



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“USO DE NANOFLUIDOS BASE AGUA
PARA EL TEMPLE DE ACEROS”**

TESINA
que para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA
JOSÉ CARLOS GRECO PANTOJA

Asesor de Tesina
Dr. CRUZ MEJÍA HÉCTOR



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: **OJEDA RAMÍREZ BALBINA**
VOCAL: Profesor: **RAMÍREZ VIEYRA JOSÉ GUADALUPE**
SECRETARIO: Profesor: **CRUZ MEJÍA HÉCTOR**
1er. SUPLENTE: Profesor: **BELTRÁN FRAGOSO BENJAMÍN**
2ndo. SUPLENTE: Profesor: **FLORES ROSAS CLARA SARAÍD**

SITIO DÓNDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: **DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA QUÍMICA METALÚRGICA**

ASESOR DEL TEMA: **Dr. CRUZ MEJÍA HÉCTOR**



SUSTENTANTE: **GRECO PANTOJA JOSÉ CARLOS**



ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVO	13
METODOLOGÍA DE TRABAJO	13
1.- Antecedentes teóricos	15
1.1 Temple	15
1.1.1 Definiciones de temple	15
1.1.2 Etapas del temple	16
1.1.2.1 Etapa A / Capa de vapor (<i>Vapor blanket</i>)	17
1.1.2.1.1 Capa de vapor en agua como medio de temple	18
1.1.2.1.2 Desestabilización de la capa de vapor en disoluciones salinas como medio de temple	19
1.1.2.2 Etapa B/ Ebullición por nucleación (<i>Nucleate boiling</i>)	22
1.1.2.3 Etapa C/ Enfriamiento convectivo (<i>Convective cooling</i>)	23
1.2 Medios de enfriamiento (<i>Cooling medium, Quenchant</i>)	23
1.2.1 Viscosidad	25
1.2.2 Mojabilidad	25
1.2.2.1 Concentración micelar crítica (<i>Critical micelle concentration, CMC</i>)	26
1.2.3 Conductividad térmica	28
1.2.4 Temperatura de Leidenfrost o Flujo de calor mínimo (<i>Minimum heat flux, MHF</i>)	28
1.3 Templabilidad	28
1.4 Curva de enfriamiento	29
1.4.1 Diagramas de transformación isotérmica y de enfriamiento continuo (<i>Isothermal transformation IT, Continuous cooling transformation, CCT</i>)	31
1.5 Distorsión durante el temple	33
1.5.1 Tipos de deformación	34
1.5.1.1 Efecto de las propiedades del material sólido en el temple	34
1.5.1.1.1 Propiedades térmicas	34
1.5.1.1.2 Propiedades metalúrgicas	35
1.5.1.1.3 Propiedades mecánicas	37
1.5.2 Mecanismos que promueven la distorsión	38

1.5.3 Disminución de la distorsión	39
1.5.4 Ensayos para medir deformación	41
2.- Nanofluidos	42
2.1 Definición de nanofluidos	42
2.2 Preparación de nanofluidos	44
2.2.1 Nanopartículas	44
2.2.2 Nanopartículas comunes empleadas en la síntesis de nanofluidos.	44
2.2.3 Obtención de nanopartículas	45
2.2.3.1 Caracterización de nanopartículas	46
2.2.3.2 Daños a la salud	46
2.3 Métodos de preparación de nanofluidos	47
2.3.1 Fluidos base para nanofluidos	48
2.3.2 Método de análisis de las propiedades de los nanofluidos	48
2.4 Propiedades termofísicas de nanofluidos	48
2.4.1 Conductividad térmica	48
2.4.1.1 Efecto de la concentración	49
2.4.1.2 Efecto del tamaño	51
2.4.1.3 Mecanismos gobernantes propuestos	52
2.4.2 Viscosidad	53
2.4.2.1 Efecto de la concentración	53
2.4.2.2 Efecto del tamaño	54
2.4.3 Capacidad térmica específica/ Calor específico (Cp)	54
2.4.3.1 Efecto de la concentración	54
2.4.3.2 Ecuaciones para el calor específico	54
2.4.4 Densidad	55
2.4.4.1 Ecuaciones para la densidad	55
2.4.5 Tensión superficial, Mojabilidad	56
2.4.5.1 Modelos de mojabilidad (Esparcimiento)	57
2.4.5.2 Mojabilidad y flujo de calor crítico (CHF)	58
2.5 Coeficiente de transferencia de calor (HTC) en Nanofluidos	60
2.5.1 Determinación del HTC	61
2.6 Industrialización de los nanofluidos	62
2.6.1 Factores determinantes en la implementación industrial de los NFs.	62

2.6.1.1 Alto costo de producción.	62
2.6.1.2 Problemas de estabilidad a largo plazo	63
2.6.1.3 Incertidumbre en el valor de las propiedades termofísicas de los NFs	64
2.6.1.4 Corrosión y erosión del equipo dónde fluyen NFs	64
2.6.1.5 Incertidumbre del mercado	69
2.6.2 Algunas aplicaciones de los nanofluidos	69
2.6.2.1 Reactores nucleares enfriados por agua (<i>Water cooled reactors, WCR</i>)	69
2.6.2.2 Colectores solares de ducto parabólico (<i>Parabolic trough solar collectors, PTSC</i>)	70
2.6.2.3 Sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración (<i>Air conditioning & refrigeration, AC&R</i>)	70
3.-Temple de aceros en nanofluidos, implicaciones mecánicas, microestructurales, superficiales y sus interrelaciones	72
3.1 Comparación entre temple de aceros convencionales (1010, al Boro 22MnB5, inoxidable 304) en agua y en nanofluidos.	72
3.1 Efecto en la dureza	72
3.2 Efecto en la microestructura	76
3.3 Efecto en la superficie	82
CONCLUSIONES	93
PROPUESTAS PARA FUTUROS TRABAJOS	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Acoplamiento entre los campos mecánico, térmico y metalúrgico durante el enfriamiento de una pieza metálica [6]	16
Figura 2.- Curva de ebullición para agua a 1atm, a) curva de ebullición con las diferentes etapas del temple y de b) a e) distintas etapas en el sólido templado [24]	18
Figura 3.- Conductividad eléctrica para diferentes electrolitos en función de la concentración molar [17]	21
Figura 4.- Ángulo de contacto estático para a) Agua destilada $\theta=57.45^\circ$, b) Concentración SDS 1mM, $\theta=56.20^\circ$, c) Concentración 4mM $\theta=47.68^\circ$, d) Concentración 8mM $\theta=38.02^\circ$, e) Concentración 10mM $\theta=57.01^\circ$ [13]	27
Figura 5.- Variación del ángulo de contacto del agua pura en acero inoxidable 304 con la adición de surfactante SDS. [13]	28
Figura 6.- Curvas de enfriamiento y velocidad genéricas junto con las 3 etapas comunes del proceso de temple. [17]	31
Figura 7.- Diagramas CCT para acero 4340 y 1045; el primero es altamente templable mientras que el segundo es de muy baja templabilidad. [2]	32
Figura 8.- Efecto de las propiedades térmicas sobre el esfuerzo efectivo promedio. [6]	35
Figura 9.- Efecto de las propiedades térmicas sobre la curvatura del componente. [6]	35
Figura 10.- Efecto de las propiedades metalúrgicas sobre el esfuerzo efectivo promedio [6]	36
Figura 11.- Efecto de las propiedades metalúrgicas sobre la curvatura del componente. [6]	37
Figura 12.- Efecto de las propiedades mecánicas sobre el esfuerzo efectivo promedio. [6]	37

Figura 13.- Efecto de las propiedades mecánicas sobre la curvatura del componente. [6]	38
Figura 14.- Medidas estandarizadas de la probeta Navy C-Ring [12]	41
Figura 15.- Información tomada de la base de datos Scopus sobre nanofluidos. a) Número de documentos publicados con la palabra nanofluido y b) Porcentaje de cada tipo de documento publicado. [24]	43
Figura 16.- Conductividad térmica de diversas partículas utilizadas para nanofluidos [24]	49
Figura 17.- Ordenamiento de nanopartículas de Látex cargadas en agua desionizada, burbuja (200 de aire μm) en cristal [21]	60
Figura 18.- Sedimentación y arrastre de dispersiones de nanografito en etilenglicol a distintos tiempos; la primera fotografía corresponde a un día, la segunda a 3 días y la última a una semana. [31]	63
Figura 19.- Disminución del coeficiente de transferencia de calor (HTC) para tres nanofluidos de alúmina base agua con SDS como agente dispersante [19]	64
Figura 20.- Curvas de Tafel para acero bajo carbono en dos diferentes electrolitos: agua destilada + 0.1M NaCl y Nanofluido de puntos cuánticos de carbono (C-Dot) [32]	66
Figura 21.- Curvas de Nyquist para acero bajo carbono en dos diferentes electrolitos: agua destilada + 0.1M NaCl y Nanofluido de punto de carbono (C-Dot) [32]	67
Figura 22.- Microscopías por electrones secundarios para la superficie del SS306 en presencia de dos diferentes electrolitos: a) y c) corresponden a la mezcla eutéctica de sales, b) y d) corresponden al nanofluido híbrido GO/TiO ₂ [33]	68
Figura 23.- Arriba: Proceso de presnado en caliente (<i>Hot Press Forming,HPF</i>);	

izquierda: producto después del procesamiento y secciones de donde se maquinaron las probetas de tensión;	
derecha: dimensiones de las probetas de tensión. [4]	74
Figura 24.- Microdurezas promedio en escala Vickers para tres especímenes maquinados de la lámina conformada templada en los distintos medios de enfriamiento (agua y nanofluido). [4]	75
Figura 25.- Resistencia a la tensión promedio (UTS), de tres especímenes maquinados del producto del HPF.[4]	76
Figura 26.- Microscopia electrónica de barrido (MEB, SEM) en distintas posiciones para acero AISI 1010 templado en agua destilada, NF: agua + 0.5 wt% CNT, NF: agua+ 0.5wt% CNT+ Surfactante (Triton X-100) con misma velocidad de inmersión y sin agitación. [12]	77
Figura 27.- Microestructura para la lámina de llegada para el proceso de HPF. [4]	78
Figura 28.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 3 segundos de residencia.	79
Figura 29.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol Alúmina) con 5 segundos de residencia.	80
Figura 30.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 8 segundos de residencia	80
Figura 31.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 10 segundos de residencia.	81
Figura 32.- Microestructura para la lámina templada en agua helada con 10 segundos de residencia.	81

Figura 33.- Temple de la esfera de acero inoxidable grado 304 en nanofluidos de alúmina con concentraciones de a) 0.001, b) 0.01 y c) 0.1 %vol.;	
d) Imágenes después de 22 segundos del séptimo temple	84
Figura 34 a).- Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de alúmina en concentración 0.1%vol. [14]	86
Figura 34 b).- Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de sílice en concentración 0.1%vol [14]	86
Figura 34 c).- Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de diamante en concentración 0.1%vol. [14]	87
Figura 35.- Ángulo de contacto entre la esfera de SS el agua y los distintos nanofluidos de concentración 0.1%vol.	88
Figura 36.- Microscopía para una placa de acero inoxidable grado 306 templada en (a) agua pura, (b) NF 0.01%vol. Al_2O_3 , (c) NF 0.01%vol. ZrO_2 , (d) NF 0.01%vol. SiO_2 . [20]	90
Figura 37.- Ángulo de contacto para a) gota de agua pura sobre superficie templada en agua, b) gota de NF Al_2O_3 0.01%vol. sobre superficie templada en agua, c) gota de agua sobre superficie templada en NF Al_2O_3 0.1%vol., d) gota de NF Al_2O_3 0.1%vol. sobre superficie templada en NF Al_2O_3 0.1%vol. [20]	91
Figura 38. Perfilometría de la superficie de una placa de acero inoxidable grado 306 templado en (a) agua pura y (b) nanofluido con 0.1vol% de alúmina. [20]	92

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.- Espesor crítico de la capa de vapor. [14]	22
Ecuación 2.- Severidad de un medio de Temple. [1, 2]	24
Ecuación 3.- Calor específico para nanofluido [5]	55
Ecuación 4.- Calor específico para nanofluido [5]	55
Ecuación 5.- Calos específico para nanofluido [24]	55
Ecuación 6.- Densidad de un nanofluido [5, 24]	55
Ecuación 7.- Ángulo de contacto aparente. [28]	57
Ecuación 8.- Coeficiente de propagación [29]	58
Ecuación 9.- Cavidades activas por unidad de área superficial [28]	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Severidades para los medios de temple más comunes sin agitación [1]	25
Tabla 2.- Descripción de los tratamientos: tratamiento térmico convencional (<i>Conventional Heat Treatment, CHT</i>) y tratamiento criogénico profundo (<i>Deep Cryogenic Treatment, DCT</i>) [10]	40
Tabla 3.- Dureza promedio obtenida para agua, y nanofluido con CNTs con y sin surfactante [16]	73
Tabla 4.- Rugosidad superficial del acero AISI 1010 después del temple en agua, con nanofluido y nanofluido con sufractante [16]	82

INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico de temple es uno de los procesos más antiguos, utilizado principalmente para el desarrollo armamentístico teniendo al acero como el principal material en su aplicación. Un vestigio antropológico del temple fue el descubrimiento de un hacha cuya edad ronda entre los años 1200-1100 a. de C. encontrada en Palestina cuyo material correspondió a un acero martensítico revenido [1].

Actualmente el temple no sólo es utilizado de manera armamentística, sino en una amplia gama de componentes ingenieriles tales como: engranes, resortes, ejes, semi ejes [2], brocas de vástago cónico, cortadores [3], componentes para automóviles [2, 4], industria aeronáutica, etc.

Pese a ser un tratamiento ampliamente usado y de una gran importancia tecnológica la fenomenología del proceso sigue incierta, debido a las complejas y dinámicas interrelaciones existentes entre los fenómenos térmicos, metalúrgicos, mecánicos, y reológicos. Sin embargo, con la simulación computacional se ha podido acercar la descripción matemática de los fenómenos cada vez más a la realidad, mediante el acoplamiento interactivo de los diversos campos (térmico, mecánico, metalúrgico) esto, principalmente mediante el uso del método del elemento finito (*FEM: Finite element method*) [5, 6, 7] y algoritmos inversos de conducción (*Inverse Heat Conduction IHC*) para alimentar los modelos y algunos otros desarrollados por los mismos investigadores.

Aun así, la experimentación sigue siendo muy utilizada para investigar los procesos involucrados durante el temple y proveen de información que es utilizada para la validación de los modelos matemáticos.

Evidentemente el tratamiento de temple es evolutivo e indispensable debido a los márgenes exigidos en las propiedades de componentes específicos, esto genera que sea necesario desentrañar la compleja fenomenología del proceso, así como modificar o generar prácticas en pro de obtener un mayor y mejor control sobre el resultado metalúrgico-

mecánico de los componentes; esto es evidente en tanto a la diversidad de tratamientos de temple que existen tales como: Temple directo (*Direct Quenching*), Temple selectivo (*Selective Quenching*), Temple por aspersores (*Spray Quenching*), Temple con neblina (*Fog Quenching*), Temple interrumpido (*Interrupted Quenching*) este último y sus variaciones conocidas como: *Austempering*, *Martempering* (*Marquenching*), Temple isotérmico (*Isothermal Quenching*) [8, 9].

Una de las modificaciones más novedosas al tratamiento del temple de manera no industrial es el uso de nanofluidos (término acuñado en 1995 por Choi [10]) como medio de temple en lugar de los medios convencionales: agua, disoluciones acuosas salinas, disoluciones acuosas poliméricas, sales fundidas, aceite mineral (base petróleo), gases inertes (N_2 , Ar, He) [3, 4, 7, 8, 11-14]. La suspensión de nanopartículas en los medios de temple convencionales, principalmente agua, ha mostrado mejoría en el desempeño térmico, teniendo cambios positivos en el coeficiente de transferencia de calor (HTC), rapidez de enfriamiento, y ruptura temprana de la capa de vapor; sin embargo, existe una ausencia en las implicaciones metalúrgicas-mecánicas de los componentes templados.

JUSTIFICACIÓN

La mayoría de la investigación sobre el uso de nanofluidos en temple se ha enfocado en el desempeño térmico del fluido, en la mejora del HTC, en la reducción de la capa de vapor y el incremento de sitios de nucleación para la etapa de ebullición por nucleación, deposición de partículas en la superficie, etc. [7, 10, 13-16, 18-21, 23-26, 29-32], sin embargo, una mínima parte aborda las relaciones metalúrgicas-mecánicas (microestructura y dureza) de la pieza de temple [4, 12], por ello es menester recopilar información para vislumbrar posibilidades de investigación del uso de nanofluidos aplicados al temple del acero con un enfoque principalmente metalúrgico.

OBJETIVO

La finalidad de este proyecto es documentar bibliográficamente la mejora de los parámetros térmicos, mecánicos y metalúrgicos del tratamiento térmico de temple en componentes de acero (1010, inoxidable 304, acero al boro 22MnB5) con el uso de nanofluidos base agua y mezcla de etilenglicol y agua 40:60, en comparación con el temple en agua, a través de la consulta de artículos publicados en bases de Datos (ProQuest, Sciencefinder, Sciendirect, Springer-link, BiDiUNAM y TESIUNAM).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La primera etapa consistió en la asistencia al taller "Estructura Informacional de Frontera: Investigación Bibliográfica Asertiva" impartido virtualmente por la Facultad de Química, en el cual se desarrolló la frase de investigación del proyecto (objetivo), además se mostraron las bases de datos disponibles para los alumnos de la universidad así como la búsqueda dentro de las plataformas de cada una; posteriormente se generó una matriz lingüística con las palabras claves y sus combinaciones para un mapeo del número de resultados obtenido para cada combinación.

Finalmente se hizo uso de las bases de datos de revistas y de operadores Booleanos para la obtención de las referencias que sustentan el presente trabajo.

1.- Antecedentes teóricos

1.1 Temple

1.1.1 Definiciones de temple

El tratamiento térmico de temple es definido de las siguientes maneras:

“Enfriamiento rápido de componentes metálicos a partir de la temperatura de disolución en el material o en el caso de los aceros, temperatura de austenización (845-870°C) [8].

“Enfriamiento rápido de partes metálicas cuya temperatura es alta, para lograr una mejor microestructura y realzar las propiedades mecánicas de los componentes” [12].

“Consiste en el rápido enfriamiento de aleaciones de acero después de la Austenización sometiéndolos al enfriamiento en un medio apropiado” [16].

“Se refiere al rápido enfriamiento de un objeto sólido muy caliente mediante la exposición a un líquido mucho más frío” [14].

De las definiciones anteriores se puede generar una general para los aceros:

“Enfriamiento rápido de piezas de acero desde la temperatura de austenización (845-870°C) en un medio de enfriamiento apropiado para generar una microestructura, propiedades mecánicas y dimensiones óptimas para un fin determinado”.

El objetivo final del temple en los aceros es endurecerlos a través de un enfriamiento rápido que promueva las transformaciones martensítica y bainítica, siendo más común la primera. Pese a que, la finalidad es el endurecimiento del acero, el tratamiento puede considerarse exitoso cuando: Se obtiene la microestructura, dureza,

resistencia o ductilidad minimizando los esfuerzos residuales, la distorsión y el riesgo de agrietamiento [8]; con esto se evidencia que el tratamiento de temple, en un sentido más profundo, va más allá de sólo endurecer el material, sino que deben de alguna manera controlarse, en la medida de lo posible, los parámetros del proceso para lograr que el componente final cumpla con los requerimientos mecánicos, metalúrgicos, químicos y geométricos para la función que esté destinado.

La Figura 1 muestra el acoplamiento de los campos mecánicos, térmico y metalúrgico durante el temple [6].



Figura 1.- Acoplamiento entre los campos mecánico, térmico y metalúrgico durante el enfriamiento de una pieza metálica [6].

1.1.2 Etapas del temple

Tres etapas características pueden identificarse durante el tratamiento térmico de temple, Figura 2, las cuales plantean la interrelación de los diversos fenómenos implicados (térmicos, mecánicos, metalúrgicos); estas etapas son identificables, mediante una curva de enfriamiento obtenida al medir la temperatura del componente a templarse durante

su enfriamiento al entrar en contacto con el medio de temple o pueden ser visualizadas efectuado el proceso dentro de un tanque transparente e incluso mediante señales de ruido.

Así mismo un control sobre la duración y transición entre las etapas puede lograrse a través de la modificación de la velocidad de temple, condiciones superficiales de la pieza, temperatura del baño, concentración de aditivos, propiedades termo físicas del medio de temple, uso de magnetismo, etc. [2, 5, 10, 13, 15, 17, 18]; las etapas anteriormente mencionadas se describen a continuación:

1.1.2.1 Etapa A / Capa de vapor (*Vapor blanket*)

Esta etapa se caracteriza por la formación de una película de vapor del medio de temple alrededor del componente, durante esta etapa la velocidad de enfriamiento es muy baja ya que la capa funciona como un aislante y el líquido no está en contacto con el componente, por tanto, la transferencia de calor se lleva principalmente por el mecanismo de radiación (el mecanismo secundario es difusivo) [8].

La temperatura a la cual la capa es mantenida se conoce como temperatura de Leidenfrost o también conocido como el flujo de calor mínimo (*Minimum Heat Flux, MHF*) [8, 13, 14], Huang y Carey han demostrado que esta temperatura aumenta con la adición de sales en agua y con la velocidad del temple [17]. Pese a que la estabilidad de la capa aumenta con la temperatura del baño, esta puede colapsarse con el uso de agitación o aditivos (uno común es el Dodecilsulfato de Sodio (*Sodium DodecylSulphate, SDS*) [13, 17, 19] y el uso de campos eléctricos, acústicos [13] y magnéticos [18].

Esta etapa es generalmente indeseable ya que genera, en algunos casos, suavidad en la superficie de aceros templables, distorsión y generación de esfuerzos residuales en el componente, consecuencia de las características del enfriamiento durante el periodo de tiempo en el cual tiene lugar. El colapso homogéneo de la capa es importante para evitar

la acumulación de gradientes térmicos y esfuerzos residuales que tienen como consecuencia la distorsión [14]; por lo que en la práctica del temple se trata de disminuir el tiempo de estabilidad de la capa e incluso eliminar su aparición [14].

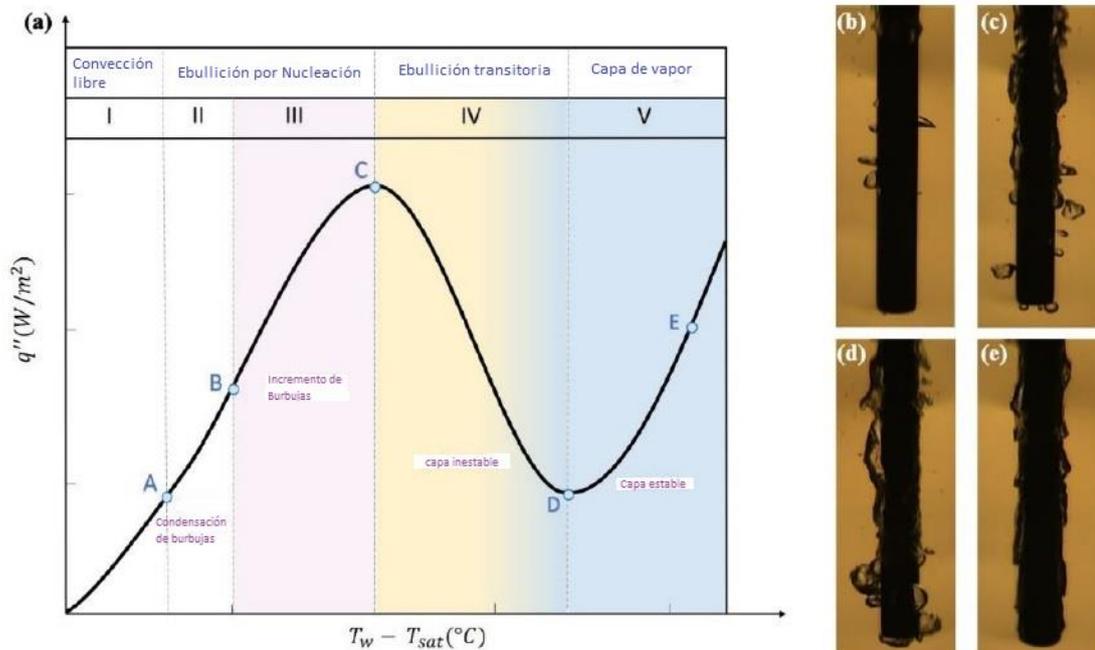


Figura 2.- Curva de ebullición para agua a 1atm, dónde se muestra en a) la curva de ebullición con las diferentes etapas del temple y de b) a e) se visualizan las distintas etapas en el sólido templado [24].

1.1.2.1.1 Capa de vapor en agua como medio de temple

Durante el temple de aceros en agua la duración del fenómeno de la capa de vapor depende de las condiciones fisicoquímicas y reológicas del medio, así como la condición superficial de la pieza o campos externos aplicados. En agua desionizada (*Dionized water, DW*) los gradientes térmicos presentes en la pieza suelen ser muy altos lo cual es factor para el desarrollo de esfuerzos residuales y distorsión en la pieza final; se ha encontrado que la adición del surfactante SDS puede generar que la capa de vapor se estabilice, aumentando un 43% el tiempo de temple en comparación al DW, esto debido a la deposición del aditivo en la

superficie, sin embargo, la transferencia de calor se optimiza en la etapa de ebullición por nucleación [13].

Se encontró en el temple de probetas de acero inoxidable que una condición superficial de rugosidad lleva a la formación de una estructura completamente martensítica y una condición superficial lisa lleva a una microestructura mezclada [12]. Esto puede deberse a que las cavidades que se forman en la superficie con rugosidad promueven energéticamente la ebullición del líquido en contacto con la superficie [20, 21]. La turbulencia generada por las burbujas en el agua tendrá como consecuencia la reducción del tiempo de la etapa de vapor [8].

1.1.2.1.2 Desestabilización de la capa de vapor en disoluciones salinas como medio de temple

La adición de sales como el NaCl, Na₂SO₄, NaNO₂ en agua puede endurecer aceros de baja templabilidad como el AISI 1045 mediante la reducción e incluso eliminación de la capa de vapor en el componente, lo cual incrementa las velocidades de enfriamiento, aun cuando el baño de temple está caliente; sin embargo, la adición de sales inestables como el NaHCO₃ que se descompone en CO₂, puede estabilizar la capa de vapor [17].

A continuación, se describen distintos mecanismos que tienen lugar para la desestabilización de la capa de vapor en disoluciones salinas [17].

- **Resistencia térmica:** Al formarse la capa de vapor en el componente se genera una región saturada de sal, es ahí cuando la sal se adsorbe en la superficie del metal caliente. El proceso consiste en el hecho de que una capa de sal adsorbida actúa como una resistencia térmica. Este proceso es el responsable de generar los núcleos primigenios de la etapa B [17, 22].

En la práctica las velocidades de enfriamiento pueden acelerarse mediante el recubrimiento de los componentes, así las superficies

recubiertas tienen una mayor temperatura de ebullición desestabilizando la capa de vapor.

Un acero oxidado o recubierto presenta transiciones entre etapas más rápidas que aquél no recubierto [8, 17].

- **Micro-explosiones:** Fenómeno asociado a la deposición de cristales salinos en la superficie del metal caliente en los primeros instantes del temple, estos actúan como núcleos que promueven las micro-explosiones durante la ebullición del medio de temple. Esto ocasiona el rompimiento de la capa de vapor de manera más homogénea y la etapa de ebullición por nucleación comienza antes.

- **Doble capa Eléctrica:** Proceso de emisión termiónica en el cual dada la alta temperatura del sólido metálico la energía cinética es suficiente para romper las fronteras energéticas y los electrones libres pueden escapar de la superficie de tal manera que ésta queda cargada de manera positiva. Otros autores consideran que los electrones migran hacia la superficie fría, por tanto, ésta se carga de manera negativa. En ambos casos el medio de temple es constituido por una disolución iónica que lleva a la formación de la doble capa eléctrica con cargas de signos diferentes en la interfase líquido-sólido, por lo cual el líquido es atraído a la superficie y la formación de la capa de vapor es imposible o muy difícil que ocurra.

Existe una relación no lineal entre la concentración de la sal y los portadores de carga, hay una concentración óptima que coincide con el flujo de calor crítico (*Critical Heat Flux CHF*), por tanto, si la concentración en la interfase sólido-líquido sobrepasa este valor, los portadores de carga disminuirán, lo cual está íntimamente relacionado con la conductividad eléctrica del medio de tal manera, que la mayor conductividad eléctrica corresponde a las mayores rapidezces de enfriamiento y a la concentración óptima de soluto [17].

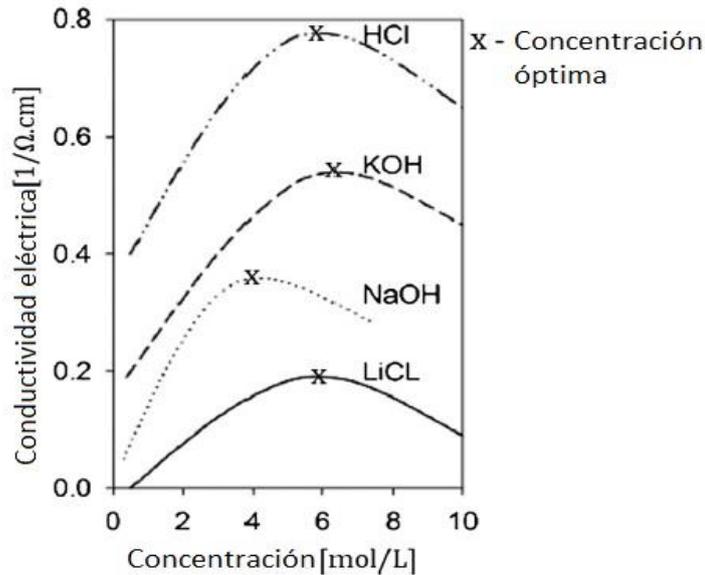


Figura 3.- Conductividad eléctrica para diferentes electrolitos en función de la concentración molar [17].

- **Supresión de la coalescencia de las burbujas:** El temple de esferas en agua ionizada y agua marina fue investigado por Hsu et. al. [17] y su estudio reveló que la existencia de la coalescencia de burbujas es una condición necesaria para la estabilización de la capa de vapor en la primera etapa en agua desionizada. Pero cuando el agua marina fue usada como medio de temple la coalescencia de burbujas no sucedió debido al potencial zeta del efecto de la doble capa eléctrica creado entre el agua marina y la esfera templada, así como otros factores entre las burbujas del agua con las sales disueltas, por tanto, la capa de vapor no se formó.

Guan y Carey usando modelos teóricos y dinámica molecular estudiaron la región interfacial entre el líquido y la fase de vapor y su influencia en las burbujas emergentes. Las simulaciones mostraron que los iones tienden a ser concentrados en el centro del líquido libre entre las fases de vapor. Esto puede ser responsable del incremento en la tensión superficial que aumenta con la adición de sal. También evaluaron la

influencia de los iones sobre el espesor crítico de la capa líquida estable [17].

Si el espesor de la capa es mayor que el espesor crítico, la capa se mantendrá estable y el par de burbujas permanecerá separado después del contacto. Pero si la capa es menor al espesor crítico la resultante ruptura de la capa llevará a las burbujas a emerger.

La ecuación 1 muestra la dependencia de la capa de vapor con distintos parámetros.

$$\delta = \left(\frac{A_H L^3}{4\pi^3 \sigma} \right)^{0.25}$$

Ecuación 1. Espesor crítico de la capa de vapor [17].

Dónde: A_H : es la constante de Hamaker, L : es el tamaño lateral de la capa de vapor, σ : representa la tensión superficial.

El uso de sales como aditivos en un medio de enfriamiento acuoso permite la alteración fisicoquímica del agua, con ello es posible influenciar la formación de burbujas en la etapa de ebullición por nucleación. Las burbujas formadas son en general más pequeñas y numerosas que en agua pura, evitándose la coalescencia e incrementando el flujo de calor debido a la gran mojabilidad y el incremento en la agitación alrededor de la superficie del material consecuencia del fuerte movimiento de las burbujas.

1.1.2.2 Etapa B/ Ebullición por nucleación (*Nucleate boiling*)

Esta etapa se caracteriza por el hecho de que en cuanto la capa de vapor se rompe, el líquido ebulle en la superficie del metal y es cuando se presentan las velocidades de enfriamiento más altas, el mayor flujo de calor y coeficientes de transferencia de calor (HTC) entre la pieza y el medio, este último es un parámetro que se busca optimizar de manera

que sea el máximo posible con la menor distorsión [5, 8, 13, 17, 19]; el mecanismo principal de transferencia de calor es la convección aunado a la turbulencia en las inmediaciones de la pieza dada la generación de burbujas del líquido. La condición de la superficie a ser templada y la mojabilidad tienen importancia en la transición a esta etapa; una mayor mojabilidad genera que el líquido tenga mayor afinidad a la superficie, por tanto, esta etapa se acelera, una mayor rugosidad genera que el flujo de calor aumente debido a la mayor cantidad de sitios de nucleación [12-14, 16, 20, 21].

1.1.2.3 Etapa C/ Enfriamiento convectivo (*Convective cooling*)

En esta etapa la temperatura de la pieza metálica se encuentra por debajo de la temperatura de ebullición del medio de enfriamiento y la velocidad de enfriamiento decrece; la transferencia de calor se ve afectada principalmente por la viscosidad del líquido dado que los mecanismos de transporte son, principalmente, convectivos y difusivos, sucede que a mayor viscosidad menor será la velocidad de enfriamiento [8, 17].

1.2 Medios de enfriamiento (*Cooling medium, Quenchant*)

Una cuestión inherente al proceso de temple es el medio de enfriamiento, definido como aquella sustancia que servirá para la extracción del calor de la pieza tratada. En la práctica del proceso de temple los medios de enfriamiento son fluidos líquidos o gaseosos; la manipulación de las propiedades termofísicas como la conductividad térmica, calor específico, densidad y viscosidad afectan de diversas maneras al coeficiente de transferencia de calor (HTC), el flujo de calor crítico (CHF), el flujo de calor mínimo (MHF) impactando directamente a los campos térmico-mecánico-metalúrgico del componente, los cuales determinarán el éxito o fracaso del proceso, entendiendo cómo éxito la definición proporcionada previamente [8, 10, 15, 17]; la modificación

de las propiedades del medio de temple puede llevarse a cabo mediante agentes surfactantes, suspensión de partículas, disolución de sales o polímeros, modificadores de pH, temperatura, campos acústicos o eléctricos [10, 15].

Los medios de temple más comunes utilizados de manera industrial son: agua, disoluciones salinas o salmueras, aceite mineral, gases inertes (N₂, He, Ar) y las disoluciones poliméricas; la selección de uno o varios medios de enfriamiento estará en función de: la templabilidad de la aleación en específico, espesor de la sección, tamaño y forma del componente, y las velocidades de enfriamiento necesarias para obtener la microestructura deseada [8].

Un parámetro importante de los medios de temple es aquél conocido como: severidad, la cual ésta asociada a la velocidad con la que el medio de enfriamiento extrae el calor de la pieza templada, fue definida por Grossman et. al. en 1938 junto con su método para determinar la templabilidad de un material; la severidad de Grossman (H) de un medio de temple puede definirse cómo:

$$H = \frac{HTC_{metal-líquido}}{2K_{metal}}$$

Ecuación 2.- Severidad de un medio de Temple [8, 9].

Dónde HTC: coeficiente de transferencia de calor, K: conductividad térmica, H: Factor de Severidad.

En la literatura se reportan distintos valores de severidad para los medios de enfriamiento más comunes, un valor numérico alto de este parámetro significa una severidad alta teniéndose valores desde 0.2 a 12; Como se observa en la Tabla 1, un medio de enfriamiento no tiene un valor constante de severidad, este varía con las condiciones dinámicas del medio; al depender directamente del HTC, la adición de aditivos, y la suspensión de partículas tendrán efecto en la severidad.

Agitación del medio de temple	Movimiento de la pieza	SEVERIDAD DE TEMPLE			
		Aire	Aceite	Agua	Salmuera
Ninguno	Ninguno	0·02	0·3	1·0	2·2
Ninguno	Moderado	—	0·4–0·6	1·5– 3·0	—
Ninguno	Violento	—	0·6–0·8	3·0– 6·0	7·5
Violento o atomizador		—	1·0–1·7	6·0–12·0	—

Tabla 1.- Severidades para los medios de temple más comunes sin agitación [8].

1.2.1 Viscosidad

Esta propiedad afecta la etapa de la capa de vapor, así como la etapa de enfriamiento convectivo y es parte de los parámetros responsables de la inducción de esfuerzos residuales y distorsión [17] ya que a mayor viscosidad decrece la velocidad de enfriamiento en la capa de vapor [8] generando mayores gradientes térmicos internos y con ello mayor cantidad de esfuerzos residuales.

La viscosidad de un medio depende de su naturaleza, de manera inversa con la temperatura, adición de aditivos, y la suspensión de partículas, etc. [8, 15, 17].

1.2.2 Mojabilidad

La mojabilidad puede asociarse a la tensión entre la superficie sólida y el líquido del medio de temple, una interacción energéticamente repulsiva tendrá una mayor tensión superficial, un mayor ángulo de contacto y en consecuencia una baja mojabilidad. Por el contrario, una interacción atractiva traerá consigo un menor ángulo de contacto, menor tensión superficial y una alta mojabilidad. Esta propiedad del medio de enfriamiento tendrá efecto en el desarrollo de las etapas del temple: al aumentar la mojabilidad del medio se ha encontrado que la capa de vapor es desestabilizada en menor tiempo y su ruptura es más

homogénea y propagativa [17], así la cinemática del mojado tendrá consecuencias metalúrgicas y mecánicas en la pieza a templar [10].

Pueden añadirse aditivos al medio de temple que mejoran la mojabilidad, ya sea agentes surfactantes [13] o partículas en suspensión [10], así como, mediante la deposición de partículas en la superficie [14, 20, 21]. El tamaño de las partículas utilizadas tiene un rango amplio yendo desde la escala micrométrica hasta la escala nanométrica.

1.2.2.1 Concentración micelar crítica (*Critical micelle concentration, CMC*)

Se refiere a la concentración de surfactante a la cual el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie es el mínimo, posteriores adiciones de agente tendrán consigo un incremento en el ángulo de contacto.

La Figura 4. Muestra la variación del ángulo de contacto entre una superficie de acero inoxidable grado 304 con agua pura y diversas concentraciones de surfactante dodecilsulfato de sodio, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OS}(=\text{O})_2^-\text{Na}^+$ (SDS) [13]. El efecto observado puede entenderse a través de la morfología del surfactante, cuya estructura química es una cadena de hidrocarburos con un grupo funcional sulfato en un extremo el cual está polarizado de manera negativa, mientras que la cadena permanece casi neutra en carga, esta distribución de la carga genera interacción entre las mismas moléculas, en tanto al ordenamiento, formando micelas a partir de cierta concentración (CMC), estas micelas tienen forma esférica cuya superficie es la sección que interactúa con el fluido, mientras que hacia el centro se orienta la sección que no interactúa con el fluido. A concentraciones menores que la crítica puede presuponerse que las cadenas se adhieren a la superficie sin agregarse entre ellas, sirviendo de intermediario en la interacción del fluido con la superficie, en consecuencia se mejora el ángulo de contacto, sin embargo, al sobrepasar la concentración micelar crítica, las

moléculas comienzan a interactuar entre sí sin adherirse a la superficie por lo cual ya no median la interacción entre el líquido y la superficie resultando en el incremento del ángulo de contacto.

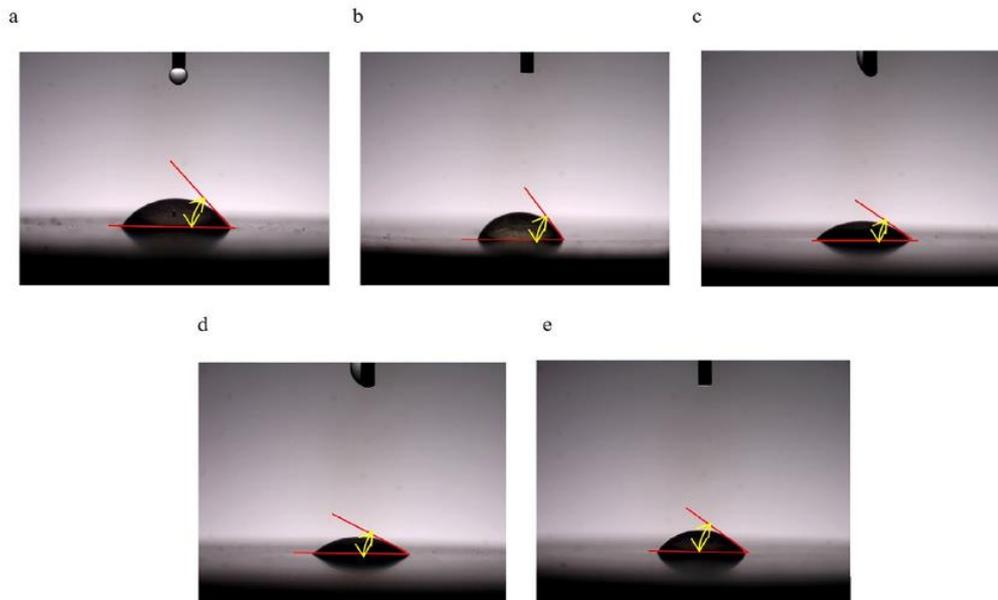


Figura 4.- Ángulo de contacto estático para a) Agua destilada $\theta=57.45^\circ$, b) Concentración SDS 1mM, $\theta=56.20^\circ$, c) Concentración 4mM $\theta=47.68^\circ$, d) Concentración 8mM $\theta=38.02^\circ$ y e) Concentración 10mM $\theta=57.01^\circ$ [13].

La figura 5, muestra la variación del ángulo de contacto en función de las concentraciones ocupadas en el estudio

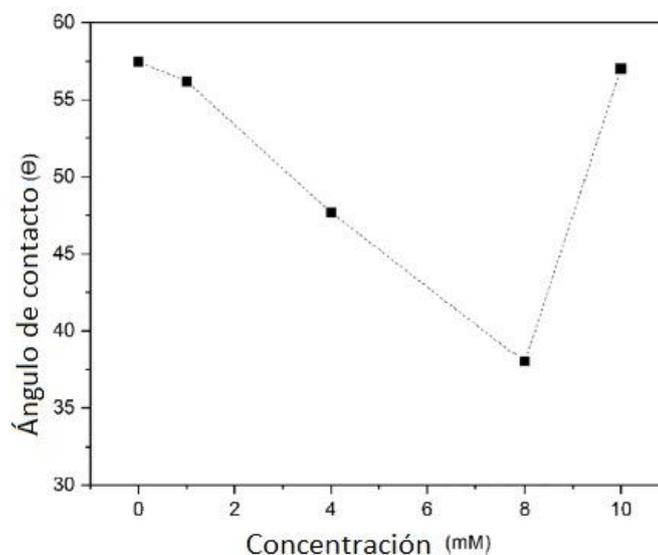


Figura 5.- Variación del ángulo de contacto del agua pura en acero inoxidable 304 con la adición de surfactante SDS [13].

1.2.3 Conductividad térmica

Esta propiedad es de alta importancia para el tratamiento térmico del temple, ya que, el fundamento de este es remover el calor sensible de la pieza metálica, entre más rápido fluya el calor dentro del líquido mayor será la rapidez de enfriamiento. Es por ello por lo que la mejora en esta propiedad es mayormente investigada en comparación a las demás propiedades termofísicas de los medios de enfriamiento [10, 15, 24-27].

1.2.4 Temperatura de Leidenfrost o Flujo de calor mínimo (*Minimum heat flux, MHF*)

La temperatura de Leidenfrost o temperatura característica es aquella a la cual la capa de vapor formada por el medio de temple es estable [8]; este punto también es conocido como flujo de calor mínimo (MHF) [14] ya que durante el proceso de temple es la etapa con mejor transferencia de energía. Esta temperatura depende de la naturaleza del baño, y aditivos agregados. Se sabe que la adición de sales en el baño acuoso genera un aumento en esta [17], así como la condición superficial, la oxidación y la rugosidad de la pieza a ser templada [14, 16, 20, 21]; además se ha encontrado que esta temperatura es independiente de la temperatura inicial del metal a ser tratado [8]. Este punto puede ser visualizado en la primera inflexión de la curva de enfriamiento del componente (véase Figura 6) [14] y es un punto importante para la transición entre la primera y segunda etapa del temple [17].

1.3 Templabilidad

Se define como la habilidad para formar la fase martensítica a distintas velocidades de enfriamiento. Entre mayor sea su valor, mayor será la capacidad de endurecimiento del acero en secciones más grandes [9].

La templabilidad puede ser determinada numéricamente a través de los siguientes dos métodos:

Método de Grossman: Reporta un solo valor de templabilidad, siendo aquél el diámetro de una barra que contiene cierto porcentaje (usualmente el 50%) de martensita en el centro cuando es templada en algún medio de enfriamiento; es un método comparativo gráfico que hace uso de un medio de temple ideal y un diámetro de barra ideal; fue el primer intento por predecir el comportamiento de temple de barras [9].

El ensayo Jominy (ASTM A 255) [8] es una prueba estandarizada en la cual una probeta de dimensiones normalizadas es austenizada y enfriada en solo un extremo; posteriormente se deben de tomar mediciones de dureza cada 1/16 de pulgada a lo largo de la probeta para obtener el perfil de dureza Jominy. Los resultados obtenidos se reportan en términos de una curva de dureza contra distancia a la orilla templada en unidades Jominy, se requieren las curvas Jominy-Lamont para hacer la correlación con diámetros reales [9]. Es un método empleado de manera industrial [9].

1.4 Curva de enfriamiento

Particularmente en el proceso de temple es un gráfico construido al registrar la temperatura del componente en distintos puntos, usualmente la superficie y el centro mediante el uso de termopares durante el tiempo del proceso; para ello es necesario un adquisidor de datos conectado a los termopares insertados en el componente y éste a un ordenador que analiza los datos a cierta frecuencia y genera el gráfico; de los datos registrados es posible obtener los valores para la rapidez de enfriamiento que puede definirse como el cambio de la

temperatura con respecto al tiempo; también es posible determinar las diferentes etapas del temple y su duración, así como si ocurren transformaciones de fase exotérmicas o endotérmicas en el material [4, 13, 14]. Algunos adquisidores de datos utilizados en la literatura son:

- HP Agilente 34980-A, Velocidad de recopilación de 10 Hz [14]
- Módulo de Temperatura NI 9212 con una razón de lectura de 2/s [13]
- ZR-RX25 [4]

A partir de las curvas de enfriamiento se puede estimar cualitativamente la severidad de un medio de temple, al comparar las rapidezces de enfriamiento producidas por el medio de temple en condiciones específicas, las velocidades máximas de enfriamiento y temperatura a la que ocurren, temperatura de Leidenfrost, gradientes térmicos entre centro y superficie, etc. [17, 27], o puede estimarse cuantitativamente mediante el modelado por el método del elemento finito (*Finite Element Method, FEM*) o algoritmos de conducción inversa (*Inverse Heat Conduction, IHC*) alimentados con los datos de temperaturas adquiridos [5-7]. En la Figura 6. se muestra una curva genérica para el enfriamiento y la velocidad de enfriamiento.

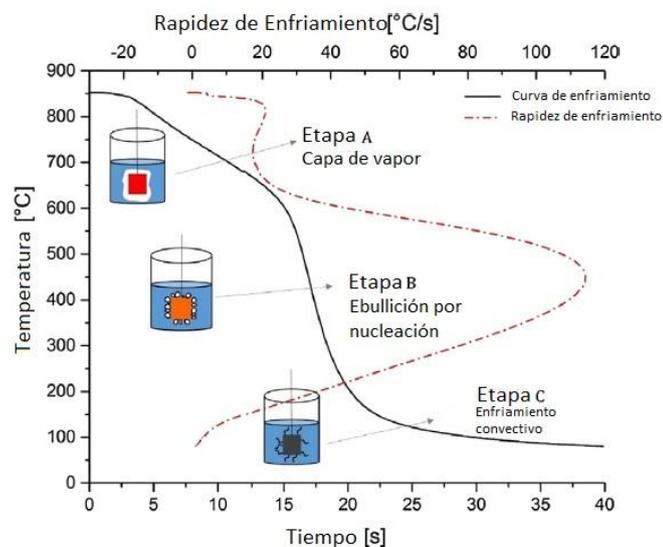


Figura 6.- Curvas de enfriamiento y velocidad genéricas junto con las 3 etapas comunes del proceso de temple. [17]

1.4.1 Diagramas de transformación isotérmica y de enfriamiento continuo (*Isothermal transformation IT, Continuous cooling transformation, CCT*)

En el ámbito metalúrgico son bien conocidos los diagramas de transformación isotérmica (*Isothermal transformation, IT*) los cuales son particulares para un material (composición constante) y muestran las transformaciones presentes en el material con respecto al tiempo; estos diagramas como su nombre lo implica, son aplicables cuando el material se transforma a una temperatura constante y no son utilizados en la práctica industrial del temple debido a que no considera la temperatura como variable, lo cual sucede durante el tratamiento [8,9]. Por ello, en la práctica se utilizan los diagramas de enfriamiento continuo (*Continuous cooling transformation, CCT*) en los cuales se superpone la curva de enfriamiento obtenida en un baño de temple de condiciones específicas y pueden determinarse las fases presentes en la microestructura final e incluso la templabilidad de un acero [8], en la figura 7 se muestra un ejemplo con dos diagramas CCT para dos diferentes aceros.

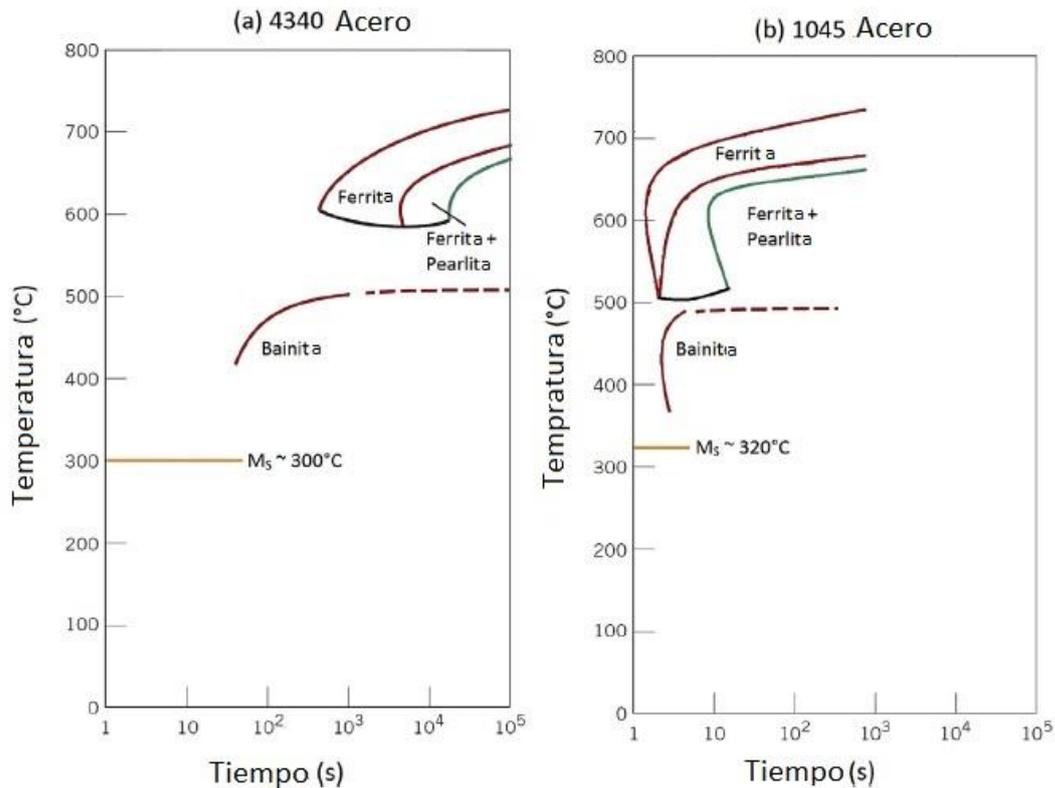


Figura 7.- Diagramas CCT para los aceros 4340 y 1045; el primero es altamente templable mientras que el segundo es de muy baja templabilidad, obsérvese el tiempo que se cuenta en ambos diagramas para enfriar el material por debajo de la temperatura Ms, en el primer diagrama se cuenta casi con 100 s antes de la transformación Bainítica, mientras que para el segundo diagrama la transformación de Austenita a Ferrita primaria sucede en 2 segundos aproximadamente; el desplazamiento de los campos de transformación es consecuencia de la composición química del acero, suponiendo que el tamaño de grano es el mismo [2].

Los campos de transformación de un material pueden ser modificados mediante la adición de elementos de aleación (EA); en el caso de los aceros se tienen EA que estabilizan los campos de la Austenita (gamágenos) o de la Ferrita (alfágenos), elementos que generan carburos; el campo de transformación asimismo puede desplazarse en el tiempo de manera que se retarden o aceleren las transformaciones

difusionales, mediante el tamaño de grano y los elementos de aleación, estos últimos pueden elevar la templabilidad del acero [8, 9].

Algunos elementos de aleación y sus efectos son los siguientes [8]:

-Mn: Siempre presente, aumenta la templabilidad; formador de carburos; estabilizador de la Austenita.

-Cr: Formador de Carburos; estabilizador de la Ferrita.

-B: Aumenta la templabilidad del acero.

Ti: Estabilizador de la Ferrita.

1.5 Distorsión durante el temple

La distorsión puede definirse cómo: un cambio dimensional irreversible y a veces impredecible de un componente durante el procesamiento, desde el tratamiento térmico y cambios de temperatura hasta la carga durante su servicio [8]. Este es uno de los parámetros más importantes dentro del tratamiento térmico de temple, ya que el componente tiene un propósito determinado lo que implica el cumplimiento de ciertas especificaciones en términos de propiedades mecánicas y metalúrgicas, así como geométricas, lo que establece un estricto control de calidad que implica tolerancias muy pequeñas con respecto a las propiedades críticas para el desempeño [3, 8, 9].

La distorsión en el temple es un proceso que involucra los campos metalúrgicos, térmicos y mecánicos, vinculados entre sí de manera bastante dinámica y compleja, las transformaciones inducidas entre los campos traen como consecuencia la aparición de fenómenos térmicos, mecánicos y metalúrgicos que generan distorsión, tales como: esfuerzos residuales, gradientes térmicos, cambios de parámetros de red, transformaciones de fase, esfuerzos de corte, tensión y compresión, etc. [5, 6, 28].

1.5.1 Tipos de deformación

-Distorsión de Tamaño: Cambio neto en un volumen específico entre la matriz y el producto de transformación de fase sin cambio en forma geométrica [8].

-Distorsión de Forma (*Warpage*): Cambio en la forma geométrica y se revela por cambios de curvatura (curvado), doblado, o torsión y cambios dimensionales no simétricos sin cambio en el volumen [8].

Ambos fenómenos suceden durante el tratamiento térmico de temple.

1.5.1.1 Efecto de las propiedades del material sólido en el temple

Mediante la validación y el análisis de sensibilidad de un modelo matemático con información sobre distorsión publicada en la literatura se encontró el efecto que tienen las propiedades térmicas, mecánicas y metalúrgicas del material a ser templado sobre la distorsión y esfuerzos residuales [6].

1.5.1.1.1 Propiedades térmicas

Se encontró que la conductividad térmica del material templado es dominante sobre las demás propiedades térmicas en la curvatura y el esfuerzo residual.

En general, el incremento de todos los parámetros térmicos (K , C_p , ρ) decrece el esfuerzo efectivo pero la curvatura aumenta como se observa en las figuras 8 y 9, lo cual no es favorable para el tratamiento térmico.

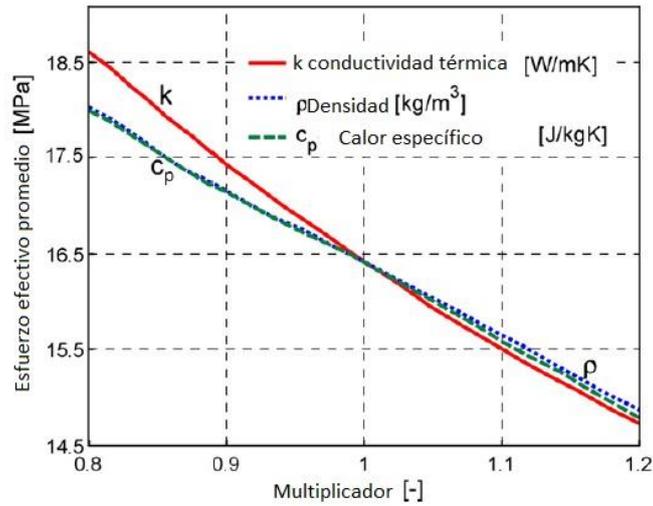


Figura 8.- Efecto de las propiedades térmicas sobre el esfuerzo efectivo promedio [6].

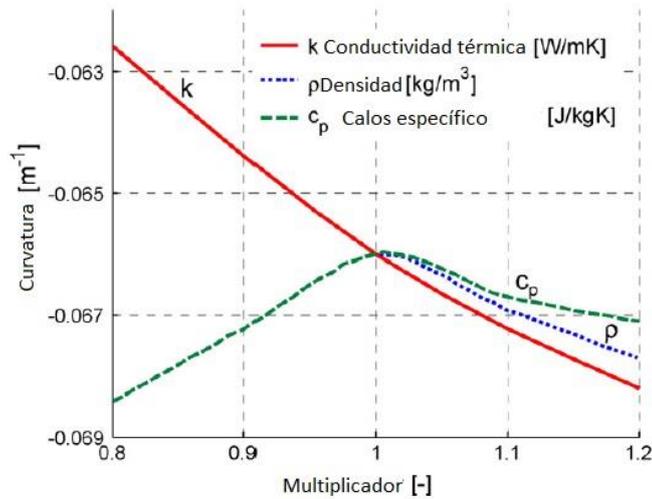


Figura 9.- Efecto de las propiedades térmicas sobre la curvatura del componente [6].

1.5.1.1.2 Propiedades metalúrgicas

El esfuerzo TRIP (*Transformation Induced Plasticity*, Plasticidad inducida por transformación) tiene una gran influencia en la distorsión y el esfuerzo residual.

Las propiedades metalúrgicas que afectan la distorsión y el esfuerzo residual son: t_s y t_e (tiempo de inicio y tiempo de fin de transformación) ellos cuales se muestran en el diagrama TTT, el coeficiente de transformación martensítica k_M , y la temperatura de transformación martensítica M_s .

La reducción en todas las propiedades metalúrgicas simultáneamente reduce la curvatura y el esfuerzo efectivo, como se observa en las figuras 10 y 11.

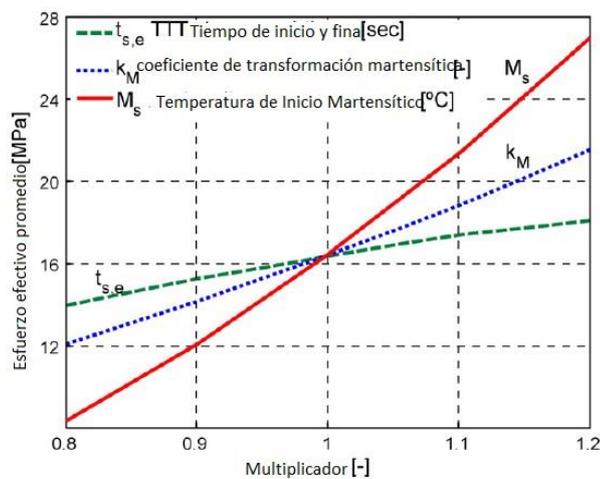


Figura 10.- Efecto de las propiedades metalúrgicas sobre el esfuerzo efectivo promedio [6].

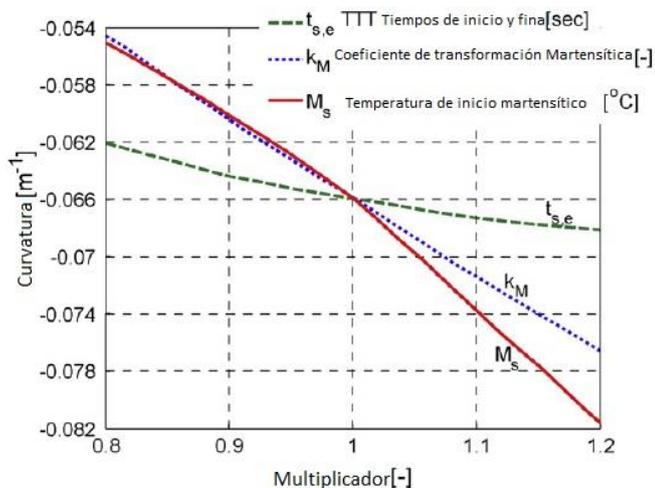


Figura 11.- Efecto de las propiedades metalúrgicas sobre la curvatura del componente [6].

1.5.1.1.3 Propiedades mecánicas

El módulo de volumen (bulk modulus), el módulo de corte (G o μ), el esfuerzo de cedencia inicial (σ_y), y el módulo de endurecimiento (H) son los cuatro parámetros mecánicos importantes que influyen la distorsión por temple y el esfuerzo residual, el efecto del incremento y decremento de cada parámetro sobre el esfuerzo efectivo y la curvatura se ilustra en las figuras 12 y 13.

El módulo de corte es la propiedad con el efecto más notable sobre el temple.

Un decremento de módulo de bulto y σ_y simultáneamente reduce la curvatura y el esfuerzo efectivo lo cual es altamente preferido.

El módulo H no tiene influencia en la distorsión ni el esfuerzo residual.

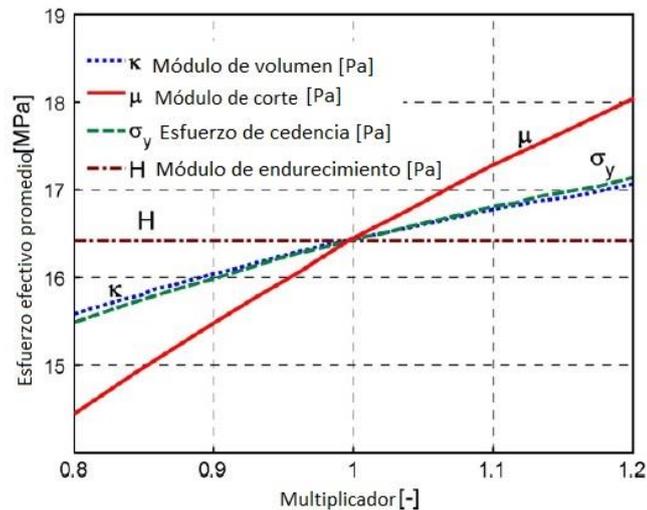


Figura 12.- Efecto de las propiedades mecánicas sobre el esfuerzo efectivo promedio. [6]

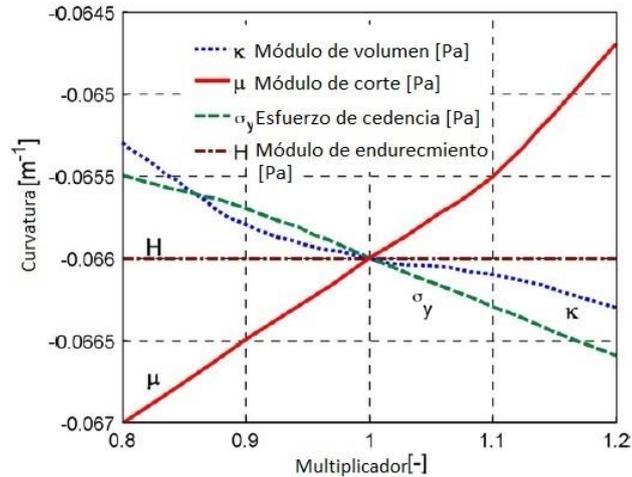


Figura 13.- Efecto de las propiedades mecánicas sobre la curvatura del componente [6].

1.5.2 Mecanismos que promueven la distorsión

Durante la austenización la magnitud de la expansión durante el cambio de estructura BCC a FCC, incrementa con el decremento del contenido de carbono en la austenita [8].

El incremento del volumen es máximo cuando sucede la transformación Austenita a Martensita, intermedio cuando la Austenita transforma a Bainita inferior, y mínimo cuando la Austenita transforma a Bainita superior o en Perlita. La deformación plástica o esfuerzo ocurre durante tales transformaciones a esfuerzos menores que el esfuerzo de cedencia de las fases presentes; este efecto conocido como plasticidad inducida por transformación (*TRIP*) tiene influencia en el desarrollo de esfuerzos durante el endurecimiento de piezas de acero. La severidad del medio de temple influencia la distorsión de los componentes [8].

Si el mojado de las piezas templadas, posterior a la etapa de vapor, ocurre de manera homogénea la transferencia de calor con el medio se vuelve uniforme y se minimiza el desarrollo de distorsión y esfuerzos residuales en el componente [10, 20, 21].

Durante el temple de un acero AISI 1045 se encontró que la distorsión está en función del patrón del flujo de medio de enfriamiento, prácticamente del diseño del tanque de temple. Dónde se hizo incidir un mayor flujo acuoso mayor fue el enfriamiento, en consecuencia, hubo una mayor transformación martensítica y la distorsión fue mayor [27].

1.5.3 Disminución de la distorsión

Durante el temple de los aceros de Herramienta R6M5 y R9 en aceite mineral y un baño de sales BKN-1 (50%BaCl₂ + 25% NaCl+ 25%KCl) en un intervalo de 450-550 °C, se encontró que la distorsión fue menor en el baño BNK-1 y la vida útil de las herramientas se incrementó entre un 20 y 30% al medirse el tambaleo (*Wobble*) de las piezas templadas en comparación al temple en aceite [3].

En el temple de una probeta Navy-C de acero AISI D2 con un tratamiento criogénico profundo (*Deep Cryogenic Treatment, DCT*) y temple al vacío se encontró que la probeta DCT presentó una microestructura con carburos secundarios mayormente distribuidos, lo cual se asocia al llenado de microfracturas del temple convencional. Además, la misma probeta presentó un mejor acabado superficial, medido como rugosidad, de un 13.43% con respecto al temple al vacío; ambos fenómenos, la distribución de los carburos secundarios y el mejor acabado superficial, se consideraron como una medida de la reducción de la distorsión. Asimismo, se logró una menor distorsión de forma y tamaño. La tabla 2 muestra la descripción de los tratamientos térmicos mencionados previamente [22].

Código de probeta	Secuencia del tratamiento térmico
CHT	Austenización a 1040°C, 2 horas + temple en gas N ₂ a 540°C+ Revenido a 540°C, 4 horas.
DCT	Austenización a 1040°C, 2 horas + temple en gas N ₂ a 540°C+ Revenido a 540°C, 4 horas + Temple criogénico profundo en gas N ₂ a -196°C, 24 horas + Doble revenido a 150°C, 2 horas

Tabla 2.- Descripción de los tratamientos: tratamiento térmico convencional (*Conventional Heat Treatment, CHT*) y tratamiento criogénico profundo (*Deep Cryogenic Treatment, DCT*) [22].

En otro trabajo [5], se estudió el efecto de la velocidad de inmersión sobre la distorsión durante el temple de placas de acero SAE 5160 en aceite mineral a 60°C; las velocidades de inmersión empleadas fueron 10, 20, 60, 100, 140 mm/s durante 90s. Asimismo con los valores experimentales se validó un modelo matemático para predecir la distorsión y se encontró que los efectos de la distorsión y los esfuerzos residuales previos al temple son despreciables, con un porcentaje de error promedio del 3.57%.

A mayores velocidades de inmersión:

- La formación de grandes gradientes térmicos dentro de la pieza son reducidos.
- Menor aparición de esfuerzos residuales.
- Eficiencia en la distribución martensítica, reduciendo la concentración de esfuerzos residuales.
- Dureza, UTS y YS aumentan con el incremento en la velocidad de inmersión.
- Se alcanzó una velocidad de inmersión crítica de 60 mm/s a partir de la cual algunos parámetros permanecen constantes.
- El material falló con una velocidad de inmersión de 10 mm/s y para una velocidad de inmersión >20mm/s no se encontró rastro de fractura intergranular.
- Para la velocidad de 10 mm/s se tuvieron esfuerzos de hasta 600 MPa con un desplazamiento de 3mm en dirección "y", mientras que para 140 mm/s los esfuerzos llegaron hasta 320 MPa y el desplazamiento de 0.1mm en dirección "y" [5].

1.5.4 Ensayos para medir deformación

El ensayo Navy-C Ring comprende el maquinado de una probeta de dimensiones estandarizadas del material a ser templado. La Figura 14. muestra la forma y dimensiones de la probeta; este ensayo tiene la intención de estudiar el comportamiento de la distorsión del componente en el temple, así la distorsión sufrida por la probeta se considera comparable a la que sufre el material durante el proceso [22, 28].

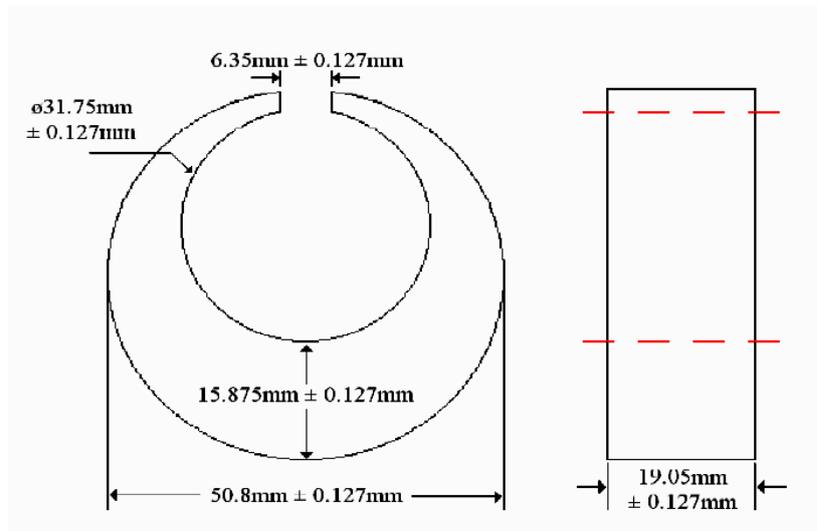


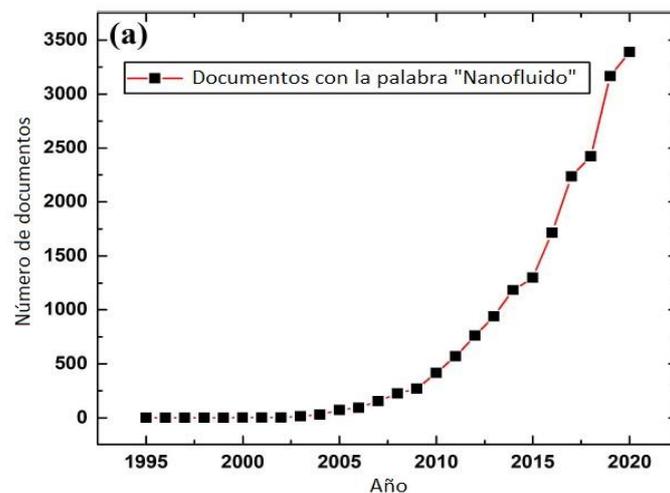
Figura 14.- Medidas estandarizadas de la probeta Navy C-Ring [12].

Del cuerpo del anillo se maquinan probetas de tensión para una investigación mecánica, así como para observar los cambios microestructurales y en dureza que acontecieron durante el procesamiento [22].

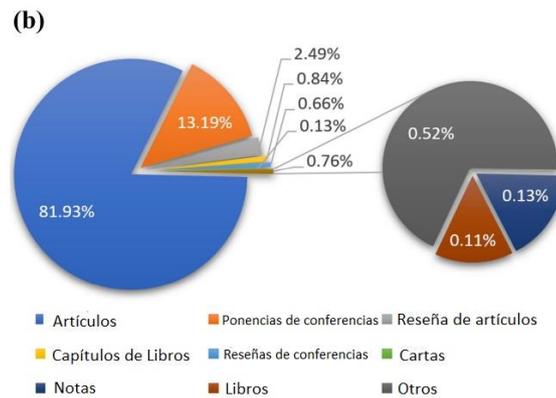
2.- Nanofluidos

2.1 Definición de nanofluidos

Los nanofluidos (*Nanofluid*, *NF*) son suspensiones ingenieriles de uso novedoso. El término fue acuñado por Choi en 1995-8 [7, 14, 23], sin embargo, la propuesta para la suspensión de partículas sólidas en un líquido base para el incremento de la conductividad térmica de este fue propuesta por Maxwell en 1873 [23]; En los últimos 25 años se ha llevado a cabo una ardua investigación sobre las propiedades termofísicas, el desempeño térmico, mojabilidad y corrosión de los nanofluidos para una gama de aplicaciones ingenieriles tales como sistemas de enfriamiento en reactores nucleares, intercambiadores de calor, colectores solares, limpieza de suelos, etc. [24, 20-25]. La Figura 15 muestra en a) la relación entre el tiempo y los documentos publicados que contengan la palabra clave de nanofluido y en b) el porcentaje de cada tipo de documento [24].



(a)



(b)

Figura 15.- Información tomada de la base de datos Scopus sobre nanofluidos. a) Número de documentos publicados con la palabra nanofluido y b) Porcentaje de cada tipo de documento publicado [24].

Muchos de los estudios térmicos realizados se enfocan en el desempeño térmico de los NF mencionando que han encontrado mejorías en la transferencia de calor, el HTC y las propiedades termofísicas del fluido base, sin embargo, pese a las asombrosas propiedades mostradas en el año 2008, se notaban los impedimentos de aplicación a gran escala de los NF debido a falta de concordancia entre los resultados experimentales, la poca caracterización de la suspensión, y un incipiente entendimiento teórico sobre los mecanismos de la transferencia de calor [23]. Pese a ello, la investigación ha seguido viento en popa, reforzada con las nuevas técnicas de análisis matemático, resultados experimentales cada vez más en acuerdo, y modelos teóricos sobre la fenomenología de los NF [4, 7, 10, 12-16, 18, 19, 23, 24, 29]. Lo anterior no debe servir como argumento para echar de lado la investigación nanotecnológica, sino al contrario para desentrañar las interrelaciones más profundas y dinámicas que acontecen con el uso de tal tecnología.

A continuación, se muestran distintas definiciones encontradas en la literatura sobre los nanofluidos:

1) Los nanofluidos son coloides ingenieriles que incluyen partículas sólidas con una conductividad térmica superior al medio solo (por ejemplo, metales, óxidos metálicos en polvo) dispersados en enfriadores tradicionales como el agua, etilenglicol, o aceite [19].

2) Un nanofluido es una suspensión uniforme y estable que excluye la tendencia a la aglomeración o cambio químico de las partículas en el fluido [23].

3) Los nanofluidos se logran al añadir cantidades controladas de nanopartículas (con al menos una dimensión menor a 100nm) dentro de un líquido [16].

2.2 Preparación de nanofluidos

2.2.1 Nanopartículas

Se consideran nanopartículas para nanofluidos aquellas que en al menos una dimensión tienen un tamaño <100 nm [14, 16], sin embargo, el tamaño utilizado en investigaciones es menor a 50 nm [10, 14, 15, 18, 19, 23].

2.2.2 Nanopartículas comunes empleadas en la síntesis de nanofluidos.

En las investigaciones se han utilizado nanopartículas (NP) orgánicas de gran peso molecular, partículas metálicas y aleaciones, cerámicas y poliméricas. Las respuestas sobre las propiedades son muy diversas entre la naturaleza de las NP. A continuación, se muestran nanopartículas utilizadas comúnmente en la investigación independientemente de su tamaño y concentración [4, 7, 10-14, 16, 18, 19, 23, 24]:

- Al_2O_3 : Óxido de aluminio, alúmina
- CuO : Óxido de cobre (II)
- SiO_2 : Óxido de silicio, sílice
- AlN : Nitruro de aluminio

- SiN : Nitruro de aluminio
- SiC : Carburo de silicio
- Al : Aluminio
- Cu : Cobre
- Al + Al₂O₃ : Aluminio con alúmina
- Cu + C : Cobre con carbono
- PCM : Materiales compuestos particulados (*Particulated composed materials*)
- CNT : Nanotubos de carbono (*Carbon nanotubes*)
- MWCNT : Nanotubos de carbono multipared (*Multi-walled carbon nanotubes*)
- TiO₂ : Óxido de titanio (IV)
- PIB : Poli-isobutileno (*Poly isobuthilene*)
- Al₂Cu : Aleación aluminio cobre
- Ag₂Al : Aleación plata aluminio
- ZrO₂ : Óxido de circonio (IV)
- GO : Óxido de grafeno (*Graphene oxide*)
- Ag : Plata
- Fe₂O₃ : Óxido de hierro (III)
- Fe₃O₄ : Magnetita

2.2.3 Obtención de nanopartículas

Las NPs pueden ser obtenidas de diversas maneras, una muy sencilla es adquirirlas a proveedores de materiales como: Aladdin Inc. [18], NYacol, Sigma-Aldrich, PlasmaChem [24]; Otras alternativas dependerán de la naturaleza del material a ser procesado; generalmente los materiales que sirven como materia prima son molidos por periodos muy extensos de tiempo (15-40h) [23] para obtener el tamaño y distribución adecuados. Las propiedades del material previos a molerse determinaran el modo de la molienda, consumo de energía, carga, medio de molienda, material de las bolas o barras del molino, etc.

La producción de polvos es una rama de la metalurgia física y del procesamiento de materiales, dentro de esta se definen dos métodos para la obtención de polvos (considerando polvo a materiales con alguna dimensión menor a 1 mm), el primero es el método mecánico: que consiste en la trituración, molienda y atomización; el segundo es el método químico: que consiste en la reducción, deposición/precipitación, reacciones electroquímicas, carbonilos, etc. La forma y tamaño de los polvos varían dependiendo el método de obtención y es necesario un acondicionamiento posterior para la reducción de tamaño o acondicionamiento para una mejor interacción energética con el medio (por ejemplo, volver hidrofílico a un material hidrofóbico, evitar aglomeraciones, sedimentación, etc.) [30].

2.2.3.1 Caracterización de nanopartículas

Para la caracterización microestructural fases, tamaño de grano, tamaño y distribución de las nanopartículas se utilizan la microscopía electrónica de transmisión (*Transmission electron microscopy, TEM*), microscopía electrónica de barrido (*Scanning electron microscopy, SEM*), Difracción de Rayos X (*X-Ray diffraction, XRD*) y Dispersión dinámica de luz (*Dynamic light scattering, DLS*) [7, 14, 23].

2.2.3.2 Daños a la salud

Durante la preparación de un nanofluido el operador está en contacto íntimo con las nanopartículas, mismas que pueden introducirse al cuerpo de manera cutánea, por inhalación o ingestión, en consecuencia, éste se encuentra en un potencial riesgo de salud, el cual se incrementa con tiempo y recurrencia del trabajo, la reducción del tamaño en las partículas, morfología, composición química, entre otros factores [24, 31]; muchos de los materiales sólidos utilizados para los NF son tóxicos.

Se ha encontrado que las nanopartículas pueden acelerar la mutación bacteriana, siendo un potencial riesgo para la vida humana y animal de un entorno en el cual éstas se encuentren como contaminación; algunos

efectos en el organismo humano pueden ser alergias, daño al sistema respiratorio (contacto alveolar), ataque a los organismos y sistema inmune, posible daño a las estructuras genéticas, inducción de desórdenes cerebrales [31].

Los daños a corto y largo plazo de materiales nanoparticulados en el cuerpo humano, animal y entorno (como ecosistema) no tiene la misma carga de investigación como la tienen las aplicaciones de éstos. Los resultados de los estudios suelen ser cualitativos con algunos intentos de cuantificar los daños [31], este es un tema de alta importancia para la implementación industrial-comercial de estos fluidos mismo que no puede pasarse por alto y siempre debe de tenerse en cuenta al desechar un NF preparado.

2.3 Métodos de preparación de nanofluidos

En la literatura uno de los métodos más empleados en la preparación de los NF es aquél conocido como método de los dos pasos (*Two step method*) [12, 18-21, 23, 25, 26, 31, 32]. Como el nombre lo indica el método consiste en dos etapas: la primera comprende la síntesis de las nanopartículas y/o acondicionamiento de las mismas, para lo cual puede ser necesario un tratamiento químico y/o proceso ultrasónico para favorecer la siguiente fase del proceso; la segunda etapa atañe la suspensión de las partículas en el fluido base, en esta puede ser necesario el uso de agentes surfactantes para evitar aglomeración de las NPs y mejorar su dispersión, aunque la adición de aditivos puede llegar a decrecer el desempeño en la transferencia de energía térmica, ya que pueden evitar la deposición de las NPs sobre la superficie a templar [12], fenómeno que se ha encontrado incrementa el coeficiente de transferencia de calor. Algunos resultados experimentales muestran que la adición de surfactante incrementa significativamente la transferencia de calor en la ebullición (*pool boiling*) [19]; los resultados dependerán de la concentración añadida de surfactante en el NF, sin embargo, algunos investigadores evitan su uso [4, 7, 14, 16, 18].

2.3.1 Fluidos base para nanofluidos

Los fluidos base para los NFs que son utilizados suelen ser los medios de temple convencionales, principalmente se usa agua, mezclas con etilenglicol (*Ethylene Glycol Water, EGW*) en proporcional habitual de 40:60 [4, 15], también es común el uso de aceite mineral como base [24]; no por ello debe considerarse que son las únicas opciones.

2.3.2 Método de análisis de las propiedades de los nanofluidos

En la literatura experimental sobre nanofluidos se utilizan las siguientes técnicas o aparatos para la cuantificación de algunas propiedades de los NF.

- Viscosidad: Viscosímetro Capilar [14]; viscosímetro para Viscosidad dinámica [7]; Reómetro (Bookfield Ultra III) [32].
- Tensión superficial: Tensiómetros (SIGMA 703) [14], método por gota [13].
- Conductividad térmica: Prueba KD2 [14], Aparatos diseñados por los mismos investigadores [23].
- Mojabilidad: Goniómetro [7]; Técnica de gota inmóvil [20].
- Tamaño: MEB, DLS (Dispersión dinámica de luz, *Dynamic Light Scattering*) [20].

2.4 Propiedades termofísicas de nanofluidos

2.4.1 Conductividad térmica

En la literatura recopilada esta propiedad es una de las más investigadas, debido a que los principales usos propuestos para los NF involucran la transferencia del calor; dentro de las investigaciones se contempla: el efecto que tiene la adición de nanopartículas, aditivos, temperatura, pH sobre la conductividad térmica del fluido base, variaciones con respecto a la concentración, tamaño y material de las NPs, suposición de mecanismos por los cuales la adición de las NPs modifican la conductividad del fluido base, etc. [7, 10, 15, 16, 23, 24].

La Figura 16 muestra la conductividad térmica de los fluidos bases típicos para NF así como partículas comunes utilizadas para la suspensión [24].

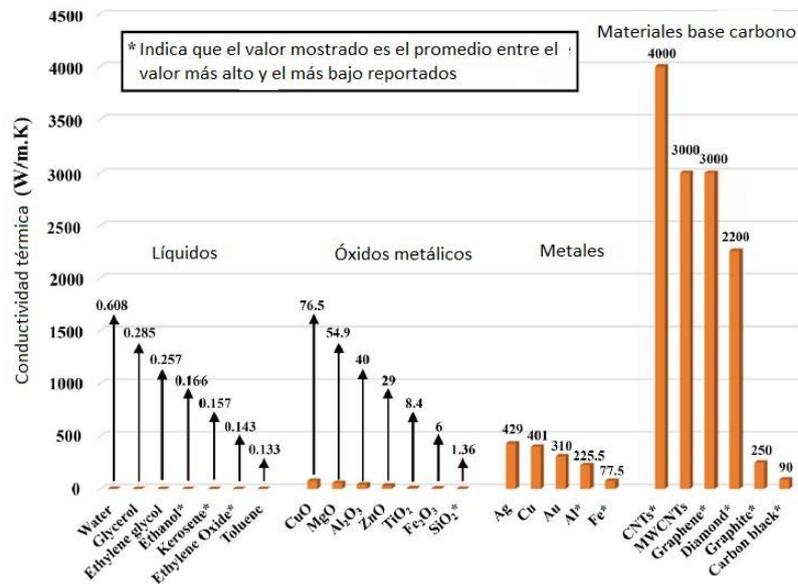


Figura 16.- Conductividad térmica de diversas partículas utilizadas para nanofluidos; nótese que las mayores conductividades corresponden a NF con partículas base carbono, los valores reportados corresponden al promedio de los valores más altos y bajos reportados [24].

2.4.1.1 Efecto de la concentración

Las siguientes aseveraciones fueron halladas en algunos de los artículos de la presente investigación, se enfocan en el efecto que tiene la concentración de nanopartículas sobre la conductividad térmica del nanofluido:

Estudios con partículas cerámicas y metálicas por varios investigadores Choi, Das et al. Xuan et al, Eastman et al, y Lee et al, han reportado un mejoramiento de entre 5 y 60% de la conductividad térmica con concentraciones de 0.1 a 5 %vol. [23].

La razón de la conductividad térmica efectiva con respecto a la del fluido base (K_{eff}/K_{fluido}) incrementa de manera no lineal con el incremento en %vol. de las partículas [23].

A mayor concentración volumétrica de nanopartículas en el fluido base la conductividad térmica se verá positivamente afectada [4].

En nanofluidos preparados con nanotubos de carbono (*Carbon nanotubes, CNTs*) la conductividad térmica aumenta con la adición de partículas hasta un máximo, después del cual el desempeño comienza a decrecer, las mayores conductividades reportadas corresponden con materiales base carbono, material reportado con la conductividad térmica más alta conocida [7, 24].

La conductividad térmica de NFs base agua con partículas Al_2O_3 , SiO_2 y diamante, se encontró entre $\pm 5\%$ que aquellas del agua las concentraciones utilizadas en el estudio fueron 0.001, 0.01 y 0.1 %vol. [14].

Las oraciones anteriores muestran que se ha observado cierta tendencia en la adición de materiales nanoparticulados y su efecto sobre la conductividad térmica del fluido base, tal tendencia parece no ser muy predictiva, sin embargo, hay indicios de un rango de concentración en el cual el efecto sobre la propiedad termofísica es mayor y en las vecindades de éste, tanto a valores mayores o menores, el efecto comienza a decrecer (deterioro) o a ser poco perceptible, respectivamente. En los estudios recabados, las concentraciones utilizadas fueron investigadas sistemáticamente dentro de un rango que fuese ya conocido o no, o, se usó sólo una concentración ya reportada con resultados; considero que la elección del método dependerá del propósito de la investigación que se esté realizando, por ejemplo, tomar un valor reportado de concentración del material "i" con su efecto sobre la conductividad térmica y manipular otras variables, o utilizar "n" concentraciones con "m" materiales y observar-comparar sus respuestas dentro del rango de concentración "n".

2.4.1.2 Efecto del tamaño

Los párrafos siguientes se refieren al efecto del tamaño de las nanopartículas sobre la conductividad térmica del nanofluido, los cuales fueron encontrados en algunas de las fuentes consultadas:

La conductividad térmica aumenta considerablemente con partículas de tamaño <50 nm y con la dispersión; se atribuye un descenso de la conductividad, cuando las partículas cambian de 10 a 50 nm, debido a cambios en el transporte fonónico de la temperatura [6].

El tamaño de las partículas dispersadas influencia la razón de conductividad ($K_{\text{eff}}/K_{\text{fluido}}$), a menor tamaño mayor conductividad del nanofluido; este mejoramiento puede ser tan alto como un 80 a 100 % con partículas Al_2Cu de aprox. 30nm en NF base agua y EGW [18].

La razón de la conductividad térmica efectiva con respecto a la del fluido base decrece con el aumento en el tamaño/diámetro de las partículas [23].

Lo anterior muestra una tendencia clara de la relación entre el tamaño de las nanopartículas y su efecto sobre la conductividad térmica, esta tendencia, inversamente proporcional parece tener su máximo dentro del intervalo de 10 a 50 nm, evidentemente un material en específico tendrá un tamaño en el cual el desempeño de la conductividad sea máximo, cómo determinar este máximo no es un conocimiento a priori, cada material con sus parámetros definidos (concentración y composición) tendrá un rango de acción efectiva, sin embargo en la mayoría de las investigaciones recopiladas para el presente trabajo los tamaños rondan en el intervalo mencionado 10 a 50 nm. Considero que la mejora en la conductividad a tamaños pequeños está relacionada íntimamente con el transporte fonónico del calor dentro del material y en las regiones dónde las nanopartículas pueden ordenarse (en la región trifásica sólido-vapor-líquido), el ordenamiento genera un acople resonante el cual es un conjunto de modos de vibración coherentes, creo

que ahí reside la dificultad del modelado de la relación tamaño-conductividad ¿Cómo determinar los posibles modos de vibración a través de los posibles ordenamientos, tanto de la nanoestructura del material como del aglomerado en la región trifásica?

2.4.1.3 Mecanismos gobernantes propuestos

Hasta ahora no hay mecanismos generalmente aceptados para la explicación del desempeño térmico de los NF, sin embargo, los siguientes son utilizados por los investigadores:

- Movimiento Browniano de las nanopartículas. [10, 23, 24].
- Envolvimiento del líquido base alrededor de las nanopartículas. [10, 23].
- Naturaleza del transporte de calor en las partículas sólidas [10, 15].
- Transferencia de calor balística asistida por fonones [10, 23, 24].
- Aumento del área de transferencia al disminuir tamaño [14, 23].
- Formación de una microestructura (microensamble) que comprende clústeres de nanopartículas [14, 23].

Quizá efectos macroscópicos adicionales deben ser considerados, por ejemplo [23]:

- Conducción de calor
- Convección natural promovida por las partículas. Fuerzas de electroforesis o termoforesis
- Naturaleza de los enlaces químicos en el material [7, 24]

2.4.2 Viscosidad

2.4.2.1 Efecto de la concentración

Las siguientes observaciones fueron recopiladas de algunos trabajos investigados, las cuales hacen alusión al efecto que tiene la concentración de nanopartículas sobre la viscosidad del fluido base:

Al utilizar concentraciones de 0.01, 0.1 y 1.0 g/L de nanotubos de carbono de pared múltiple (*MultiWalled Carbon Nanotubes, MWCNTs*) en agua, la viscosidad del medio no se ve severamente afectada [16].

Al medirse la viscosidad de distintos NFs (base agua con partículas Al_2O_3 , SiO_2 y diamante) se encontraron entre $\pm 5\%$ que aquellas del agua con concentraciones de 0.001, 0.01 y 0.1 %vol. [14].

La viscosidad efectiva del nanofluido aumenta con el incremento de la concentración de partículas y decrece al aumentar la temperatura [10].

La viscosidad de un NF base agua con nanotubos de carbono, CNTs, a muy bajas concentraciones (hasta 0.5wt%) es menor que la del líquido base probablemente por la autolubricación de los nanotubos; la viscosidad aumenta con una concentración mayor a 0.5 wt% de CNT [7].

Al parecer la adición de pequeñas cantidades de nanopartículas al fluido base no altera de manera significativa la viscosidad del medio, sin embargo, ocurre que en determinada concentración, la viscosidad comienza a aumentar debido a que los fenómenos tribológicos en el fluido comienzan a ser más notorios; como se menciona en el caso del nanofluido de CNTs en agua, la viscosidad del medio puede ser menor que la del fluido base a determinadas concentraciones consecuencia de la nanoestructura del material suspendido, lo cual indica lo importante que puede ser nanoestructura del material en el efecto de la concentración sobre la viscosidad. La tendencia queda descrita de manera muy general en la tercera oración, qué tanto pueda variar la viscosidad en función de la concentración no puede saberse inmediatamente y qué efecto tendrá

sobre el temple, en el enfriamiento convectivo, dependerá de esta variación.

2.4.2.2 Efecto del tamaño

A menor tamaño de partícula mayor es la viscosidad y esta es inversamente proporcional a la temperatura [15].

Dentro de los artículos recopilados en la investigación del presente trabajo es muy escasa la información que investiga y relaciona el tamaño de las nanopartículas con su efecto sobre la viscosidad del medio. Tal parece que la disminución del tamaño incrementa la viscosidad del medio, dada cierta concentración, en tanto al incremento de los fenómenos tribológicos con la superficie de cada partícula y dentro del líquido mismo. Una reducción de la viscosidad en el fluido base trae consigo un mejor comportamiento durante el enfriamiento convectivo y una menor duración de la capa de vapor, en consecuencia, un mejor tratamiento térmico de temple.

2.4.3 Capacidad térmica específica/ Calor específico (Cp)

La investigación sobre el calor específico es menor en comparación a la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos; se ha encontrado que esta propiedad varía en función del líquido base, tamaño y concentración de las nanopartículas [10].

2.4.3.1 Efecto de la concentración

En la literatura se sugiere que esta propiedad disminuye con el incremento en concentración de partículas y decrece con la temperatura [10].

2.4.3.2 Ecuaciones para el calor específico

En la literatura se proponen diversas ecuaciones para el Cp en función de diversos parámetros, estas ecuaciones son ocupadas dentro del desarrollo experimental.

$$Cp_{nf} = \varphi Cp_s + (1 - \varphi) Cp_{bf}$$

Ecuación 3.- Calor específico para nanofluido [10].

$$(\rho Cp_{nf}) = (1 - \varphi)(\rho Cp)_f + \varphi(\rho Cp)_s$$

Ecuación 4.- Calor específico para nanofluido [10].

ρ : Densidad; φ : Fracción volumétrica de partículas; bf: Fluido base; s: partícula sólida nf: Nanofluido.

$$Cp_{nf} = \frac{[\rho_p Cp_p \varphi + \rho_f C_f (1 - \varphi)]}{[\rho_p \varphi + \rho_f (1 - \varphi)]}$$

Ecuación 5.- Calor específico para nanofluido [14].

ρ : Densidad; φ : Fracción volumétrica de partículas p: Partículas; f: Fluido Base; nf: Nanofluido.

2.4.4 Densidad

Se ha encontrado que esta propiedad decrece con la temperatura y generalmente es mayor que la del fluido base [5], tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa (capa de vapor). [29].

2.4.4.1 Ecuaciones para la densidad

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_w$$

Ecuación 6.- Densidad de un nanofluido [10, 14].

ρ : Densidad, nf: nanofluido ; p: partícula ; w: agua ; φ : Fracción volumétrica de partículas .

La ecuación muestra la variación de la densidad del nanofluido en función de la fracción volumétrica de partículas suspendidas, es evidente la preponderancia de la densidad del fluido base, que en este caso se considera agua, es posible que el modelo pueda ser aplicable a otro fluido.

2.4.5 Tensión superficial, Mojabilidad

A continuación, se muestran distintas observaciones acerca de la mojabilidad de nanofluidos en función de la concentración de las nanopartículas:

Se ha encontrado en diversos nanofluidos que la tensión superficial disminuye al aumentar la concentración de partículas y la temperatura [10].

Para nanofluidos con partículas de CNTs la mojabilidad decrece con el incremento de la concentración. El ángulo de contacto para concentraciones entre 0.25 y 0.5wt% de CNT es menor que el del agua pura. El ángulo de contacto para 0.75wt% es mayor que el del agua [7].

El ángulo de contacto depende fuertemente de la concentración de las NP y para la misma concentración másica con partículas más pequeñas, se obtiene un mayor ángulo de contacto [10].

Algunos estudios implican que el uso de nanopartículas en medios de temple convencionales resultará en la mejora de la mojabilidad [5] como consecuencia de la capa porosa formada por la deposición de las nanopartículas sobre la superficie [20, 21, 25, 26].

Mediante microscopía de video digital, Figura 17, se encontró que las NP se ordenan de manera similar a un sólido en las inmediaciones de la región trifásica sólido-líquido-vapor lo cual mejora la propagación del fluido [21].

El mejoramiento de la mojabilidad con respecto al fluido base se debe principalmente a la deposición de partículas en la superficie a templar,

la deposición asimismo depende de la concentración y tamaño de las partículas; sin embargo, existe una concentración crítica (que dependerá del material, su tamaño y presencia de surfactantes) a partir de la cual el ángulo de contacto comienza a incrementarse, quizá debido a la reducción de cavidades activas consecuencia a la aglomeración de las nanopartículas.

Al aumentar la mojabilidad del líquido sobre la superficie el proceso de extracción de calor durante la etapa convectiva se ve beneficiado, la capa de vapor de la primera etapa dura muy poco o es nula.

2.4.5.1 Modelos de mojabilidad (Esparcimiento)

Durante el proceso de ebullición por nucleación, el ángulo de contacto aparente está relacionado con las energías de interacción de las distintas fases y éste es modelado mediante la ecuación de Wenzel-Young (Ecuación 7):

$$\cos\theta^* = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} r = r \cos\theta$$

Ecuación 7.- ángulo de contacto aparente [20].

γ : Energía de interacción, s: Sólido, v: Vapor, l: Líquido, r: Factor de Rugosidad.

El factor de rugosidad r de la Ecuación 7 se define como la razón del área de contacto efectiva con respecto al área de contacto de la superficie lisa, puede ser evaluado con un perfilómetro superficial (Figura 38) [21]. El numerador de la Ecuación 7 se conoce como Tensión de adhesión, al analizar la ecuación se desprende que la mojabilidad del NF incrementa con la tensión de adhesión y con la rugosidad de la superficie.

Asimismo, se tiene el modelo para la propagación del líquido en función del coeficiente de propagación (S) de un fluido en la región trifásica que

tiene lugar durante la ebullición por nucleación, descrito por la Ecuación 8.

$$S = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} - \sigma_{lg}$$

Ecuación 8.- Coeficiente de propagación [21].

dónde σ : tensión interfacial existente entre las fases, sg: sólido-gas,
sl: sólido-líquido,
lg: líquido-gas.

Ambos modelos fueron utilizados en las investigaciones respectivas para cuantificar el mejoramiento de la mojabilidad del fluido en una superficie sólida.

2.4.5.2 Mojabilidad y flujo de calor crítico (CHF)

Un modelo utilizado por investigadores para describir la transferencia de calor durante la fase de ebullición por nucleación es a través de la activación de microcavidades generada por la deposición de las NP en la superficie, esto mediante el criterio: $\theta \geq \beta$ dónde β es el ángulo de apertura de una cavidad cónica idealizada y θ el ángulo de contacto; según Yang y Kim el número de cavidades activas por unidad de área superficial puede describirse con la ecuación siguiente:

$$N_a = N_s \int_{R_{min}}^{R_{max}} \varphi(R) dR \int_0^\theta \phi(\beta) d\beta$$

Ecuación 9.- cavidades activas por unidad de área superficial [20].

dónde N_s : densidad del área de cavidades, R_{max} y R_{min} : el radio máximo y mínimo de cavidades activas, $\varphi(R)$: función de distribución radial de las cavidades y $\phi(\beta)$: función de distribución para el ángulo de apertura de las cavidades.

Una manera de cuantificar el efecto de la mojabilidad sobre el Flujo de calor crítico (CHF por sus siglas en inglés) es a través del modelo

propuesto por Sadasivan et. al. [20], el cual establece que las burbujas que crecen en la vecindad de las cavidades activas pueden coalescer lateralmente hasta cierto punto durante la fase de crecimiento antes de que departan de la superficie. Un volumen de líquido es atrapado entre la burbuja y la superficie, debajo del plano de coalescencia. Por arriba del plano las burbujas permanecen en la superficie por un tiempo t_h .

Se considera también el tiempo para secar la capa líquida, t_d , que puede obtenerse a través de un balance energético en la superficie. Los autores hipotetizan que el CHF ocurre cuando $t_d < t_h$; considerando que t_h depende principalmente de la hidrodinámica y débilmente del flujo de calor. Un incremento de t_d afecta directamente el CHF [20].

En la región trifásica formada se ha encontrado que las nanopartículas tienden a ordenarse de manera similar a un sólido, Figura 17, este ordenamiento trae consigo un incremento en la presión de desunión de la fase vapor, provocando que el fluido sea jalado hacia la región sólido-vapor, aumentando la propagación del líquido y acelerando la separación de la fase vapor de la superficie sólida [21] este comportamiento puede proyectarse a la situación en la cual el líquido se encuentra en ebullición en la superficie sólida.



Figura 17.- Ordenamiento de nanopartículas de Látex cargadas en agua desionizada, burbuja (200 de aire μm) en cristal, Concentración: 7%vol., Carga superficial: $0.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, tamaño: $1.01\mu\text{m}$, Densidad: $1.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ [21].

Hasta el momento no existe una teoría validada y unificada sobre la relación entre la mojabilidad y el CHF en nanofluidos. Una de las hipótesis más creíbles considera que durante la ebullición por nucleación en la superficie calentada se generan puntos calientes, estos pueden ser remojados o calentados irreversiblemente, la mojabilidad genera que estos puntos sean remojados lo que genera el CHF [20], así mismo la presión de desunión de las burbujas ejercida por el ordenamiento de las NP en la región trifásica empuja el sólido hacia los puntos calientes, remojándolos; estos dos fenómenos 1) deposición de nanopartículas (formación de cavidades activas) y 2) Ordenamiento en la región trifásica, tienen como consecuencia la aparición del flujo de calor crítico (CHF) que suele ser mayor en comparación al fluido sin nanopartículas, el flujo de calor crítico se asocia a la segunda etapa del temple en la cual suceden los cambios metalúrgicos-mecánicos más importantes de los metales templados.

Además de los dos fenómenos mencionados previamente debe considerarse el movimiento fonónico de las nanopartículas durante la transferencia del calor, si en la región trifásica las NP están ordenadas de manera muy coherente el movimiento fonónico tendrá más modos de vibración no destructivos promoviendo el flujo de calor a mayor escala.

2.5 Coeficiente de transferencia de calor (HTC) en Nanofluidos

El coeficiente de transferencia de calor entre la superficie caliente y el nanofluido como medio de temple es un parámetro muy investigado en la literatura del desempeño térmico de los NF, el cual se ha encontrado ser superior a los medios de temple convencionales [4, 7, 12, 14, 18, 19, 24-26, 29], pese a que algunos han encontrado en sus resultados

experimentales un deterioro en el transporte de energía, debido a una alta concentración y tiempos de análisis muy largos, [19, 29] esto último no es aplicable al tratamiento térmico de temple pero, debe considerarse en el diseño de tanque que sirva para el procesamiento, ya que el fluido sería utilizado muchas veces.

Se ha encontrado que al disminuir el tamaño de partícula el HTC incrementa significativamente [29].

Un incremento del HTC con respecto a la concentración volumétrica de los NF ha sido observado [4, 29], sin embargo, existe una concentración crítica a partir de la cual se comienza a deteriorar el flujo de energía con el medio [13, 18].

En un estudio realizado para determinar la transferencia de calor de un NF base agua destilada con nanopartículas de sílice, se encontró que los surfactantes en el NF reducen la tensión superficial e incrementan el HTC, permitiendo a las burbujas liberarse más fácilmente de la superficie en la etapa de la ebullición por nucleación, donde se halla el mayor flujo de calor [13].

La eficiencia del nanofluido es evaluada a través de los parámetros de la transferencia de calor como el número de Prandtl, el número de Nusselt y el HTC [4].

2.5.1 Determinación del HTC

EL HTC puede ser computado mediante diversos métodos, uno es el análisis de agrupamiento de la transferencia de calor y el otro es el método del elemento finito (*Finite Element Method, FEM*). Para que el método de agrupamiento sea válido el número de biot (Bi) debe ser menor a 0.1. El valor del Bi depende de la longitud característica de la pieza y la conductividad térmica de la misma. El Bi es directamente proporcional a la longitud característica e inversamente proporcional a la conductividad térmica de la pieza a tratarse térmicamente [13].

Otro método para la estimación del Flujo de calor superficial o el HTC del medio de temple es mediante algoritmos de conducción de calor inversa (*Inverse Heat Conduction, IHC*) a partir de la información de temperatura obtenida de la curva de enfriamiento; varios algoritmos han sido implementados por investigadores obteniendo resultados satisfactorios en experimentos que involucran transferencia de calor, sin embargo, es una técnica muy sensible a los datos de entrada de temperatura [7].

2.6 Industrialización de los nanofluidos

Pese a la gran cantidad de artículos publicados sobre el mejoramiento de las propiedades del fluido base con la adición de materiales nanoparticulados, el uso industrial de estos fluidos no está aún instaurado, sin embargo, es bien clara la tendencia de aplicación de estos hacia la ingeniería térmica, con algunas aplicaciones tribológicas e incluso cuestiones ecológicas de limpieza de suelos [21, 24-26].

Una de las propuestas más investigadas es la capacidad de temple de los nanofluidos, no con la intención metalúrgica-mecánica del cambio en las propiedades del material sino en el sentido de la extracción de calor de una superficie principalmente metálica; los resultados de estas investigaciones tienen la intención de justificar el uso de NF en aplicaciones térmicas, sin embargo, estos resultados también pueden proyectarse en el campo metalúrgico del temple de aceros y prever el comportamiento metalúrgico-mecánico de los componentes dadas las mejoras en el HTC y CHF, conductividad térmica del fluido, cambios en las etapas del temple, etc.

2.6.1 Factores determinantes en la implementación industrial de los NFs.

2.6.1.1 Alto costo de producción.

Este factor es la suma de diversos aspectos que incluyen el costo del material, gastos de preparación (uso de surfactantes, baño ultrasónico, mezcladores mecánicos), conminución del material y procedencia. El costo unitario de diversos NFs varía significativamente dependiendo del material, tamaño y concentración. Existe una alta dificultad para la sistematización en la estimación del precio de los nanofluidos [31].

2.6.1.2 Problemas de estabilidad a largo plazo

Se ha encontrado que las nanopartículas suspendidas son susceptibles a experimentar sedimentación, Figura 18, esto debido a las fuerzas de Van Der Waals, la gravedad, fuerzas de arrastre y la repulsión electroestática. La estabilidad es altamente dependiente del tipo de partícula en el NF (metal, óxido metálico, carbono, polímeros, mezclas) y del método de preparación. Otros factores que influyen en la estabilidad son la constante dieléctrica del fluido, potencial zeta, pH, tamaño de partícula, forma y concentración de aditivos, adicionalmente se tienen el influjo de la temperatura, velocidad del flujo, porosidad de las superficies dónde fluye el NF, salinidad y campos externos (eléctrico, acústico, magnético) [31].

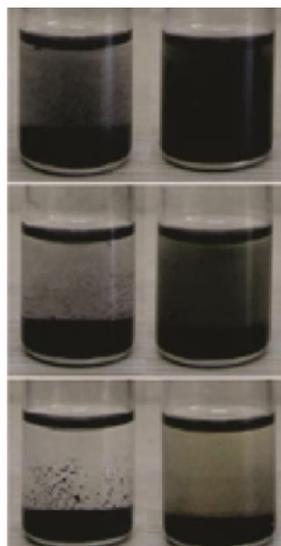


Figura 18.- Sedimentación y arrastre de dispersiones de nanografito en etilenglicol a distintos tiempos; la primera fotografía corresponde a un día, la segunda a 3 días y la última a una semana [31]. La

suspensión de la derecha fue preparada con la adición de surfactante. Nótese la sedimentación y el arrastre a la superficie.

2.6.1.3 Incertidumbre en el valor de las propiedades termofísicas de los NFs

Existe la carencia de un modelo general para todo tipo de nanofluido. En las investigaciones se ha encontrado una buena concordancia entre los modelos teóricos y los resultados experimentales de la conductividad térmica, sin embargo, para otras propiedades termofísicas no hay una buena correlación con la repetibilidad y confiabilidad entre distintas mediciones experimentales, estas diferencias se asocian al método de síntesis de los NFs y/o los métodos de medición [31]. Por ello muchos investigadores generan sus propios modelos para sus experimentos.

2.6.1.4 Corrosión y erosión del equipo dónde fluyen NFs

La deposición de las nanopartículas sobre la superficie de tubos o colectores a largo plazo deteriora el desempeño del sistema, e impacta el comportamiento térmico del fluido disminuyendo el HTC, Figura 19. La compatibilidad térmica entre el ducto y el nanofluido es un asunto importante para la aplicación a gran escala de los NFs en equipo industrial [19, 31].

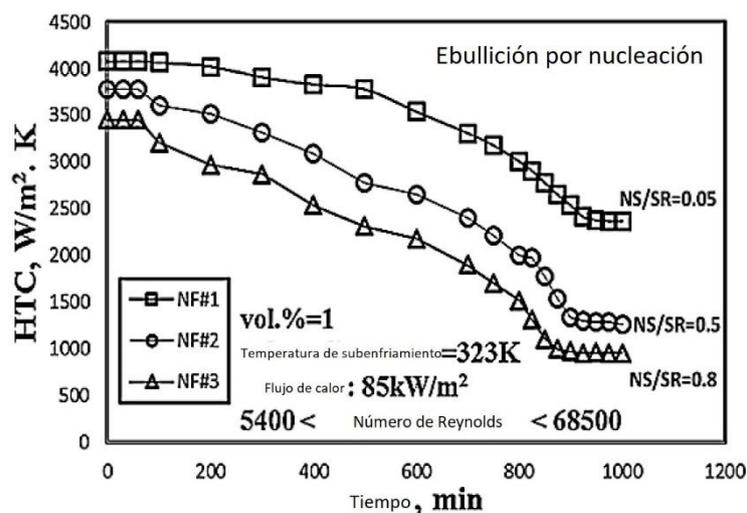


Figura 19.- Disminución del coeficiente de transferencia de calor (HTC) para tres nanofluidos de alúmina base agua con SDS como

agente dispersante de tres diferentes tamaños NF#1 5nm, NF#2 50nm, NF#3 80nm y concentración de 1 %vol. NS/RS es un parámetro definido como tamaño de nano partícula (*nanoparticule size, NS*) sobre rugosidad superficial (*superficial roughness, SR*) [19].

En el estudio realizado en [32] se encontró información relacionada con la velocidad de corrosión del acero de bajo carbono (*Mild Steel*) en la presencia de un nanofluido.

La preparación del nanofluido de puntos cuánticos de Carbono (C-Dot) consistió en: 1625 mg de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) diluido en 1L de agua desionizada, se modificó el pH de la disolución de 7 a 14 usando NaOH, una vez disuelto el ácido ascórbico se añadieron 625 mg de acetato de cobre $Cu(Ac)_2 \cdot H_2O$ usado como catalizador y la mezcla fue sometida a agitación durante 10h a $90^\circ C$. Los puntos cuánticos son materiales nanoparticulados empleados como semiconductores, como emisores y absorbentes de un rango de frecuencia electromagnética bien definido, los del presente estudio tienen la finalidad de absorber de fotones infrarrojos. Una vez preparado el nanofluido se prosiguió al análisis potenciodinámico del acero de bajo carbono en nanofluido y agua con adición de 0.1M de NaCl; esto se llevó a cabo con una estación electroquímica de trabajo (Metrohm autolab PGSTAT128N) teniendo como electrodo de trabajo al acero, como de referencia y contraelectrodo a los de carbono y Ag/AgCl, respectivamente.

La Figura 20, muestra las curvas de Tafel para el agua y el NF, en la cual se observa una mayor naturaleza protectora de este último; mediante el método de extrapolación de Tafel se obtuvieron las corrientes de corrosión que fueron 3.2×10^{-5} y 8.1×10^{-6} A para el agua y el NF, respectivamente, a partir de las cuales se estimaron las razones de corrosión como 0.094 y 0.397 mm/año (mpy), respectivamente, la razón de corrosión con nanofluido es 76.32% menor que el agua con NaCl.

Asimismo, se realizaron curvas de Nyquist para observar la resistencia a la corrosión, las cuales se ilustran en la Figura 21; a mayor radio del semicírculo mayor será la resistencia a la corrosión; el NF a un tiempo de 260h tiene la misma resistencia a la corrosión que el agua a 2h, obsérvese como las curvas para los tiempos citados son muy similares.

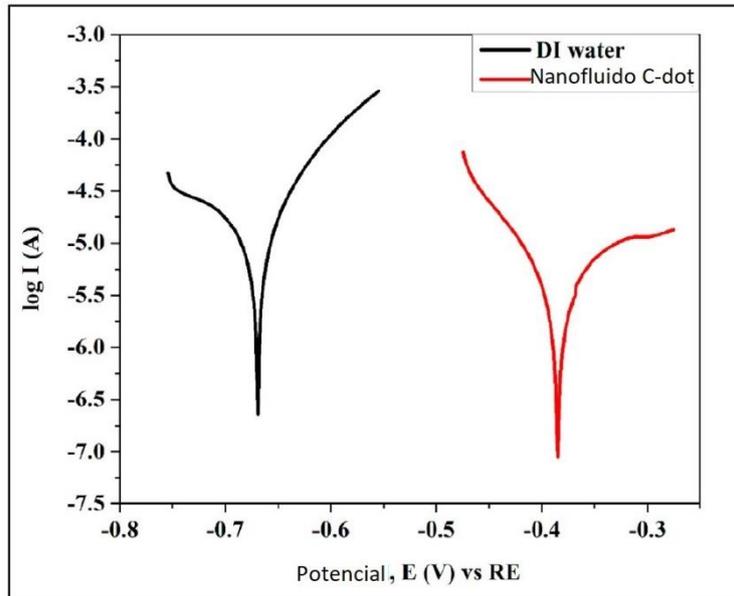


Figura 20.- Curvas de Tafel para acero bajo carbono en dos diferentes electrolitos: agua destilada + 0.1M NaCl y Nanofluido de puntos cuánticos de carbono (C-Dot); es evidente el desplazamiento en la corriente de corrosión y un grado de pasivación en la rama anódica de la curva en NF [32].

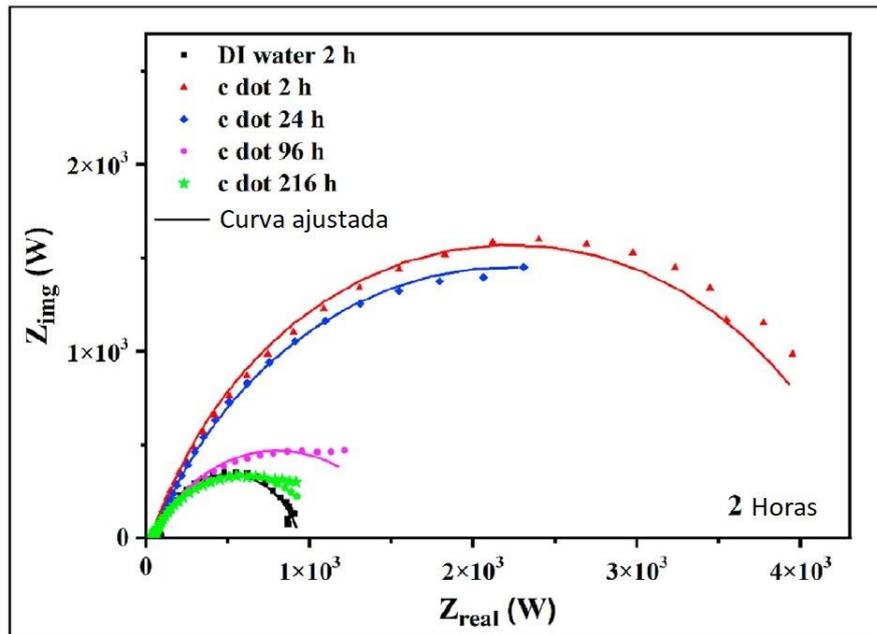


Figura 21.- Curvas de Nyquist para acero bajo carbono en dos diferentes electrolitos: agua destilada + 0.1M NaCl y Nanofluido de punto de carbono (C-Dot); el agua y el NF tienden a tener la misma resistencia a la corrosión cuando para el primer han pasado 2h y para el último 260h [32].

Dentro de las diversas investigaciones realizadas en [33], se analizó de manera visual a través de microscopia de barrido el comportamiento de la corrosión de placas de acero inoxidable 306 (SS306) con dimensiones 42x21x1.2 mm, ante dos electrolitos, el primero una mezcla eutéctica de sales y el segundo un NF que tuvo como base la mezcla eutéctica con la adición de nanopartículas híbridas de Óxido de grafeno y óxido de titanio (GO/TiO₂).

La composición de la mezcla eutéctica es la siguiente: NaNO₃, KNO₃, LiNO₃, CsNO₃, Ca(NO₃)₂; 9.95g de la mezcla añadida a 25mL de agua desionizada.

La composición del Nanofluido es: La misma mezcla eutéctica con la adición de GO/TiO₂ de concentración 0.05wt%.

Para el análisis de la corrosión, probetas del acero inoxidable se sumergieron en los electrolitos dentro de un horno de gravedad convencional a 200°C durante 7 días, al término del tiempo se prepararon las superficies para su observación a través del MEB.

En la Figura 22 se observa que la probeta sumergida en la mezcla eutéctica sufrió de corrosión por picaduras, mientras que aquella sumergida en el nanofluido híbrido no mostró este tipo de corrosión, fenómeno asociado a la deposición de nanopartículas en la superficie, en consecuencia, la velocidad de corrosión del material decreció con el uso de NF en comparación a la mezcla eutéctica de sales.

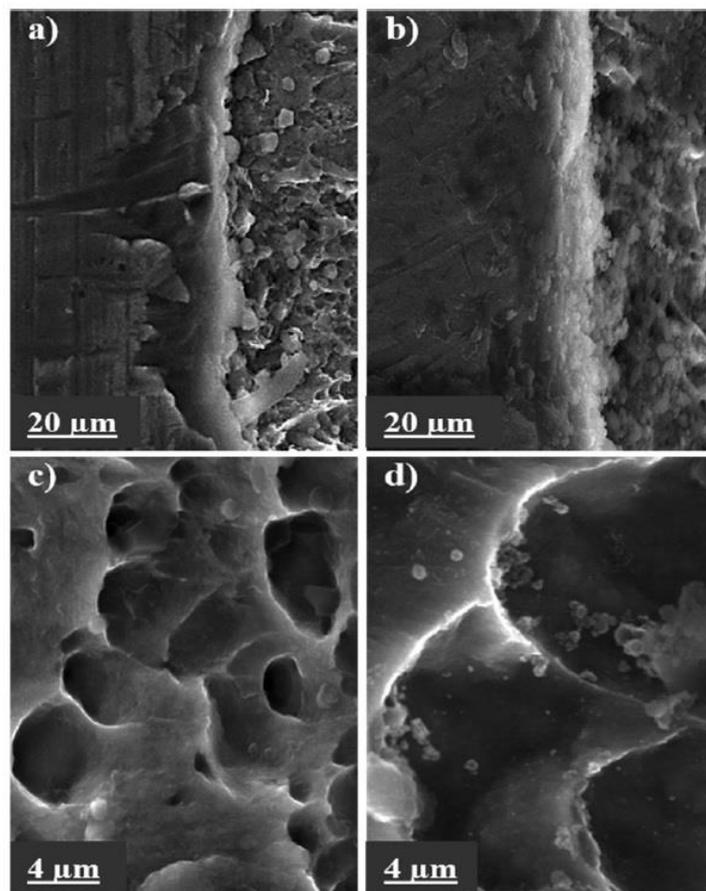


Figura 22.- Microscopía por electrones secundarios para la superficie del SS306 en presencia de dos diferentes electrolitos: a) y c) corresponden a la mezcla eutéctica de sales, b) y d) corresponden al nanofluido híbrido GO/TiO₂ [33].

Para el proceso térmico del temple, por su naturaleza, es de tiempos breves, por tanto, la corrosión del componente debido al medio de enfriamiento sucede en una proporción baja, sin embargo, con el uso de NF este fenómeno sería todavía menor, la corrosión está sesgada al tanque de procesamiento más que al componente. Para otras aplicaciones de tiempos de servicio muy largos la deposición de las partículas parece ser benéfica contra la corrosión, sin embargo, por el mismo fenómeno hay un deterioro en los parámetros térmicos del sistema lo cual tiene implicaciones del costo de operación y sería necesario ponderar qué efecto es más importante en términos de desempeño y aplicación.

2.6.1.5 Incertidumbre del mercado

Los estudios realizados siguen siendo limitados a la escala del laboratorio y hay un largo camino por recorrer antes de la comercialización de los NFs. La ausencia de ensayos a largo plazo de sistemas que utilicen NFs vuelve incierta la posibilidad de la industrialización apropiada de los nanofluidos [31].

2.6.2 Algunas aplicaciones de los nanofluidos

2.6.2.1 Reactores nucleares enfriados por agua (*Water cooled reactors, WCR*)

Una de las principales investigaciones experimentales es sobre la extracción de calor de combustible nuclear en reactores nucleares enfriados por agua (Water Cooled Reactor, WCR; Boiling Water Reactor, BWR) durante lo que se denomina accidente por pérdida de refrigerante (Loss Of Coolant Accident, LOCA); en los BWR el fluido de trabajo es de alta importancia para la seguridad, economía de aplicación y vida del reactor [24, 25]. Dados los resultados sobre mejora del HTC, reducción de la capa de vapor y mojabilidad de los NFs, estos han mostrado una promesa para la más rápida transferencia de calor y evitar accidentes serios.

2.6.2.2 Colectores solares de ducto parabólico (*Parabolic trough solar collectors, PTSC*)

Diversas investigaciones han propuesto el uso de NFs como fluido de trabajo en colectores solares de ducto parabólico (Parabolic Trough Solar Collectors, PTSC), que son sistemas de alta temperatura (hasta 600°C) utilizados para la producción de electricidad y provisión de calor para procesos industriales [26]; una manera de optimizar el sistema (en tanto a tiempo y vida útil del equipo) es mediante el uso de NF como líquido de transferencia de calor (Heat transfer Fluid, HTF), las investigaciones principalmente han hecho uso de NF con partículas MWCNT base agua y aceite mineral debido a la alta conductividad térmica y alta absorción de radiación solar de las nanopartículas de carbono [24, 26].

Algunos datos reportados sobre el mejoramiento del sistema son:

PTSC piloto con NF de partículas MWCNTs en concentraciones de 1 y 3 wt% base aceite mineral, mejoró la eficiencia térmica en 4-5% y 5-7% respectivamente en comparación con el fluido base.

NF con MWCNTs en concentración 0.3 vol% la eficiencia óptica alcanzó hasta un 71.4% como fluido del tubo absorbente y un 17% mayor de eficiencia térmica.

2.6.2.3 Sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración (*Air conditioning & refrigeration, AC&R*)

Otra propuesta investigada es sobre el uso de los NF en sistemas de acondicionamiento de aire y refrigeración (Air conditioning & Refrigeration, AC&R) con la finalidad de mostrar la factibilidad de su aplicación como nanolubricante en el compresor del AC dada la mejora en las propiedades tribológicas y como refrigerante entre el compresor y evaporador del sistema, consecuencia del incremento en la conductividad térmica del fluido base [26].

Algunos investigadores reportaron un decremento de hasta un 90% con la adición de nanopartículas al aceite lubricante del compresor [26].

De lo anterior se desprende que los próximos usos industriales de los NF serán principalmente dentro del campo de la ingeniería térmica en intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración, recolección de energía solar, baños de temple, reactores nucleares BWR; sin embargo, otra cantidad de campos de aplicación también son objeto de los NF, tales como la tribología, ingeniería ambiental y procesamiento de comida, entre otros.

A la fecha se sigue realizando un gran esfuerzo experimental-teórico para la implementación de los NF a nivel industrial-residencial, incluso ha surgido una iniciativa llamada NanoUptake cost action que pretende justificar experimentalmente la utilización de los NF en Europa con sustento en la optimización de procesos y mejor obtención de energía para hacer frente a la crisis climática que acontece en estos días.

3.-Temple de aceros en nanofluidos, implicaciones mecánicas, microestructurales, superficiales y sus interrelaciones

3.1 Comparación entre temple de aceros convencionales (1010, al Boro 22MnB5, inoxidable 304) en agua y en nanofluidos.

La investigación principal sobre nanofluidos está enfocada en el desempeño térmico de estos, por tanto, la gran mayoría de artículos del presente trabajo se centran en sólo la descripción de flujos de calor crítico (*Critical Heat Flux, CHF*), flujo de calor mínimo (*Minimum Heat Flux, MHF*) o punto de Leindenfrost, Velocidades de enfriamiento, manipulación en la duración de la etapa de vapor, deposición de las partículas en la superficie a ser tratada, el coeficiente de transferencia de calor (*Heat transfer coefficient, HTC*), entre otros, teniendo como comparación principalmente al agua destilada; sólo una minoría considera explícitamente las implicaciones metalúrgicas y mecánicas asociadas a cambios en el desempeño térmico del medio de temple, implicaciones tales como la microestructura, el perfil de dureza, rugosidad superficial y propiedades mecánicas (*Yield Strength, YS; Ultimate Tensile Strength, UTS*) [4, 7, 12-14, 16, 18, 19, 23, 24, 29].

En los apartados siguientes se tomará la información recopilada de aquellos artículos que se encargan del análisis metalúrgico-mecánico del temple con nanofluidos.

3.1 Efecto en la dureza

La tabla 3 muestra la dureza promedio en escala Vickers (HV) medida en 5 lugares diferentes sobre una probeta cilíndrica de acero AISI 1010, con dimensiones: 20mm de diámetro, y 50 mm de altura, templadas sin agitación y con misma velocidad de inmersión en agua destilada, NF: agua + 0.5 wt% CNT y NF: agua+ 0.5wt% CNT+ Surfactante (Triton X-100) [12].

Medio de enfriamiento	Agua	Agua + CNT	Agua + CNT + Surfactante
Dureza Vickers (HV)	170.9	269.0	183.5

Tabla 3.- Dureza promedio obtenida para agua, y nanofluido con CNTs con y sin surfactante [12].

La dureza obtenida para el NF: Agua + 0.5wt% CNT es un 57.4% mayor que aquella obtenida para el agua y para el nanofluido con surfactante, tiene un incremento del 7.4%. La dureza obtenida para el NF sin surfactante es un reflejo del incremento en la velocidad de transferencia de calor. En este caso la adición de surfactante tiene el efecto de evitar la deposición de los CNTs en la superficie con lo cual el CHF durante la etapa de ebullición decreció, obteniendo una menor dureza debido al retraso en las transformaciones asociadas al acero AISI 1010.

La información consecuente es sobre la dureza y el esfuerzo de tensión o UTS (Ultimate Tensile Strength) obtenidas para distintas secciones de una lámina de acero al boro 22MnB5 forjada mediante el proceso de prensado en caliente (Hot Press Forming, *HPF*) utilizado para componentes automotrices; en el proceso la pieza es templada dentro del dado de conformado con un nanofluido base etilenglicol-agua (EGW) (40:60) con partículas de alúmina (Al_2O_3) en una concentración de 0.8 %vol. y con agua para la posterior comparación [4]. . La Figura 23 muestra un diagrama del proceso, el producto y de dónde fueron manufacturadas las probetas para el ensayo de tensión (ASTM E 8M).

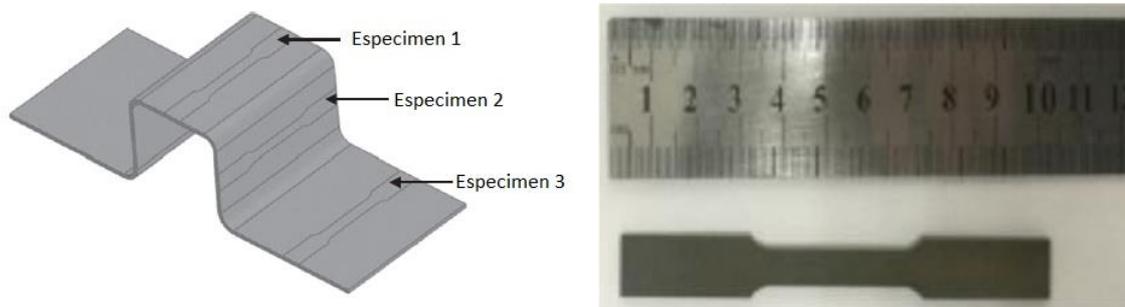
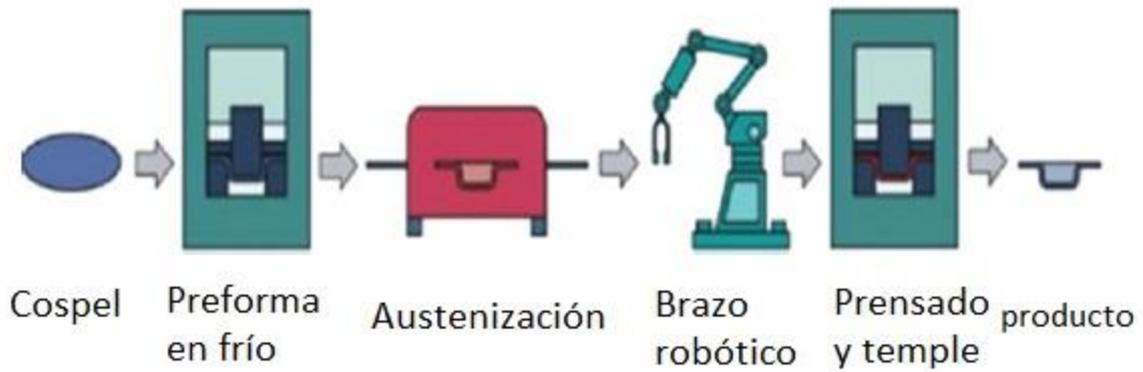


Figura 23.- Arriba: Proceso de prensado en caliente (*Hot Press Forming, HPF*); izquierda: producto después del procesamiento y secciones de donde se maquinaron las probetas de tensión; derecha: dimensiones de las probetas de tensión [4].

La Figura 24. muestra histogramas de microdureza Vickers con penetrador de diamante y 1N de fuerza; el valor de dureza fue medido con el método Vickers de acuerdo con DIN EN ISO 6507-1. Las piezas fueron templadas en agua y con nanofluido, en este último a distintos tiempos. La dureza máxima de 588HV fue obtenida para el temple en nanofluido con un tiempo de 5s, un incremento de 4.6 veces la dureza de la muestra de llegada (105HV) y un incremento del 1.397 en comparación con el agua helada (421HV).

Debe notarse que en la Figura 24 hay un error, los valores de dureza que se muestran para el nanofluido a 3s corresponden al agua helada, ya que en el análisis del artículo se menciona "El valor mínimo fue de sólo 421HV que corresponde al agua helada y con un largo periodo de

tiempo”, considerando esto es evidente la mejora en la dureza cuando se utiliza nanofluido como medio de enfriamiento.

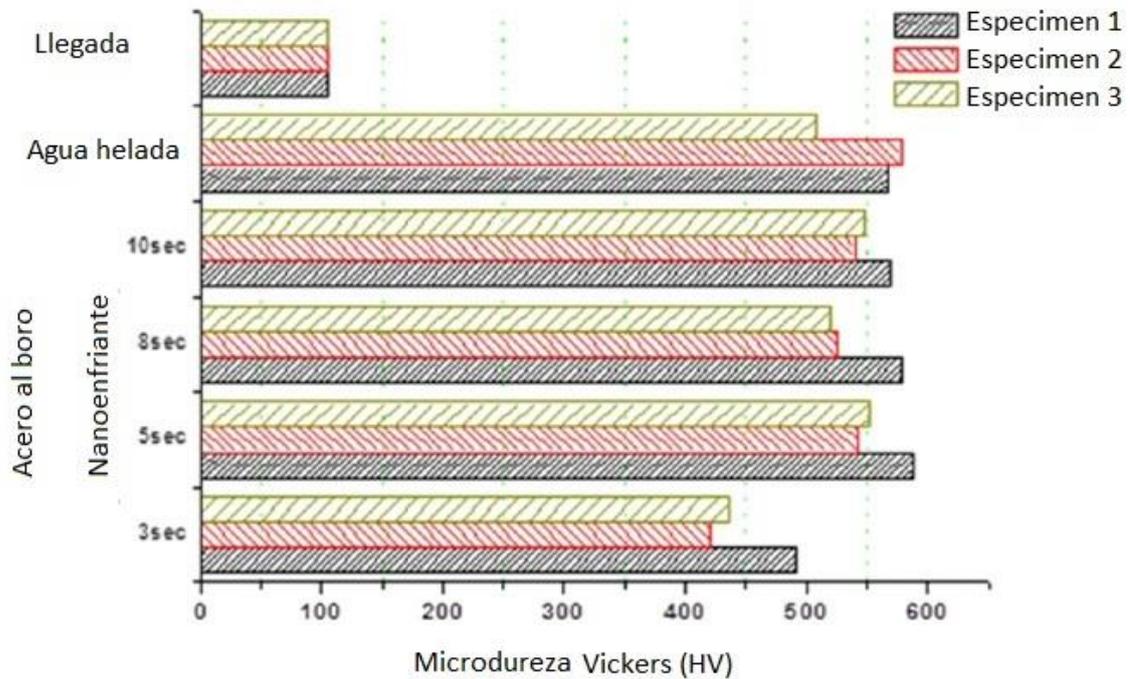


Figura 24.- Microdurezas promedio en escala Vickers para los tres especímenes maquinados de la lámina conformada templada en los distintos medios de enfriamiento (agua y nanofluido). En la figura hay un error, los valores descritos para el agua helada (*Chilled Water*) corresponden al temple con nanofluido a 3s [4].

La Figura 25 muestra el incremento en la resistencia a la tensión (*Ultimate Tensile Strength, UTS*) para la placa de llegada, templada en agua y templada en nanofluidos a distintos tiempos. Al observar la figura se nota que en esta ocasión los valores son congruentes, teniendo la mínima resistencia en la probeta de llegada, seguida del temple en agua y por último el temple de 5s en nanofluido. El valor máximo obtenido fue de 1521.93 MPa correspondiente a una microestructura martensítica con el temple de 5s en nanofluido, por otra parte, el UTS de la probeta templada en agua helada fue de sólo 1030.55 MPa, comparando el valor

del nanofluido con 5s contra el valor para el agua helada el UTS mejoró en un 47.5% y en comparación con el material de llegada hubo un incremento del 179.1%.

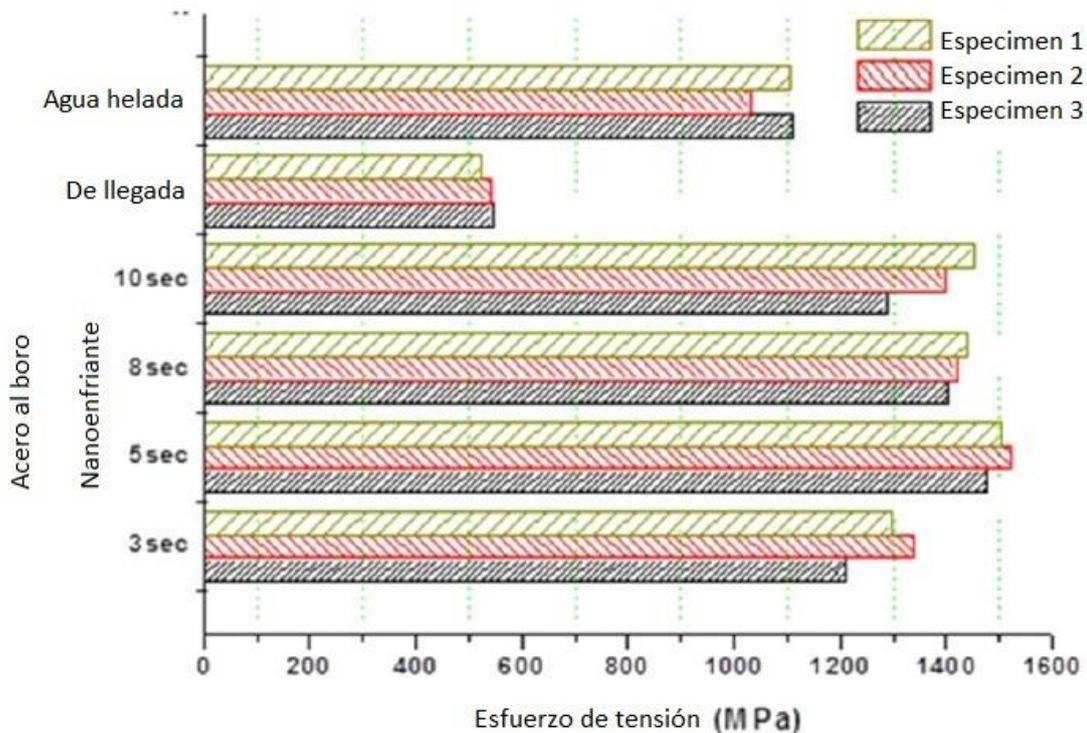


Figura 25.- Resistencia a la tensión promedio (UTS), de los tres especímenes maquinados del producto del HPF; el valor máximo en esta propiedad corresponde al temple en nanofluido a 5s. Hubo un incremento en el UTS del 47.5% con respecto al agua helada [4].

3.2 Efecto en la microestructura

En la Figura 26 se muestran las microestructuras obtenidas vía MEB para el acero AISI 1010 templado sin agitación y con la misma velocidad de inmersión en agua destilada, NF: agua + 0.5 wt% CNT y NF: agua+ 0.5wt% CNT+ Surfactante (Triton X-100). En todos los casos hay mayor cantidad de Perlita formada en la probeta templada con el nanofluido sin surfactante en comparación a aquél con el aditivo, también se observa cambio en el tamaño de la perlita en función de la locación y el medio

de temple, consecuencia de las diferentes velocidades de enfriamiento de cada medio, lo cual está íntimamente relacionado con la respuesta microestructural [12].

La distribución y tamaño de la perlita es indicativo de la velocidad de enfriamiento, al analizar las micrografías de la probeta templada en NF con CNT sin aditivo a 5mm y en el núcleo se observa una distribución muy parecida, lo cual podría asociarse a una velocidad de enfriamiento similar en ambas posiciones, lo cual no ocurre en las demás probetas [12].

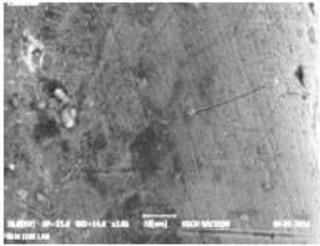
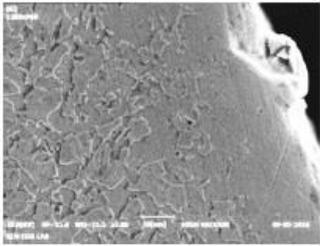
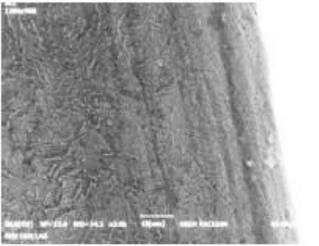
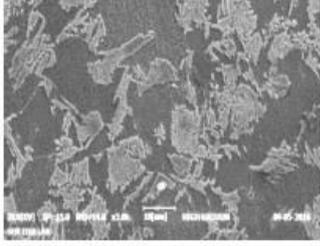
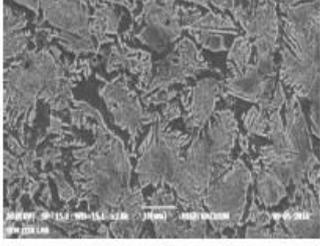
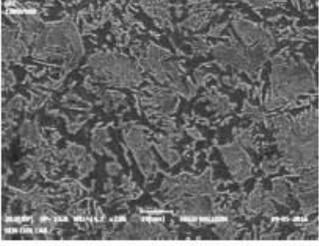
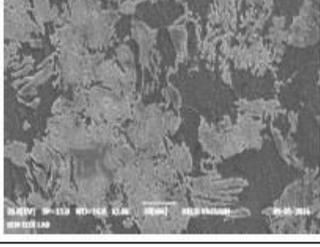
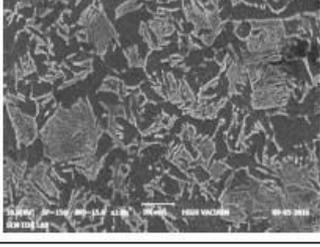
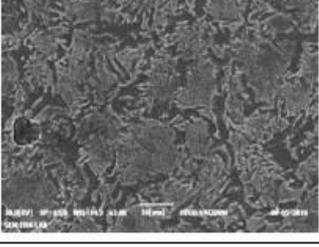
Posición	Agua	CNT más surfactante	CNT
Borde de la probeta			
5 mm de la superficie de la probeta			
Centro			

Figura 26.- Microscopia electrónica de barrido (MEB, SEM) en distintas posiciones para acero AISI 1010 templado en agua destilada, NF: agua + 0.5wt% CNT, NF: agua+ 0.5wt% CNT+ Surfactante (Triton X-100) con misma velocidad de inmersión y sin agitación [12].

Las siguientes microestructuras fueron observadas para el proceso de conformado por prensado en caliente (HPF), estas se obtuvieron mediante la técnica de microscopía óptica de luz (*Light Optical Microscopy, LOM*), atacadas con ácido nítrico al 3% en un periodo de tiempo de 2 a 5 segundos; se usó el software de análisis de imágenes Progress Capture 28.8 Jenoptik Optical System con una imprecisión de $\pm 5\%$ en la medición cuantitativa en las fracciones de áreas de las fases constitutivas [4].

La Figura 27, corresponde a una lámina de llegada, sin ningún tratamiento térmico, la cual muestra una microestructura de perlita con un 73-77% de ferrita y una pequeña cantidad de carburo disperso.

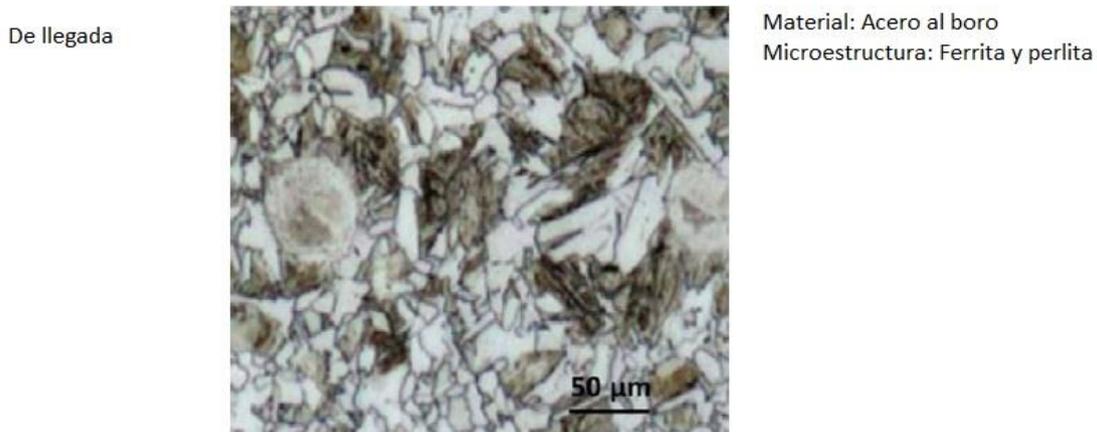
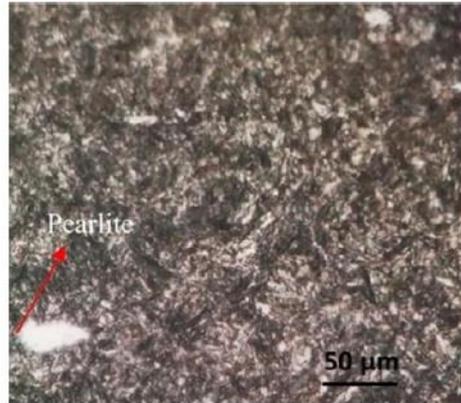


Figura 27.- Microestructura para la lámina de llegada para el proceso de HPF, dónde las fases constitutivas son Ferrita (73-77%) y Perlita con carburos dispersos [4].

La Figura 28, corresponde al enfriamiento con nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con un temple de 3s, se observa una microestructura principalmente martensítica con una pequeña cantidad de perlita en porcentajes de 90% y 2%, respectivamente, el 8% restante corresponde a bainitas inferiores.

Nanofluido

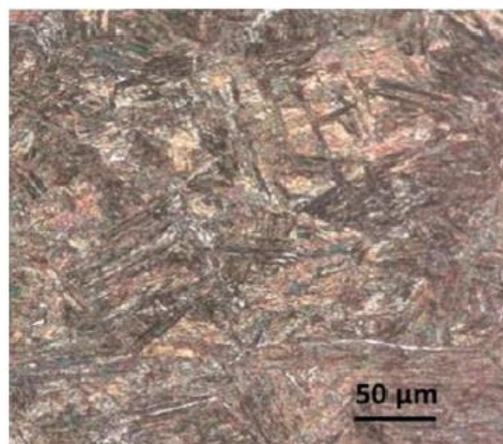


Material: Acero al boro
Temperatura: 900 °C
Tiempo de residencia: 3 s
Microestructura: Perlita y martensita

Figura 28.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 3 segundos de residencia. Se observa una pequeña porción de martensita y Perlita en porcentajes de 90% y 2% respectivamente [4].

La Figura 29. muestra la microestructura resultante para el enfriamiento en nanofluido con un temple de 5s, en la cual se observa una gran cantidad de martensita de forma acicular orientada en distintos ángulos distribuida en casi toda la muestra, lo que sugiere un incremento en la resistencia mecánica, los porcentajes de las fases analizadas fueron 97% Martensita, 0.01% Bainita.

Nanofluido

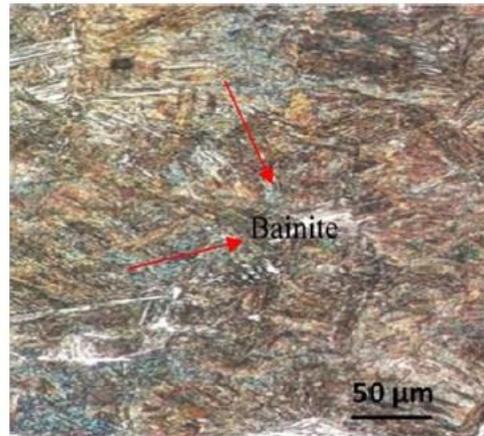


Material: Acero al boro
Temperatura: 900 °C
Tiempo de residencia: 5 s
Microestructura: martensita

Figura 29.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 5 segundos de residencia. Se observa una microestructura casi completamente Martensítica (97%) con una muy pequeña porción de Bainita (0.01%) [4].

La Figura 30. corresponde al temple de 8s con nanofluido, en la cual se observa una microestructura con un 95% Martensita y un 3% de Bainita.

Nanofluido

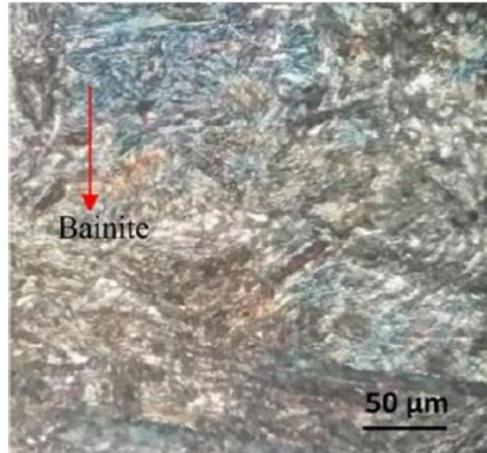


Material: Acero al boro
Temperatura: 900 °C
Tiempo de residencia: 8 s
Microestructura: Martensita y bainita

Figura 30.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 8 segundos de residencia. Se observa una microestructura Martensítica con Bainita, en proporciones de 95% y 3%, respectivamente [4].

La Figura 31. muestra un incremento en el contenido bainítico de un 15% y una reducción de la Martensita con sólo un 74% de presencia para el temple de 10s y enfriamiento con nanofluido; lo cual indica que mayores tiempos de temple llevan a la reducción de la fracción martensítica y aumento en la fracción bainítica.

Nanofluido

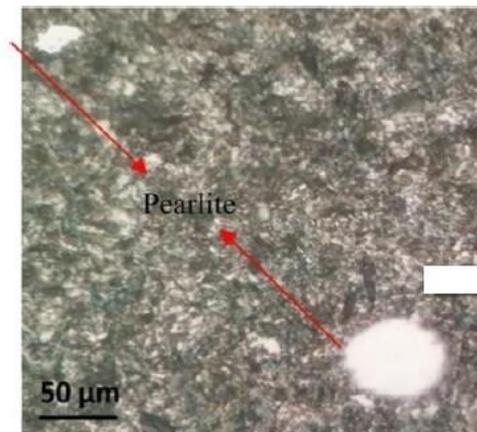


Material: Acero al boro
Temperatura: 900 °C
Tiempo de residencia: 10 s
Microestructura: Bainita y martensita

Figura 31.- Microestructura para la lámina templada en nanofluido (EGW 40:60 + 0.8 %vol. Alúmina) con 10 segundos de residencia. Se observa una microestructura Bainítica (15%) con Martensítica (74%) [4].

La Figura 32. muestra la microestructura para el temple de 10s en agua helada donde se observa que la rapidez de enfriamiento del agua no fue lo suficiente para transformar completamente en martensita la pieza, en su lugar se observa una mezcla de Bainita/Martensita con Perlita, con porcentajes de >40%, 50%, y 5% respectivamente; aun así, el enfriamiento fue lo suficiente para evitar la microestructura de perlita y ferrita.

Agua helada



Material: Acero al boro
Temperatura: 900 °C
Tiempo de residencia: 10 s
Microestructura: Perlita y martenista

Figura 32.- Microestructura para la lámina templada en agua helada con 10 segundos de residencia. Se observa una microestructura

principalmente de mezcla Bainita/ martensita y Perlita, en porcentajes >40%, 50%, y 5%, respectivamente [4].

Las consecuencias mecánicas de las transformaciones metalúrgicas de la placa de acero al boro pueden observarse en las figuras dónde se muestran las mediciones promedio de dureza y de resistencia a la tensión (UTS). Con todo lo anterior se demuestra que el enfriamiento con nanofluido en comparación con el agua, lleva a un incremento de las propiedades mecánicas y una mejor distribución de fases, consecuencia del enfriamiento asistido por las nanopartículas. Sin embargo, el tema de la distorsión que pudo haber sufrido la placa no se computó ni se mencionó.

3.3 Efecto en la superficie

El efecto del aditivo sobre el desempeño térmico se puede entender en tanto a la deposición de los CNT en la superficie templada. En la Tabla 4 se muestran los valores promedio de la rugosidad superficial medidos en cinco posiciones. La deposición de las partículas en la superficie mejora el ángulo de contacto y aporta rugosidad, por tanto, la transferencia de calor con el medio es mayor debido a una capa de vapor menos duradera y una ebullición por nucleación favorecida por la densidad de sitios de nucleación y las cavidades activas, en consecuencia, la dureza del material aumenta; en este experimento el aditivo impidió la deposición de los CNT en la superficie [12].

Medio de enfriamiento	Agua	Agua + CNT	Agua + CNT + surfactante
Rugosidad superficial (μm)	0.1%	0.52%	0.1%

Tabla 4.- Rugosidad superficial del acero AISI 1010 después del temple en agua, con nanofluido y nanofluido con surfactante [12].

Se llevaron a cabo experimentos de temple en agua destilada y en 3 nanofluidos base agua con partículas de alúmina (Al_2O_3), sílice (SiO_2) y diamante (C), con tamaños 38.8, 32.9 y 164.5 nm respectivamente, y concentraciones de 0.001, 0.01 y 0.1 %vol. con la finalidad de estudiar

el efecto que tiene la iteración del temple en la transferencia de calor con el medio, consecuencia de una modificación superficial en las probetas esféricas de acero inoxidable grado 302 (*Stainless Steel, SS*) y una aleación de circonio, "Zircaloy" de 10 mm de diámetro con una rugosidad superficial inicial de 0.6 y 3.2 μ m, respectivamente. Para fines demostrativos sólo se usará la información pertinente al acero inoxidable [14].

En la Figura 33 de a) a c) se muestran las curvas de enfriamiento de la probeta de SS en los 3 nanofluidos de alúmina con concentraciones de 0.001, 0.01 y 0.1 %vol. Cada figura contiene una curva de referencia perteneciente al temple en agua y los temples sucesivos; en cada repetición la esfera era recalentada a la temperatura de austenización y vuelta a templar.

Es evidente la tendencia en las curvas a), b) y c) del retraso (reducción del tiempo) en el enfriamiento de la esfera con el incremento en experimentos y con el aumento en la concentración de nanopartículas, teniendo esta última un efecto mayor sobre la curva de enfriamiento; en la Figura 33 c) es evidente el cambio drástico del primer al segundo temple, consecuencia de la deposición de las nanopartículas en la superficie, fenómeno que incrementa con cada iteración que parece tender a un límite, debido quizá a la sobre deposición y esto disminuye las cavidades activas, es probable que después de cierto punto el enfriamiento sea entorpecido por la capa de partículas.

La Figura 33d). muestra fotografías para la séptima corrida en el NF de 0.1 %vol. Donde se observa la nucleación intermitente de burbujas en la fase de la capa de vapor 22 segundos después del inicio del temple, el intervalo de tiempo entre los cuadros es de 20ms.

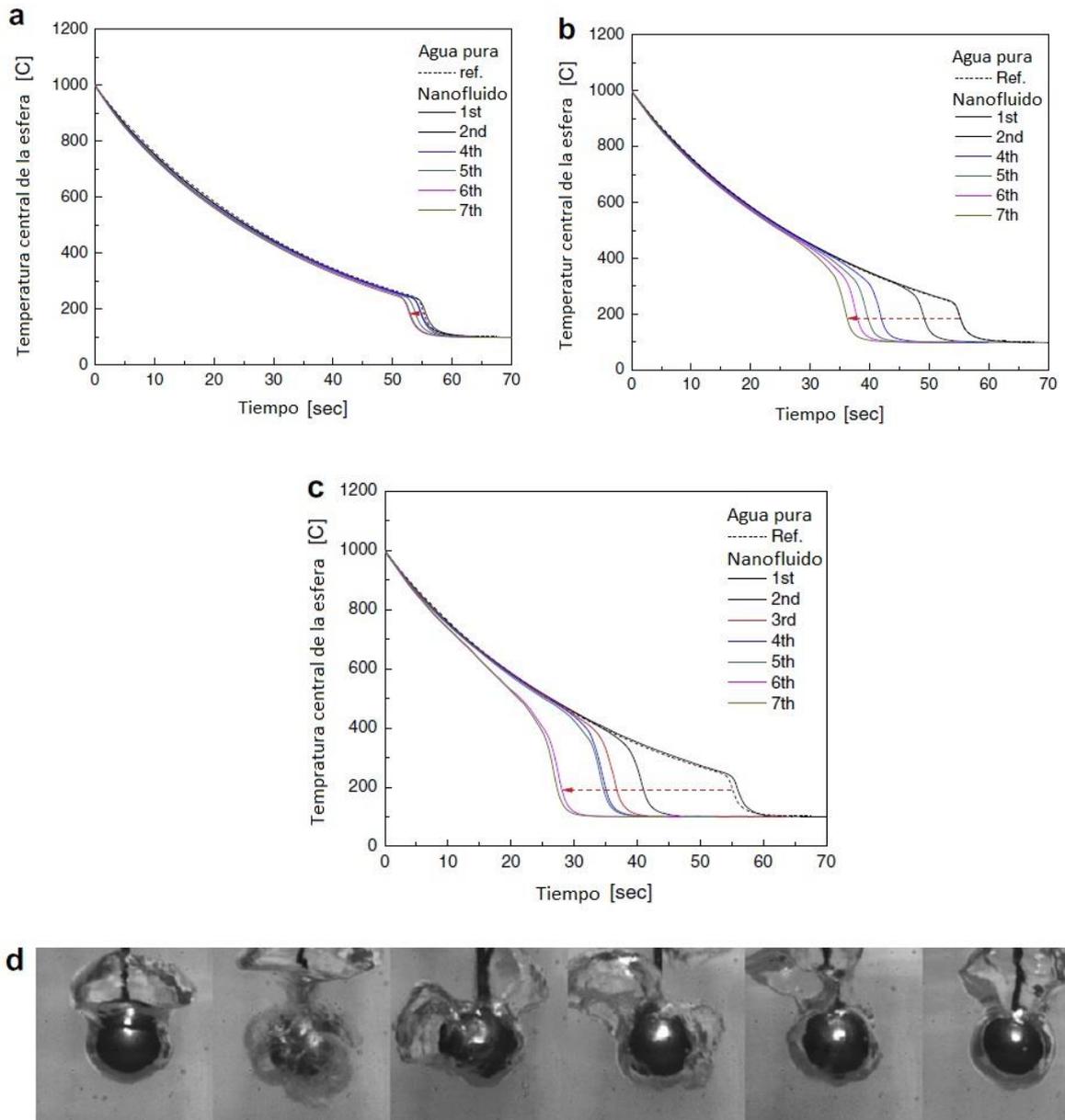


Figura 33.- Temple de la esfera de acero inoxidable grado 304 en nanofluidos de Al_2O_3 con concentraciones de a) 0.001, b) 0.01 y c) 0.1 %vol.; d) Imágenes después de 22 segundos del séptimo temple en nanofluido con concentración de 0.1 %vol. donde se observa la nucleación de burbujas durante la capa de vapor, el tiempo entre cada fotograma es de 20ms [14].

En todas las curvas con la menor concentración la información graficada cae dentro de la dispersión de las curvas realizadas en agua. A concentraciones mayores la curva de la primera corrida es muy similar

a la del agua lo cual sugiere que las nanopartículas, a las concentraciones de trabajo, tienen un efecto pequeño o nulo sobre el comportamiento de temple de una esfera sin temple previo. Sin embargo, a las repeticiones posteriores las curvas sufren un desplazamiento drástico hacia la izquierda, lo que implica que el final de la etapa de la capa de vapor ocurre mucho antes y a una mayor temperatura, lo cual es observable en las inflexiones de la curva. Para el caso crítico, en el NF 0.1%vol. de alúmina y séptima repetición, el tiempo fue reducido en un 50% con respecto al agua.

En cada corrida hay un incremento en la deposición superficial de nanopartículas en la esfera lo cual lleva a un decremento en la duración de la etapa de vapor, mayores rapidezces de enfriamiento, mayor mojabilidad, lo cual se justifica con el desplazamiento y forma de las curvas de enfriamiento.

Las Figuras 34 a), 34 b) y 34 c) muestran el comportamiento en el temple de la esfera SS en los 3 nanofluidos de alúmina, sílice y diamante con 0.1 %vol. de partículas. En las figuras abajo mostradas se observa una tendencia común: a mayor número de repeticiones mayor es la rapidez enfriamiento de la esfera, siendo el desplazamiento de la curva más severo para el nanofluido de sílice, pero con una temperatura más baja para la ruptura de la capa de vapor en comparación al nanofluido con alúmina, esto es apreciable cualitativamente en la primera inflexión de las curvas, una capa de vapor más duradera está asociada a gradientes térmicos, esfuerzos residuales y distorsión.

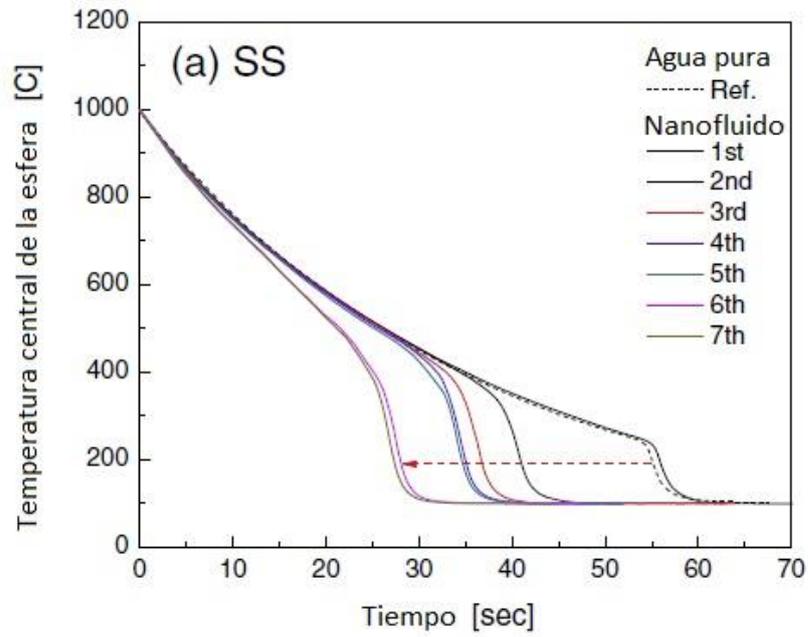


Figura 34 a) Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de alúmina en concentración 0.1%vol. [14].

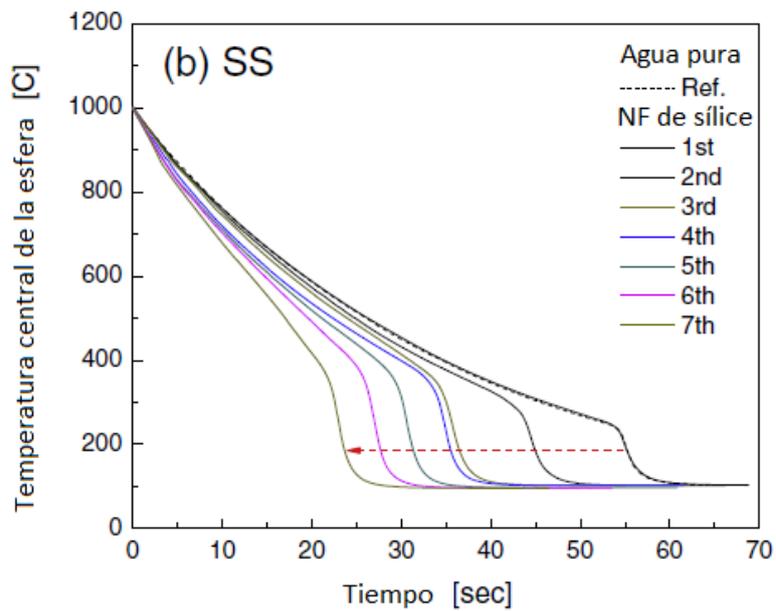


Figura 34 b) Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de sílice en concentración 0.1%vol. [14].

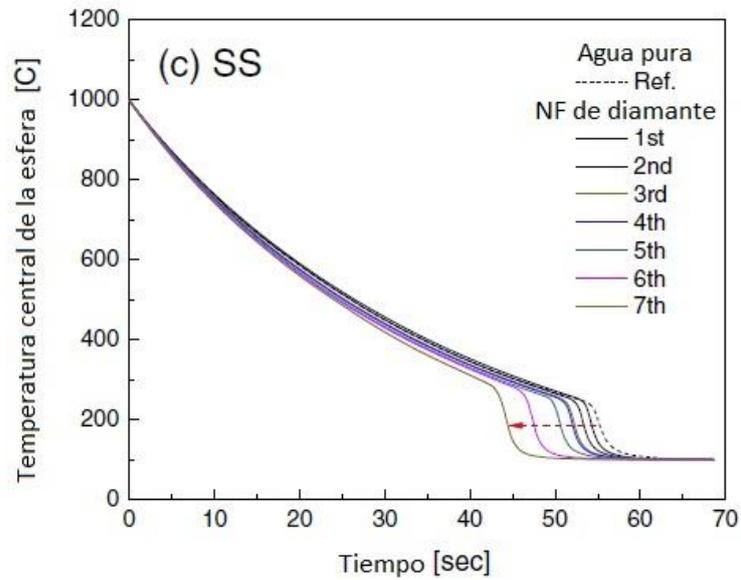


Figura 34 c) Curvas de enfriamiento en nanofluido (EGW 40:60) de diamante en concentración 0.1%vol. [14].

El incremento en la rapidez de enfriamiento es asociado no al cambio de las propiedades termofísicas del fluido base sino a la deposición de las nanopartículas a cada de repetición del temple, lo cual puede sugerir que a las concentraciones de trabajo, una manera de acelerar el proceso de temple es cambiar la condición superficial del componente previo al procesamiento con la deposición de partículas presentes en el nanofluido o la adición de algún agente surfactante, ya que en el estudio realizado el temple fue repetido en siete ocasiones lo cual no sucede en la realidad del procesamiento.

Posterior al temple se calculó el ángulo de contacto de las esferas de SS en agua y los diferentes nanofluidos de concentración 0.1 %vol. a dos diferentes temperaturas el cual se muestra en la figura 35. En comparación con el agua la mojabilidad de las probetas templadas en nanofluidos de alúmina, sílice y diamante es mejorada. Mientras es razonable asumir que el incremento en la rugosidad y la mojabilidad

promueven el fin de la capa de vapor, la información perteneciente al diamante (tiene el mismo ángulo de contacto que la sílice y una mayor conductividad térmica, pero el desplazamiento de la curva de enfriamiento es muy ligero) sugiere la presencia de otro efecto no despreciable que no reside en la mojabilidad aportada por la deposición, tal vez pueda deberse al acoplamiento fonónico entre la superficie y el material depositado, sin embargo, este fenómeno necesita ser identificado en posteriores investigaciones.

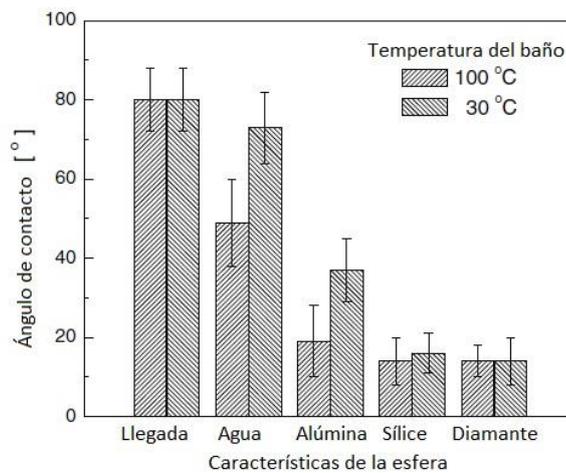


Figura 35.- Ángulo de contacto entre la esfera de SS el agua y los distintos nanofluidos de concentración 0.1%vol. así como la información de la esfera de llegada [14].

La formación de la capa depositada de nanopartículas, Figura 36, es mostrada a través de microscopía electrónica de barrido de la superficie templada de una placa de acero inoxidable grado 316 (5x45x0.05 mm) en tres diferentes nanofluidos, Al_2O_3 , ZrO_2 y SiO_2 de tres concentraciones 0.1%vol., 0.01%vol., 0.001%vol. [20]. Analizando la escala de tamaño mostrada para cada microscopía salta una diferencia, la de agua pura es de $10\mu m$, mientras que para los nanofluidos es de $100\mu m$, para el agua se tuvo un aumento 10 veces mayor y no se aprecia un relieve tan definido como con los nanofluidos.

Es evidente la formación de la capa y las diferencias morfológicas entre las distintas nanopartículas, sin embargo, al medir el ángulo de contacto a través de la técnica de gota inmóvil (*Sessile droplet technique*) se encontró que las diferentes nanopartículas tienen un impacto similar sobre este parámetro. La Figura 37 muestra el cambio del ángulo de contacto de gotas de agua pura y de nanofluido de alúmina sobre la superficie de acero templada en agua y en nanofluido de alúmina, la disminución del ángulo de contacto es debido a la capa depositada; los ángulos de contacto obtenidos para agua pura y NF de alúmina a 0.01%vol. sólo difieren en dos unidades, 20° y 18° respectivamente, obteniéndose valores muy similares para los demás nanofluidos. Del análisis de la Figura 37 se desprende que la mejora en mojabilidad no es tan atribuida a las nanopartículas en sí, ni su morfología, sino por su deposición, a la formación de cavidades activas; es evidente la reducción en un grado muy similar del ángulo de contacto para agua pura y nanofluido de alúmina, lo cual demuestra la estrecha relación entre deposición y reducción del ángulo de contacto.

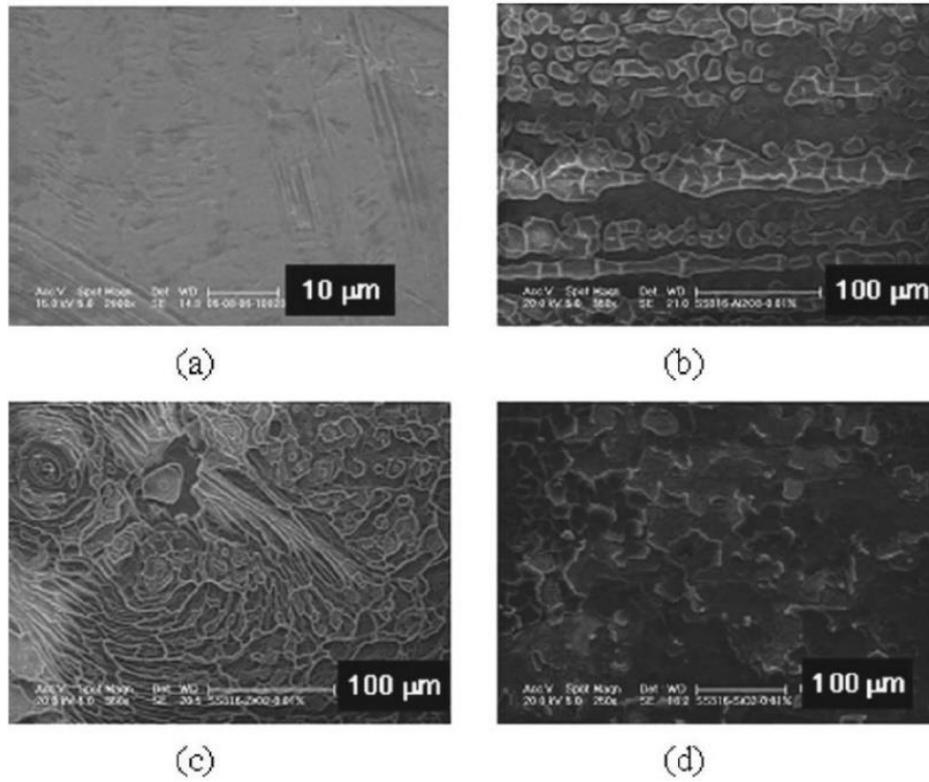


Figura 36.- Microscopía para una placa de acero inoxidable grado 306 templada en (a) agua pura, (b) NF 0.01%vol. Al_2O_3 , (c) NF 0.01%vol. ZrO_2 , (d) NF 0.01%vol. SiO_2 se observa la formación de una capa de nanopartículas en la superficie [20].

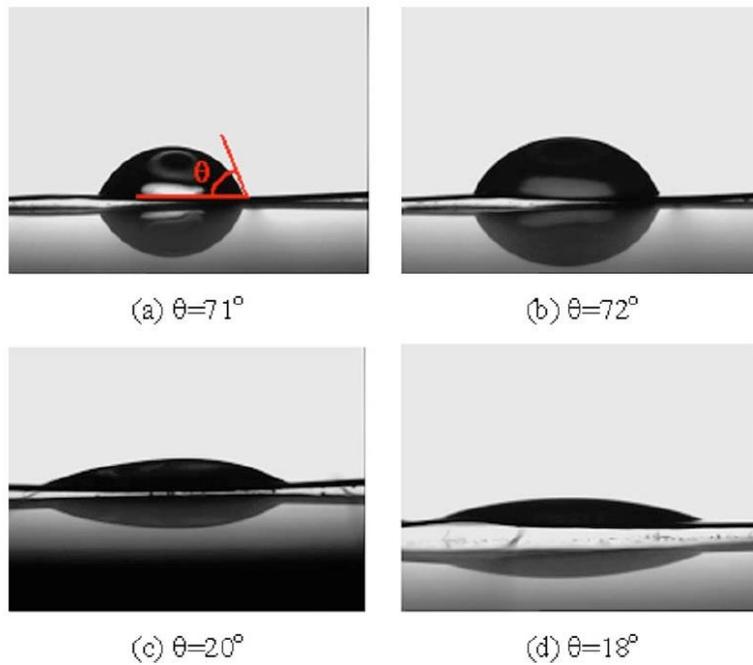
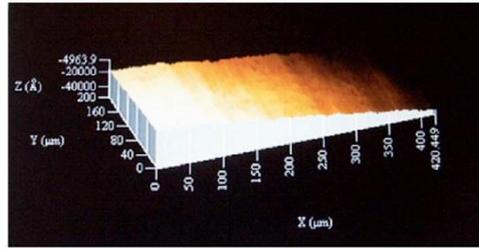
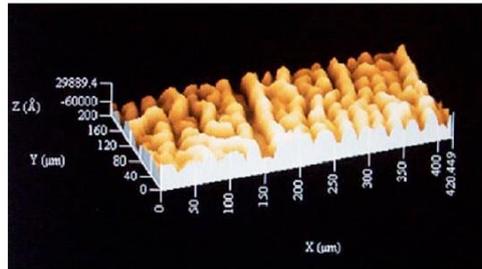


Figura 37.- Ángulo de contacto para a) gota de agua pura sobre superficie templada en agua, b) gota de NF Al_2O_3 0.01%vol. sobre superficie templada en agua, c) gota de agua sobre superficie templada en NF Al_2O_3 0.1%vol., d) gota de NF Al_2O_3 0.1%vol. sobre superficie templada en NF Al_2O_3 0.1%vol. [20].

A través de perfilometría, Figura 38, fue posible cuantificar la rugosidad de la superficie, tanto con deposición de nanopartículas como sin estas, cuyos datos pueden ser ocupados en modelos matemáticos (Ecuaciones 7 y 9) para su validación.



(a)



(b)

Figura 38. Perfilometría de la superficie de una placa de acero inoxidable grado 306 templado en (a) agua pura y (b) nanofluido con 0.1vol% de alúmina [20].

CONCLUSIONES

De la investigación documental y el análisis de los artículos que contemplan explícitamente [16-25] las consecuencias metalúrgicas-mecánicas de los aceros templados en nanofluidos, así como aquellos que se refieren a la interacción nanofluido-acero se desprenden las siguientes conclusiones:

-Los nanofluidos utilizados como fluido de trabajo en ductos de acero reducen la rapidez de corrosión del material en comparación al fluido sin nanopartículas, debido a la deposición de partículas sobre la superficie, sin embargo, a tiempos largos este fenómeno ocasiona deterioro en los parámetros térmicos, debe tenerse en consideración la aplicación y qué factor es más importante tanto para el desempeño como el costo de operación.

- El temple en nanofluido (Agua + 0.5wt% CNT sin Surfactante) de la probeta cilíndrica (20mm de diámetro, 50 mm de altura) de acero AISI 1010 llevó a un incremento de dureza (57.4%) y mejor distribución microestructural en comparación con el temple en agua con las mismas condiciones dinámicas y de temperatura. Al parecer el uso de nanofluidos en el temple son una alternativa para un endurecimiento más homogéneo en aceros de baja templabilidad.

- El uso de nanofluido (Agua+Etilenglicol (60:40) + 0.8%vol. Al₂O₃ sin surfactante) como medio de enfriamiento en la sección de temple del proceso de conformado por prensa caliente (*Hot Pressing Forming, HPF*) de una lámina de acero al boro 22MnB5, llevó a un incremento en las propiedades mecánicas de microdureza Vickers HV (1.397 mayor) y del esfuerzo de tensión (47.5%), con una microestructura casi completamente martensítica (97%) en comparación con el uso de agua como medio de enfriamiento. Aparentemente las propiedades mecánicas de un componente de acero pueden incrementarse de manera significativa y reducirse el tiempo de procesamiento cuando se utilizan

nanofluidos como medio de enfriamiento en el tratamiento térmico de temple.

- Los nanofluidos son una alternativa como medio de enfriamiento en el tratamiento térmico de temple aplicado a aceros en comparación con los medios de temple convencionales, en tanto que ofrecen mejoras del coeficiente de transferencia de calor (HTC), decremento de la duración de la capa de vapor, mayores rapidezces de enfriamiento, parámetros importantes para el éxito microestructural-mecánico-geométrico del tratamiento, consecuencia de la deposición de las nanopartículas en la superficie y su mayor conductividad térmica.

- Es necesaria la investigación experimental de las relaciones metalúrgicas-mecánicas en el temple de acero con nanofluidos direccionada a la distorsión geométrica y de forma, el cual es un tema no tocado por los investigadores.

- Asimismo es importante ahondar en la factibilidad del uso de nanofluidos en plantas piloto y posteriormente su aplicación a nivel industrial-comercial, sin embargo, es evidente que el camino aún es largo pero prometedor e incluso de atrevimiento.

PROPUESTAS PARA FUTUROS TRABAJOS

Al analizar los textos de la investigación documental salta inmediatamente el poco enfoque metalurgista con respecto al temple de acero en nanofluidos. Muy pocos estudios toman en cuenta aspectos microestructurales derivados del proceso y hay nula información sobre procesamiento consecuente como lo sería el revenido, lo cual puede ser un tema de investigación con enfoque en el efecto resultante de la deposición de las nanopartículas, el cual dependerá de la naturaleza de las partículas particularmente de las propiedades térmicas inherentes a la capa depositada.

Otro tema que no ha podido cubrirse debido a la falta de literatura al respecto es sobre la distorsión de componentes de acero templados en nanofluido, se demostró que estos fluidos tienen un alto coeficiente de transferencia, en consecuencia, una alta severidad, sin embargo, en la literatura consultada las investigaciones a lo más llegan al análisis microestructural y medición de propiedades mecánicas, sin mencionar el efecto sobre la distorsión de tamaño o forma.

Ambos temas muestran un campo disponible para la investigación experimental con lo cual la aplicación de los nanofluidos puede irse justificando y expandiendo en el ámbito del procesamiento térmico del acero con un enfoque metalurgista.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H.A.K., A.H., Machining Difficult-To-Cut Materials, Springer, (2019) 2:9-52.

[2] P.B., P.A.R., L.P.R., D.A.F., O.K.R., Experimental Investigation on Cooling Behavior and Residual Stresses for Quenching with Vegetable Oils at Different Bath Temperatures, Journal of Cleaner Production, (2019), 216:230-238.

[3] T.I.Y., Effect of the Quenching Procedure on Distortion and Tool Life, Met. Sci. Heat Treat. 21, 164-165 (1979).

[4] A.R.Y., S.L., M.R., Microstructure and Mechanical Properties of Boron Sheet Metal Steel in Hot Press Forming Process with Nanofluid as Coolant, Encyclopedia of Smart materials, 1-15.

[5] R.D.L.G., F.A.G.P., A.M.R., M.A.J.G., J.A.R.G., Analysis of the Effect of Immersion Rate on the Distortion and Residual Stresses in Quenched SAE 5160 steel using FEM, J. Mater Res. Technol. (2019); 8(6):5557-5571.

[6] A. K.N., Y.K., E.S., A.B., Sensitivity of Materials Properties on Distortion and Residual Stresses During Metal Quenching Processes, Journal of Materials Processing and Technology, (2010) 210:204-211.

[7] K.B., T.S.P.K., Effect of Concentration and Agitation on Surface Heat Flux During Quenching in CNT Nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2011), 54:106-117.

[8] Heat Treating, ASM Metals Handbook, (2009), vol 04:160-367.

[9] K.J.P., An Introduction to the Properties of Engineering Materials, (1978) 16:273-299.

[10] G.R., N.P., Review of Thermo-Physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and Their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment, Nanoscale Research Letters, (2011) 6:334.

- [11]** R.W., Quenching and Distortion: A Liquids Quenchant Database, News From IFHTSE. (2014) 21.
- [12]** K.B., R.A., S.S.R., Quenching Performance of AISI 1010 in CNT Nanofluid, Material Today Proceedings, (2017), 4:11044-11049.
- [13]** M.M.K., A.I., C.S.S.K., K.P.V., Experimental Investigation on Effect of Sufractant on Cooling Dynamics of Stainless Steel, Materials Today: Proceedings, (2021).
- [14]** H.K., G.D., T.M., J.B., L.W.H., On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-Based Nanofluid with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles, International Journal of Multiphase Flow, (2009), 35:427-438.
- [15]** K.V.S., L.S., S. K.V., R.S., Influence of Nanofluids Properties on Turbulent Forced Convection Heat Transfer in Different Base Liquids, Mathematical Methods on Applied Science, (2020) 1-22.
- [16]** U.V.N., K.N.P., Heat Transfer During Immersion Quenching in MWCNT Nanofluid, Materials Science Forums, (2015) vol. 830-831:172-176.
- [17]** L.H.P.Z., V.A.O., G.E.T., L.C.F.C., Quenching Power of Aqueous Salt Solutions, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2019), 140:807-818.
- [18]** S.Y.L., W.T.J., C.Y.Z., W.Q.T., Effects of Magnetic Field on the Pool Boiling Heat Transfer of Water-Based Fe₂O₃ Nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2019), 128:762-772.
- [19]** E.S., M.P., M.M.S., F.H., Boiling Heat Transfer of Alumina Nanofluids: Role of Particle Deposition on the Boiling Heat Transfer Coefficient, Periodical Polythecnica Chemical Engineering, (2016), 60(4):252-258.

- [20]** S.J.K., I.C.B., J.B., L.W.H., Effects of Nanoparticle Deposition on Surface Wettability Influencing Boiling Heat Transfer in Nanofluids, *Appl. Phys. Lett.* 89, 153107 (2006).
- [21]** D.T.W., A.D.N., Spreading of Nanofluids on Solids, *Nature*, (2003), 423:156-159.
- [22]** T.S., S.L., C.G., V.B., Minimization of Distortion in Heat Treated AISI D2 Tool Steel: Mechanism and Distortion Analysis, *Procedia Manufacturing*, (2018) 113-118.
- [23]** M.C., S.S., P.K.D., I.M., Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid, *Metallurgical and Materials Transactions A*, (2008) 39 A:1535-1542.
- [24]** N.A., A.M.B., N.F.A., S.A.E., S.M., A.A., Carbon-Based Nanofluids and their Advances Towards Heat Transfer Application- A Review, *Nanomaterials*, (2021), 11;1628:1-79.
- [25]** N.P., V.G., R.S., P.G., A.N., An Experimental Analysis of Quenching of Continuously Heated Vertical Rod with Aqueous Al₂O₃ Nanofluid, *Resource-Efficient Technologies*, (2017), 3:378-384.
- [26]** E.A.C.P., F.F., G.L., et al., A Review of the Use of Nanofluids as Heat-Transfer Fluids in Parabolic-Trough Collectors, *Applied Thermal Engineering* (2022).
- [27]** A.C.C., Patrones de Flujo y Distorsión en Baños de Temple con Modificadores, Tesis de licenciatura para Obtener el Grado de Ingeniero Químico Metalúrgico, Facultad de Química, U.N.A.M., (2008).
- [28]** H.F., U.P., M.H., W.B., Microstructural Adjustment of Carburized Steel Components Towards Reducing the Quenching Induced Distortion, *Journal of Material Processing Tech.* (2019), 264:313-327.

[29] A.A.A., I.V.S., A.A.M., P.N.L, Y.Y.K., Instability of a vapor layer on a vertical Surface at presence of nanoparticles, Applied Thermal Engineering, (2018), 139:87-98

[30] Powder Metals Technology, ASM Metals Handbook, (2009), Vol:07:83-175.

[31] A.A., C.Q., V.K.E.K., E.S., L.Y., P.Z., T.O., et al. Conceptual analysis framework development to understand barrier of nanofluid commercialization, Nano Energy, (2022), 92:106736.

[32] A.J., S.T., Energy, Exergy and Corrosion Analysis of Direct Absorption Solar Collector Employed with Ultra-High Stable Carbon Quantum Dot Nanofluid, Renewable Energy, (2022), 181:725-737.

[33] M.V., R.W., M.K., P.J., J.H.L., Corrosion, Rheology and Thermal Ageing Behavior of the Eutectic Salt-Based Graphene Hybrid Nanofluid for High-Temperature TES Applications, Journal of Molecular Liquids, (2021), 234:116156.