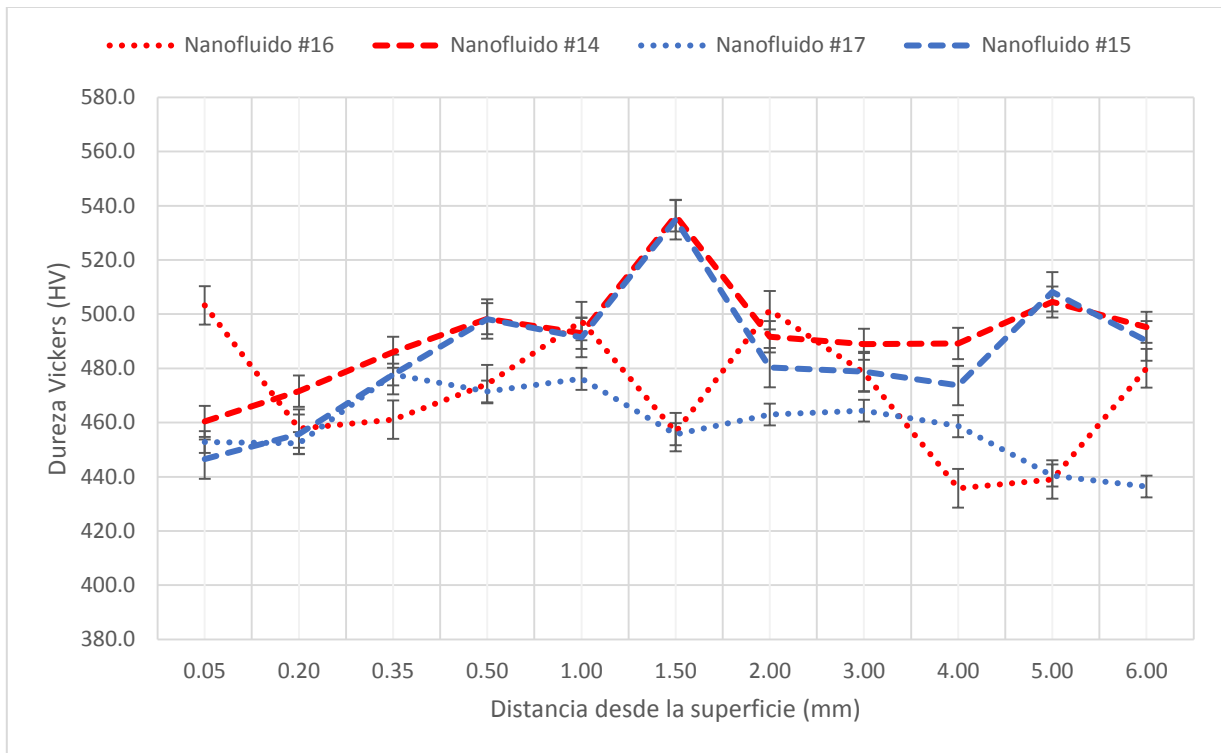
Tabla 17. Resultados de Difusividad térmica.

$f$ (Hz)	B	$\alpha$ $10^{-04}$ (cm <sup>2</sup> /s)	NF#
4.6	143.88	6.98	14
4.1	151.66	5.60	15
5.1	287.38	1.94	FB

### 5.3.11. Discusión de los resultados de la fase 3.

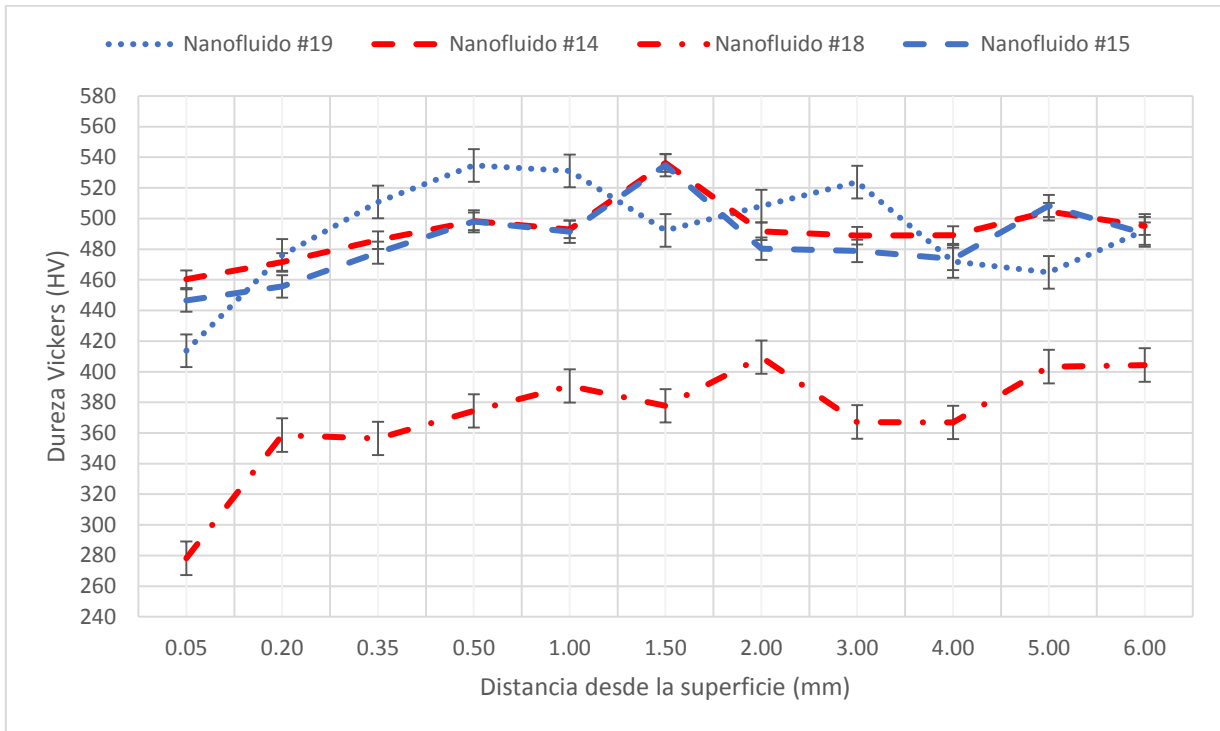
En la gráfica 22 se presenta el efecto del tamaño de nanopartícula –considerando dos porcentajes en peso de nanopartículas– sobre los perfiles de dureza. Los nanofluidos NF# 14 y NF#16 tienen un tamaño de partícula de 50nm y 20nm respectivamente, 0.5% en peso de nanopartículas y 0.1% en peso de surfactante, se observa que el NF#14 tiene una mayor dureza por encima de los 530HV, mientras que para el NF#16 el punto más alto de dureza se estima en 503HV. En el caso de los nanofluidos NF#15 y NF#17 que tienen un tamaño de nanopartícula de 50nm y 20nm respectivamente, 1% en peso de nanopartículas y 0.1% en peso de surfactante, para el NF#17 presenta valores superficiales de dureza por encima del NF#15. Sin embargo, si se visualizan los resultados de todo el perfil de dureza, se aprecia que los nanofluidos con tamaño de nanopartícula de 50nm muestran perfiles de dureza por encima de los de 20nm.





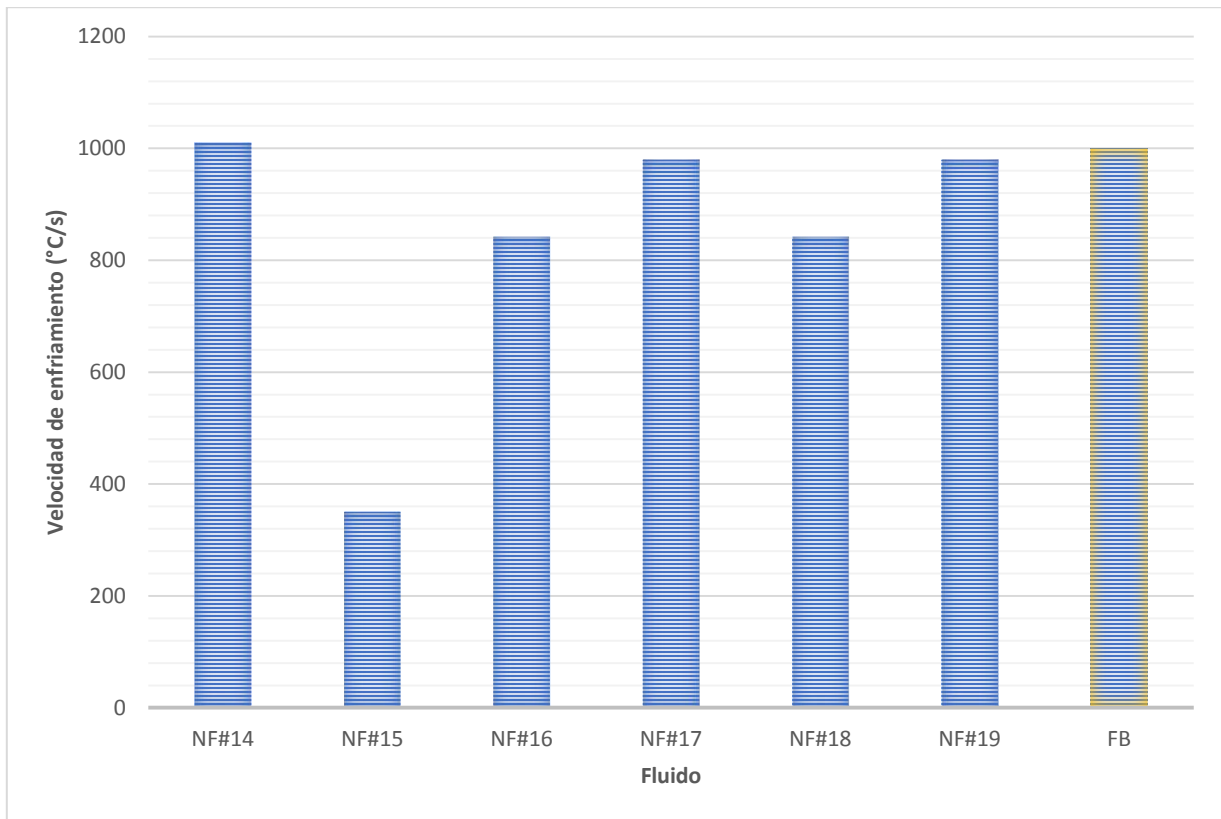
Grafica 22. Perfil de dureza Vickers para los NF#14, 15, 16 y 17, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

El efecto del surfactante sobre los perfiles de dureza se reporta en la Grafica 23, se presentan los perfiles de dureza de los NF# 14 y 18, estos fluidos tienen 0.5% en peso de nanopartículas, el NF#14 con un 0.1% de surfactante y el NF#18 sin surfactante. Obsérvese que el NF#14 y #18 obtienen durezas por encima de los 530HV, sin embargo, el NF#18 presenta al inicio una baja dureza, posteriormente esta sube, pero indica una superficie suave. Los NF# 15 y 19 son afines, con 1% en peso de nanopartículas, pero el NF#19 sin surfactante, por lo que se puede ver en la gráfica su dureza cerca de la superficie es baja, lo que indica que el surfactante en la cantidad propuesta en esta fase 3 mejora la dispersión de las nanopartículas, lo cual repercute en los resultados de dureza.



Grafica 23. Perfil de dureza Vickers para los NF#14, 15, 18 y 19, el intervalo de confianza es calculado 2 veces la desviación estándar.

Para la Grafica 24 se presentan los resultados de la fase 3 muestran que el NF#14 es el de mayor velocidad de enfriamiento con 1009.9 °C/s, mientras que se puede apreciar que el NF#15 tiene la menor velocidad de enfriamiento con 350.17 °C/s, el resto de los NFs presentan una velocidad de enfriamiento por debajo de la del Fluido Base con 999.45 °C/s.



Grafica 24. Velocidad de enfriamiento de los Nanofluidos de la Fase 3 y del fluido base.

Derivado los resultados arrojados anteriormente, se puede destacar que el nanofluido que muestra el mejor desempeño en el proceso de temple es el NF#14, en términos de la velocidad de enfriamiento de 1009.8 °C/s, muestra un valor de difusividad térmica mayor que el fluido base, del análisis metalográfico se puede apreciar un perfil de dureza homogénea, lo que se traduce en una microestructura homogénea, ya que no se encontró presencia de las fases de ferrita, estructura suave, solo martensita revenida, recordando que la intención de un tratamiento térmico es mejorar sus propiedades mecánicas.

En relación al NF#15 con 350.17 °C/s de velocidad de enfriamiento se considera que un aumento en el % en peso de las nanopartículas, puede que afecte a la transformación de la estructura, se puede suponer que este aumento estabiliza la capa de vapor entre probeta y fluido (*Stages of Heat removal; ASM Handbook; Heat treatment; Quenching Steel*), lo que provocó un efecto en la transformación de las fases dando lugar a la presencia de fases de menor dureza tales como bainita y ferrita.

## 6. CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los nanofluidos (NF), se reporta un incremento de la difusividad térmica de los NF sobre el valor del fluido base, de la primera fase por un total de 4 NF, estos pasaron de  $1.94e^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s a  $5.32e^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, que bien es el resultado establecido como referencia del aceite sin nanopartículas y el promedio de los 4 NF de esta etapa, respectivamente.
- Se reportan graficas de razón de deformación contra esfuerzo de corte para la primera fase y segunda fase, se concluye que los NF tienen viscosidad constante, lo que se traduce en un comportamiento newtoniano, el resultado de la viscosidad se mantiene en 7cP (centipoise), tanto en los NFs como el aceite mineral.
- De los resultados de dureza para la primera fase, se encontró que el NF#3 muestra resultados de perfil de dureza por encima del fluido base, además de mostrar una menor dispersión en la medición de dureza que los otros NF. Presenta la fase martensítica lo cual es coherente con lo reportado en el perfil de dureza. Se rescata que el tiempo de 120min de agitación mostro una menor dispersión en las mediciones de dureza.
- Los resultados de Nanosizer para las muestras previo al proceso de filtrado muestran valores similares entre NFs, es decir el tamaño de partícula presenta una ligera diferencia entre los NF de menor porcentaje en peso de NP (0.5% en Peso, NF#1 y #3) contra los que tienen el doble en esta variable (NF#2 y #4, 1.0% en peso). Después del proceso de filtrado se presenta la misma diferencia entre NFs (NF#1 y #3), que bien se asemejan al valor arrojado en el Fluido Base, sin embargo, los NF #2 y 4 presentan un tamaño de partícula mayor que los anteriores (NF#1 y 3), esto puede derivarse del aumento en el porcentaje en peso de las NP, ya que estos presentan mayor concentración de estas, cabe mencionar que el aumento en tamaño de partícula, podría deberse al formación de aglomerados de las NP por dicho aumento en peso.

- Para la fase 2, se procesaron 9 Nanofluidos, de los cuales se obtienen curvas de enfriamiento del proceso de temple de la probeta de acero, dichos resultados exhiben velocidad e enfriamiento del acero desde 900°C hasta 100°C aproximadamente, la velocidad de enfriamiento más alta corresponde al NF #7 con 1304.3°C/s siguiéndole el #8 y #9; la más baja corresponde al NF#10 que reporta una velocidad de enfriamiento de 471.5 °C/s. Tomando como referencia el valor del FB con una velocidad de enfriamiento de 999.49°C/s. Se concluye que no hay una tendencia clara para relacionar la velocidad de enfriamiento con el tiempo de ultrasonido.
- Los resultados de la difusividad térmica de los nanofluidos de la fase 2, muestran que al incrementar la cantidad de surfactante como el tiempo de ultrasonido los valores de la difusividad térmica son mayores.
- Los nanofluidos que presentan mayor dureza son los que no contienen surfactante, sin embargo, aquellos que contienen surfactante presentan una dureza más homogénea. Aunque ningún nanofluido de esta fase 2, logro alcanzar dureza ni transformación martensítica como se esperaba. Esto se atribuye principalmente al efecto de la cantidad de surfactante considerado en la preparación de los nanofluidos. Las probetas templadas en nanofluidos con tiempos de ultrasonido de 120min muestran una menor dispersión de los resultados de dureza que los nanofluidos preparados con tiempos menores. Esto se corrobora con las fases microestructurales presentes.
- Los resultados de tamaño de partícula obtenidos para los NF #6, 9 y 12, muestran que el NF#12 presenta mejor estabilidad, ya que al 5 día se observa el mismo tamaño de partícula, lo que indica que el tiempo de sonificación es el correcto. Para los NF #5, 8 y 11, presentan diferencia entre los resultados por día, lo que muestra la importancia del surfactante, ya que esta serie no contiene este aditivo. El mismo caso es para los NF# 7, 10 y 13, la diferencia radica en el porcentaje en peso (1.0% en peso) del surfactante es el doble que la primera serie, el aumento de este aditivo decrece la estabilidad del NF con el tiempo.
- De los resultados de la fase 3, se reporta que el nanofluido #14 es el que muestra una mayor velocidad de enfriamiento en relación al fluido base, un perfil de dureza que se

corresponde con el análisis microestructural, en el cual se tiene presencia de martensita en la superficie. Presenta además un valor de difusividad térmica mayor al del fluido base.

- El análisis microestructural de la fase 3, en general, consiste de una matriz de martensita revenida más pequeñas fases de bainita. En el caso de las probetas templadas con los NF#15, #18 y #19, presentan además, la fase ferrítica que se encuentra distribuida en los límites de grano austenítico. Cabe resaltar que el efecto de la cantidad de surfactante sin duda tiene un efecto sobre la transformación de fases, esto es perceptible al comparar el NF#12 (Fase 2) con el NF#14 (Fase 3) ambos con los mismos parámetros de preparación, pero con distinta cantidad de surfactante.
- El surfactante tiene un efecto sobre la dispersión de nanopartículas, esto se aprecia al comparar los nanofluidos con surfactante que parecen presentar resultados de perfil de dureza más homogéneos que los que no contienen surfactante.
- Las probetas que fueron templadas con los nanofluidos preparados con nanopartículas de 50nm muestran perfiles de dureza por encima de las probetas templadas con nanofluidos de 20nm.
- La fase 3 de la presente investigación, que utilizó menor cantidad de surfactante mostró una transformación de la fase perlítica a martensítica casi en un 90%, derivado de esto, se obtiene una mejora en las propiedades mecánicas de la probeta de acero, ya que se encontraron durezas más homogéneas y con valores por encima de los 400HV.

## 7. REFERENCIAS

1. Aarosan H. et al. (1992) Metallography and Microstructures. Volume 9 of the 9th Edition Metals Handbook. ASM Handbook.
2. Baker G. et al. (1992) Metallography and Microstructures. Volume 4 of the 9th Edition Metals Handbook. ASM Handbook.
3. Beck M., Sun T. & Teja A. (2007). The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethyleneglycol .Fluid Phase Equilib.
4. Bird B. (1992). Fenomenos de transporte. Ed. Repla.
5. Bozidar L., Hans M., Lauralice C. & George T. (2010). Quenching Theory and Technology. Taylor and Francis Group, LLC.
6. Callister W. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. The University of Utha. Editorial Reverté.
7. Castillo F. (2012). Tratamientos térmicos del Acero, Unam.
8. Demir, H., Dalkilic, A. S., Kürekci, N. A., Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2011). Numerical investigation on the single phase forced convection heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub> nanofluids in a double-tube counter flow heat exchanger. International Communications in Heat and Mass Transfer.
9. Dhinesh KumarDevendiran n, ValanArasuAmirtham. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21–40. 2017-05-15, De ScienceDirect Base de datos.

10. Esmaeilzadeh E, A., Nasiri V. & Omrani A. (2013). Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water under laminar flow in side a horizontal tube. *Int J Therm Sci*.
11. Farajollahi, B., Etemad, S. G., & Hojjat, M. (2010). Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
12. George E. Totten, C. E. Bates, N. A. Clinton. (1993). *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. U.S.A: ASM International.
13. Hung Y.H., Teng T.P. & Lin B. G. (2013) .Evaluation of the thermal performance of heat pipe using alumina nanofluids. *Exp Therm Fluid Sci*.
14. Incropera P. De witt D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ta edición. Prentice hall. México.
15. Kalogirou, S. A. (2004). *Solar thermal collectors and applications*. *Progress in Energy and Combustion Science*.
16. M. Raja a, n, R. Vijayana, P. Dineshkumar b, M. Venkatesan b. (2016). Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163–173, 2017-05-15, De ScienceDirect Base de datos.
17. Mauro Lomascolo, Gianpiero Colangelo, Marco Milanese, Arturo de Risi. (2015). Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1182–1198, 2017-05-15, De ScienceDirect Base de datos.



18. Mohammadhassan V., Ehsan M., Cyrus Z., Mohamed A. & Babak R. (2011). Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases on the enhancement of thermal conductivity and viscosity of nanofluids in engine oil. *Heat Mass Transfer*.
19. Natarajan, E., & Sathish, R. (2008). Role of nanofluids in solar water heater. *Int J Adv Manuf Technol*.
20. Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., & Taylor, R. A. (2010). Nanofluid-based direct absorption solar collector. *J. Renewable Sustainable Energy*.
21. Ramesh G. & Narayan K. (2012). Effect of Addition of Aluminum Nanoparticles on Cooling Performance and Quench Severity of Water during Immersion Quenching. *ASTM International Journal*.
22. Shames I. (1995). *Mecánica de Fluidos*. 3era Edición, Mc. Graw Hill.
23. Singh P., Harikrishna P., Sundararajan T. & Kumar D. (2012). Experimental and numerical investigation in to the hydrodynamics of nanofluids in microchannels. *Exp Therm Fluid Sci*.
24. Solangi K. (2015) A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids.
25. Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2009). Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid- Based Direct Absorption Solar Collector. *Journal of Solar Energy Engineering*.
26. U.S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED 231*, 99-103, 1995.

27. Vandervoort G. (1999). Metallography Principles and Practice. ASM International. Mc. Graw Hill.
28. Van der Ziel A. (1972), Electrónica Física del Estado Sólido, Ed. Prentice/Hall International.
29. Zemansky M. (1986). Calor y Termodinámica, 6ta Edición, McGraw Hill. México.