

**TRATAMIENTO TÉRMICO DE UN ACERO DE MEDIO CARBONO
MODIFICADO CON UNA ADICIÓN DEL 3% EN PESO DE CROMO**

**JUAN SEBASTIÁN RODRÍGUEZ REDONDO
JEFFERSON DANIEL ZABALETA NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2016

**TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI-SAE 4140 MODIFICADO CON
UNA ADICIÓN DEL 3% EN PESO DE CROMO**

JUAN SEBASTIÁN RODRÍGUEZ REDONDO

JEFFERSON DANIEL ZABALETA NIÑO

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO**

Director

Ph.D. SANDRA JUDITH GARCIA VERGARA

Codirector

Ing. RICARDO ANDRES GARCIA VERGARA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A **Dios**, por estar siempre presente en mi vida, por guiar mi camino, por darme fortaleza y sabiduría, por darme una vida llena de sueños y por permitirme cumplir uno de ellos, ser profesional.

A **mis padres Everardo y Yolanda**, por su apoyo incondicional y que se han enfocado en construir una familia con cimientos llenos de valores de hogar, principios y una moral justa y transparente, sin desmerecer el gran amor que me han dado a lo largo de mi vida, esmerándose día y noche por mi bienestar y educación con el fin de no solo formar una persona sino un ser humano y un profesional de calidad con la convicción de que el día de mañana llegue a aportar una semilla que contribuya en algo a construir un mundo mejor.

A **mis hermanos Eberth y Daniel**, por impulsarme a no desfallecer, a seguir mis sueños y mis metas, a ser mejor persona cada día para brindarles el mejor ejemplo.

A **mi novia Jeimi Andrea**, por brindarme un amor incondicional y sincero, por enseñarme tantas lecciones de vida, por su paciencia, por su dedicación, por su enorme y puro corazón, por compartir mis sueños y anhelos, por brindarme su amistad, confianza y cariño y por darme la convicción de crecer cada día como ser humano y como hombre.

A **mis primos, tíos, tías, abuelos, demás familiares y amigos**, que con sus buenos deseos y apoyo pusieron un granito de arena en este logro.

A **mi compañero Jefferson**, por su amistad a largo de nuestra carrera y en este último escalón por su compromiso y entrega.

Juan Sebastián Rodríguez Redondo

DEDICATORIA

Primero que todo dedicó este proyecto de grado a Dios padre que me acompaña en todo momento de mi vida y a mi madre hermosa que con su apoyo y dedicación me ayudo a cumplir este gran sueño.

A mis compañeros de estudio y docentes que contribuyeron de alguna manera en mi crecimiento personal y profesional.

JEFFERSON D. ZABALETA NIÑO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos culminar con éxito esta importante etapa.

A nuestra directora de proyecto la Dr. Sandra Judith García Vergara por su guía, paciencia, colaboración y aporte de valor agregado a nuestros conocimientos. A nuestro codirector el Ing. Ricardo Andrés García Vergara por su colaboración.

A los técnicos Juan Domingo, Sergio y Ambrosio, que con su apoyo y colaboración fueron pieza importante en la realización de este proyecto.

Y a cada una de las personas que pusieron un granito de arena en la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 ACEROS DE LA SERIE AISI-SAE 4XXX.....	18
2.1.1 Efecto de los principales elementos aleantes de la serie 4XXX.....	20
2.1.2 Aplicaciones de los aceros de la serie 4XXX.....	22
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	25
3.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL.....	26
3.2 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	27
3.2.1 Recocido.....	27
3.2.2 Temple y revenido.....	27
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL ACERO.....	28
4.1.1 Composición química.....	28
4.1.2 Análisis de difracción de rayos X (DRX).....	29

4.1.3	Análisis de inclusiones.....	30
4.1.4	Análisis de tamaño de grano.....	31
4.1.5	Microestructura.....	31
4.1.6	Dureza y microdureza.....	32
4.1.7	Análisis microestructural.....	33
4.1.8	Análisis de templabilidad.....	34
4.1.9	Análisis de resistencia a la tracción.....	34
4.2	TRATAMIENTO TÉRMICO.....	36
4.2.1	Recocido.....	36
4.2.2	Temple y revenido.....	37
4.2.3	Comparación de los tratamientos térmicos realizados al acero modificado y a un acero AISI-SAE 4140 convencional.....	38
5.	CONCLUSIONES.....	40
6.	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	42
	ANEXOS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.....	25
Figura 2. Difractograma de acero de medio carbono modificado en estudio.....	30
Figura 3. Micrografía óptica del acero modificado con adición de 3% en peso de Cr sin atacar, sección longitudinal 100X.....	30
Figura 4. Comparación entre microestructura del acero modificado a 100x con la plantilla de comparación del ocular del microscopio.....	31
Figura 5. Micrografías ópticas del acero de medio carbono modificado con una adición de 3% en peso de Cr, atacada con nital por 14s. (a) 500X (b) 1000X (c) 2000X (d) 1000X presencia de microsegregaciones.....	32
Figura 6. Curva Jominy del acero de medio carbono modificado.....	34
Figura 7. Curva de Esfuerzo vs Deformación del acero modificado.....	35
Figura 8. Morfología de fractura del acero modificado. (a) macroscópicamente (b) microscópicamente (c) Defecto en la probeta 1.....	36
Figura 9. Micrografías ópticas del acero modificado con Cr y del acero AISI-SAE 4140 convencional tratados térmicamente a 500X y atacadas con nital por 20s. (a) Acero modificado recocido, (b) Acero convencional normalizado, (c) Acero modificado templado, (d) Acero convencional templado, (e) Acero modificado bonificado y (f) Acero convencional bonificado.....	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI-SAE 4140..	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI-SAE 4340..	19
Tabla 3. Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos del acero AISI-SAE 4140.....	19
Tabla 4. Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos del acero AISI-SAE 4340.....	20
Tabla 5. Composición química del acero de medio carbono modificado en estudio.....	28
Tabla 6. Durezas obtenidas del acero de medio carbono modificado en estado de suministro.....	33
Tabla 7. Microdureza obtenida del acero de medio carbono modificado en estado de suministro.....	33
Tabla 8. Durezas obtenidas en los diferentes estados del acero modificado en estudio y el acero AISI-SAE 4140.....	39

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Diagramas TTT y CCT del acero AISI-SAE 4140.....	45
Anexo B.	Diagramas TTT y CCT del acero AISI-SAE 4340.....	47

RESUMEN

TITULO: TRATAMIENTO TÉRMICO DE UN ACERO DE MEDIO CARBONO MODIFICADO CON UNA ADICIÓN DEL 3% EN PESO DE CROMO *

AUTORES: RODRÍGUEZ REDONDO JUAN SEBASTIÁN, ZABALETA NIÑO JEFFERSON DANIEL **

PALABRAS CLAVE: Aceros de la serie 4XXX, acero AISI-SAE 4140 y 4340, templabilidad, resistencia a la tracción, microestructura, tratamientos térmicos.

RESUMEN: En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio de tratamientos térmicos y caracterización a un acero de medio carbono modificado con la adición de 3% en peso de Cromo. Para la caracterización del acero se inició con la composición química por medio del ensayo de espectroscopia de emisión atómica, en donde se encontró que es un acero que se acomoda en la serie 4XXX dada por AISI-SAE, también se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX) para conocer los compuestos formados por la adición de 3% en peso de Cromo, posteriormente se realizó la metalografía (inclusiones, fases presentes y tamaño de grano) y ensayos de dureza y microdureza del acero suministrado para observar la microestructura de colada y conocer la influencia que esta tenía en las propiedades mecánicas del material, seguidamente se realizaron ensayos de templabilidad y de resistencia a la tracción; todas las pruebas se hicieron siguiendo las normas ASTM respectivas. Teniendo en cuenta los elementos aleantes presentes en el acero modificado, diagramas CCT y TTT de aceros similares en su composición química y el tamaño de las piezas, se realizó el diseño y aplicación de los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido, posterior a ello, se realizó un análisis de metalografía y dureza para cada una de las piezas tratadas térmicamente, finalmente se realizó una comparación del acero en estudio con un acero AISI-SAE 4140 de los tratamientos térmicos realizados.

*Modalidad: Investigación

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas – Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Director: Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ricardo Andrés García

ABSTRACT

TITLE: HEAT TREATMENT OF A MODIFIED MEDIUM CARBON STEEL WITH AN ADDITION OF 3 wt% OF CHROME *

AUTHORS: RODRÍGUEZ REDONDO JUAN SEBASTIÁN, ZABALETA NIÑO JEFFERSON DANIEL**

KEYWORDS: Steel 4XXX series, steel AISI-SAE 4140 and 4340, hardenability, tensile strength, microstructure, heat treatment.

ABSTRACT: In this paper is carried out a study of heat treatments and characterization to a modified medium carbon Steel with an addition of 3wt% of Chrome. For the characterization of steel began with the chemical composition through the atomic emission spectroscopy test, where it was found that is an Steel that is accommodates in 4XXX series of AISI-SAE. Also, it was performed a X-ray diffraction test (XRD) to know the compounds formed by the 3wt% addition of chrome. Later it was performed the metallography (inclusions, phases present and grain size) and hardness and microhardness test of the supplied modified steel to observe the casting microstructure and know the influence this had on the mechanical properties of the material. Then it was performed hardenability and tensile strength tests. All tests were made following ASTM respective. Taking into account the alloying elements presents in the modified steel, CCT y TTT diagrams of the similar Steel in their chemical composition and the size of the piece, it was performed the design and application of the heat treatments of annealing, temper and tempering. After this, it was performed a metallographic and hardness analysis for each of heat treatment pieces. Finally, it was performed a comparison between the modified Steel in studied and the AISI-SAE 4140 Steel of the heat treatment performed.

* Investigation project

** Faculty of physiochemical engineering- School of metallurgical engineering and science of materials. Director: Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ricardo Andrés García Vergara.

INTRODUCCIÓN

Los aceros son materiales estructurales por excelencia, la combinación de composición química y tratamientos térmicos permite diseñar aceros que dependiendo de las propiedades físicas, mecánicas y químicas que se requieran puedan ser aplicables para cualquier tipo de industria. La versatilidad ya conocida de estos materiales junto con las necesidades globales de avances tecnológicos han convertido a los aceros en materiales fundamentales en todos los sectores industriales. Así mismo, el constante estudio de estos materiales, ha permitido el desarrollo de nuevos aceros y la optimización de los ya existentes.

Las fallas por desgaste al igual que por corrosión y por fatiga, son las principales causantes de daños en piezas, equipos industriales y estructuras fabricadas en acero [21]. Dentro de las estrategias implementadas para optimizar la vida útil de los componentes está la combinación de diferentes elementos aleantes en los aceros con el subsecuente tratamiento térmico de las piezas, lo anterior, además, permitirá la reducción de costos.

El presente trabajo se enfocará en la caracterización y tratamiento térmico de un acero de medio carbono fabricado por una industria local, el cual fue modificado aumentando el contenido de cromo hasta un 3% en peso, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar dos tratamientos térmicos a un acero de medio carbono modificado con una adición de 3% en peso de cromo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el acero de medio carbono modificado con adición del 3 % en peso de cromo mediante ensayos de composición, metalografía, templabilidad, dureza y tracción.
- Diseñar un tratamiento de recocido y posteriormente uno de temple y revenido para condicionar el acero para su aplicación.
- Caracterizar las muestras tratadas térmicamente mediante ensayos de metalografía y dureza.

2. MARCO TEÓRICO

Los aceros pueden clasificarse atendiendo a su composición química, aplicación, uso, etc. La clasificación más reconocida a nivel mundial se basa en la composición química, dentro de esta se destaca la clasificación hecha por la *Society of Automotive Engineers SAE* y ampliada por el *American Iron and Steel Institute AISI* [24].

2.1 ACEROS DE LAS SERIE AISI-SAE 4XXX

Los aceros de esta serie son aceros cuyos elementos aleantes principales son molibdeno, cromo y níquel. Dentro de este grupo se destacan los aceros AISI-SAE 4140 y 4340, estos dos aceros de medio carbono y baja aleación se pueden acoplar a innumerables aplicaciones lo que los hace muy usados a nivel industrial. El porcentaje de carbono oscila entre 0.38 y 0.43% en peso, además de contener molibdeno, manganeso, cromo y silicio. La gran diferencia está en que el AISI SAE 4340 contiene níquel [1, 11].

Los aceros AISI-SAE 4140 y 4340 presentan ciertas características esenciales que los hacen sobresalir por delante de otros aceros. En las Tablas 1 y 2 se observan las propiedades mecánicas mínimas estimadas de estos aceros. Se destacan sus buenas propiedades de dureza y resistencia mecánica en estado bonificado. Son aceros que no presentan fragilidad por revenido, presentan una alta templabilidad lo que los hace susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico y tienen una buena estabilidad hasta una temperatura de 400°C [2]. Son aceros muy versátiles, aptos para esfuerzos de fatiga, torsión, tienen buena combinación entre ductilidad

y tenacidad y presentan buena resistencia a la abrasión, impacto y fatiga. Piezas templadas mediante inducción pueden alcanzar durezas hasta de 57-62 HRC y pueden soldarse por cualquier proceso de soldadura conocido [2, 20]. Los tratamientos térmicos principales que se le aplican a los aceros AISI-SAE 4140 y 4340 son, normalizado, recocido, temple y revenido (Tabla 3 y 4).

Tabla 1. Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI-SAE 4140.

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
	MPa	PSI	MPa	PSI			
Caliente y maquinado	614	89.000	427	62.000	26	57	187
Estirado en frío	703	102.000	620	90.000	18	50	223
Templado y revenido	1.172	170.000	1.096	159.000	16	50	341

Fuente: [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/> [1].

Tabla 2. Propiedades mecánicas mínimas estimadas del acero AISI-SAE 4340.

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
	MPa	PSI	MPa	PSI			
Caliente y maquinado	1.227	178.000	689	100.000	10	30	363
Templado y revenido	1.200	174.000	1.124	163.000	16	48	352

Fuente: [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/> [1].

Tabla 3. Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos del acero AISI-SAE 4140.

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	T° Crítica aprox.	
		Ablanda.	Regenera.			Ac1	Ac3
1050-1200 °C	870-900 °C	680-720 °C	815-850 °C (horno)	830-850 °C (Agua-aceite)	500-650 °C	750 °C	790 °C

Fuente: [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/> [1].

Tabla 4. Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos del acero AISI-SAE 4340.

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	T° Crítica aprox.	
		Ablanda.	Regenera			Ac1	Ac3
1050-1200 °C	870-900 °C	650-700 °C	815-850 °C(horno)	820-850 °C (Agua-aceite)	540-650 °C	720 °C	770 °C

Fuente: [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/> [1].

Debido a los avances tecnológicos y a la necesidad de querer disminuir cada vez más los tiempos y costos de operación, se han venido haciendo estudios y avances en la parte de tratamientos térmicos de los materiales, una muestra de ello son los estudios que se han venido desarrollando para predecir la microestructura de un acero sin tener que someter el acero a diferentes tratamientos hasta llegar a una microestructura específica, con el fin de ahorrar tiempos de operación e investigación. En este campo, Totten, Bates, Webster y Sun, estudiaron la aplicación del análisis factorial de enfriamiento (QFA), para predecir propiedades tales como la dureza de los aceros como AISI 4130, 1045 y 4140. Sus investigaciones mostraron que el QFA proporcionó una buena correlación entre la dureza predicha y la medida para los aceros estudiados [26].

2.1.1 Efecto de los principales elementos de aleación de la serie 4xxx

- **Efecto del cromo:** El cromo es un elemento alfégeno (estabiliza la ferrita), dependiendo del porcentaje presente en el acero modifica el diagrama Fe-C, es un fuerte formador de carburos y disminuye la temperatura Ms [16]. Es un elemento aleante muy común en los aceros, siendo menos costoso que el níquel, se usa indistintamente en los aceros para construcción, herramientas, inoxidable y resistencia en caliente, se emplea en cantidades diversas desde 0.30 a 30 % en peso, según sea su aplicación [2]. Es usado en los aceros para ingeniería

principalmente para aumentar la templabilidad, promover la carburización y proporcionar resistencia mejorada a la abrasión y a la corrosión [12].

El cromo es soluble hasta 13% en hierro gamma y tiene solubilidad ilimitada en ferrita alfa, aparte de esto forma carburos muy estables, los más comunes son Cr_7C_3 y Cr_4C que son carburos simples o también carburos complejos como el $(\text{FeCr})_3\text{C}$ [12]. El carburo es relativamente estable a altas temperaturas y tiene una resistencia al desgaste excepcional, así como también la cementación de los aceros que contienen cromo, es relativamente fácil debido a la estabilidad y fácil formación del carburo de cromo. Así mismo, cuando el acero contiene más del 4% en peso de cromo mejora significativamente su resistencia a la corrosión [12]. En los diagramas TTT la influencia que tiene el cromo en las zonas de transformaciones de fase se logra notar luego de 2% en peso, donde las narices de transformaciones se corren hacia la derecha, permitiendo velocidades de enfriamiento más suaves a la hora de realizar temple y generando así microestructuras poco distorsionadas [19].

- **Efecto del molibdeno:** El molibdeno es un elemento aleante comúnmente utilizado, es relativamente costoso, tiene una solubilidad limitada en hierros gamma y alfa, y es un fuerte formador de carburos. Además los aceros con molibdeno son menos susceptibles a la fragilización por revenido [11]. El molibdeno tiene un mayor efecto sobre la templabilidad por unidad añadida que cualquier otro elemento, debido a que el molibdeno es un elemento no oxidable, lo que favorece la templabilidad del acero, por ello es útil donde se desee un control preciso de la templabilidad. El molibdeno aumenta las resistencias a la tracción a alta temperatura y al creep de las aleaciones ferrosas. La adición de molibdeno a los aceros resistentes a la corrosión que contienen altos contenidos en cromo o aceros al cromo-níquel, aumenta notablemente la resistencia a la corrosión [12]. El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y tiene la

capacidad de reemplazar al wolframio en la fabricación de aceros rápidos [2]. También a mayores cantidades de molibdeno las transformaciones de fase ferrita, perlita y bainita en los diagramas TTT tienden a correrse hacia la derecha [19].

- **Efecto del níquel:** Es uno de los elementos aleantes más importantes del acero, es un estabilizador de la austenita, evita el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos [2] y por ende cuando está presente en cantidades altas proporciona tenacidad mejorada, menor distorsión de temple y mejora la resistencia a la corrosión. No es un formador de carburos u otros compuestos, endurece efectivamente la ferrita y aumenta la plasticidad y la resistencia a la fatiga [12]. El níquel baja la temperatura crítica del acero y modifica el contenido de carbono eutectoide, así mismo disminuye la temperatura Ms [24], y a mayores cantidades de níquel las transformaciones de fase del diagrama TTT tenderán a correrse hacia la derecha [19].

2.1.2 Aplicaciones de los aceros de la serie 4xxx. Las aplicaciones de los aceros de la serie AISI-SAE 4XXX dependen considerablemente de qué tipo de elementos aleantes, aparte del molibdeno, contenga el acero. Como se ha mencionado antes, los aceros AISI-SAE 4140 y 4340 son muy versátiles y se encuentran en cualquier industria, pero se destacan principalmente las industrias: automovilista, aeronáutica, de maquinaria y petrolera, ya que en muchos de los casos cumplen con los requerimientos mínimos de operación. En estado bonificado son comúnmente utilizados para piezas de medianas dimensiones como ejes, pasadores, cigüeñales, barras de torsión, engranajes de baja velocidad, piezas de transmisión, émbolos, entre otras muchas piezas de maquinaria o automóviles en los que se requiere un alto grado de resistencia mecánica y dureza [20].

Los aceros AISI-SAE 4140 y 4340 también son muy utilizados en tornillos de alta resistencia en plantas que trabajan a temperaturas de 150 a 300°C, como calderas o partes de bombas [20]. La propiedad que hace a estos aceros importantes aquí es la resistencia mecánica a altas temperaturas, que como ya se mencionó antes, el molibdeno es por encima de otros elementos aleantes el artífice de esta excelente propiedad. En la industria petrolera el acero AISI-SAE 4140 es utilizado en piezas como taladros, brocas, cuerpos de escariadores y vástagos de pistón entre otros [20]. Mientras que en la industria aeronáutica se usa mucho el acero AISI-SAE 4340, para las partes estructurales del ensamblaje de alas, fuselaje, tren de aterrizaje y ejes para hélices de aviones [14][20], gracias a que presentan buena tenacidad, resistencia a la abrasión y resistencia al desgaste. Sin embargo, estas industrias requieren de altos requerimientos operativos, lo que lleva a invertir en materiales con mejores propiedades para así evitar detenciones que pueden generar pérdidas millonarias o accidentes que generen pérdidas humanas. En este orden de ideas, últimamente se han venido enfrentando todas las causas por las cuales hay deterioro de las piezas, equipos y estructuras a nivel mundial. En los estudios hechos por J.M Rodríguez y *et al* (2005), se encontró que las fallas por desgaste representan el 55% de pérdidas económicas generadas por deterioro de la pieza a nivel mundial [22]. Industrialmente se han hecho esfuerzos para mejorar la resistencia al desgaste y fatiga mediante modificaciones químicas y mecánicas en las piezas, así como también en los tratamientos térmicos realizados a los distintos tipos de acero presentes en la industria. Una muestra de ello son las investigaciones hechas recientemente sobre granallado por choque laser (LPS), el cual se diseñó para mejorar la resistencia al impacto, fatiga y desgaste, mediante la creación de una capa endurecida y la inducción de esfuerzos residuales a compresión [13].

Según Kalpakjia (1985), los esfuerzos residuales permanecen a lo largo de la sección transversal de la pieza incluso después de la aplicación de carga externa

[20], siendo una forma efectiva para mejorar la dureza de la superficie, el rendimiento de fatiga, resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste. Otro estudio hecho con respecto al granallado fue realizado modificando las partículas con las que se chocaban los materiales a mejorar, en este caso se llamó granallado microshot, y consistía en partículas más duras y pequeñas que las comúnmente utilizadas para este proceso. Este estudio concluyó que se mejoraba considerablemente la resistencia a la fatiga debido a la presencia de mayor esfuerzo residual en la superficie y una menor rugosidad de la misma [16].

Otros estudios con respecto a las microestructuras de los aceros se han venido destacando, como el hecho de que las propiedades mecánicas de los aceros de baja aleación pueden mejorarse mediante el refinamiento del grano austenítico. Como también se ha encontrado recientemente ciertos tipos de acero con buenas combinaciones de resistencia, ductilidad y tenacidad debido a la aparición de una serie de multi-fases, como también aceros de alta resistencia con tamaño de grano ultra fino de baja aleación [17]. Por otra parte, Barro Randall (1974) y Harish (2009) estudiaron que el tratamiento criogénico profundo para mejorar la resistencia al desgaste de los aceros, ya que se demostró que el tratamiento criogénico profundo puede mejorar la resistencia al desgaste por la precipitación de carburos eta de tamaño nanométrico en la martensita primaria [21].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se muestra el procedimiento metodológico seguido para la realización del presente trabajo de grado.

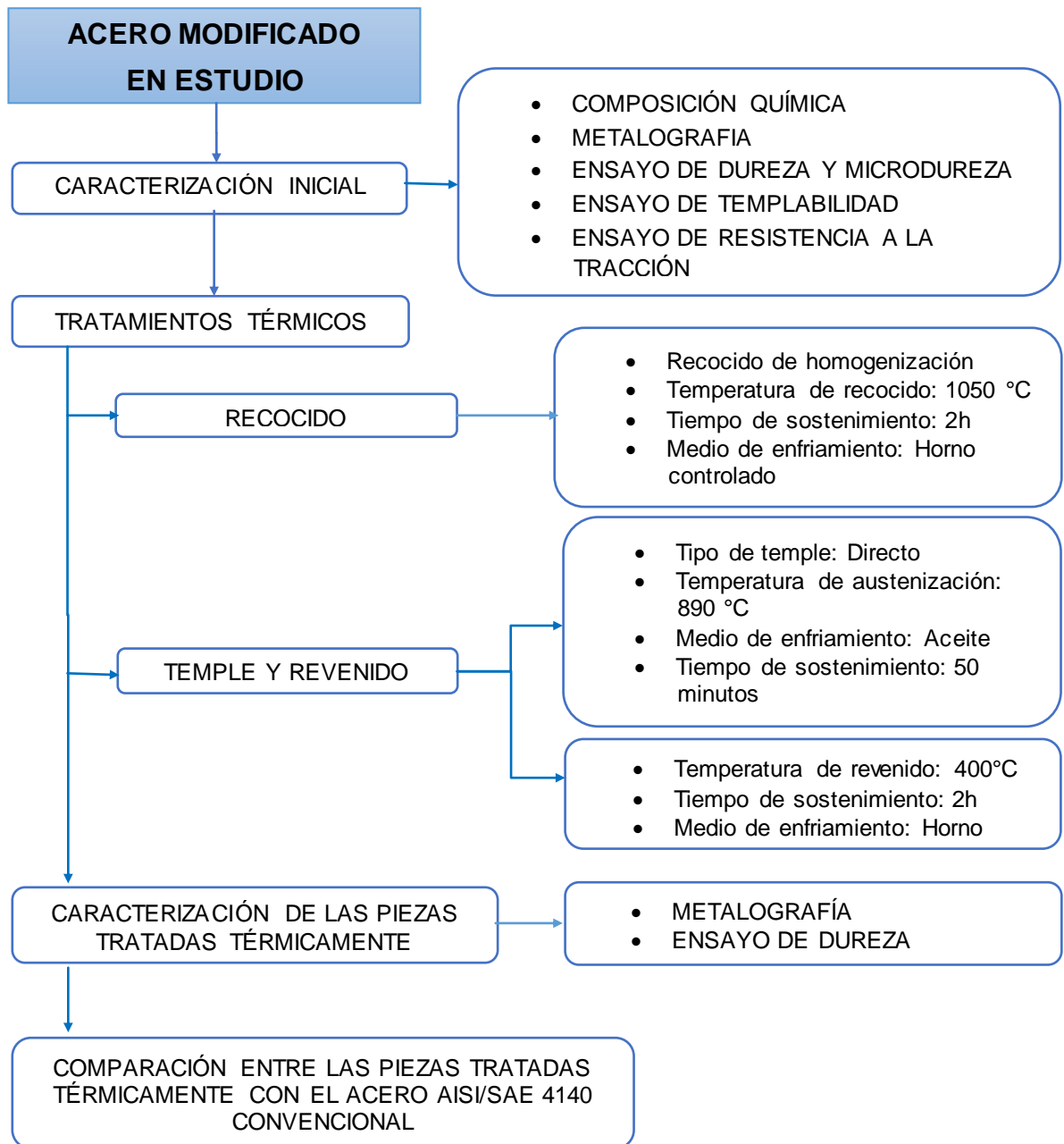


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental

3.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL

El acero de estudio fue suministrado por una empresa local. Se cortaron muestras de diámetro de 1 pulgada para su posterior caracterización. La composición química del acero modificado se determinó por espectroscopia de emisión óptica por chispa, usando un equipo Q4 Tasman marca Bruker en el laboratorio de espectroscopia del edificio de investigaciones del parque tecnológico de Guatimar. La muestra también se analizó por difracción de Rayos x (DRX), usando un equipo marca Miniflex en el laboratorio de Rayos X del parque tecnológico Guatimar, con el objetivo de identificar los carburos presentes mediante un análisis cualitativo.

Para el análisis metalográfico se usaron las normas ASTM [4] respectivas para la preparación de las probetas e identificación de las características presentes en la microestructura del acero, utilizando un microscopio óptico marca Olympus GX71. Las normas que se tuvieron en cuenta en esta técnica son: ASTM E3 [7] para la preparación metalográfica de las muestras, ASTM E45 [8] para la identificación de inclusiones y ASTM E112 [9] para la determinación del tamaño de grano. Las pruebas de dureza y microdureza se realizaron a las mismas probetas analizadas metalográficamente mediante un durómetro marca Wilson y un microdurómetro Vickers CV400AAT. Fue necesario tomar tres muestras representativas en tres probetas diferentes para obtener resultados verídicos.

El ensayo de templabilidad de Jominy se realizó usando el equipo marca Remex, siguiendo la norma ASTM A255 [5]. La temperatura de austenización fue de 870°C con un tiempo de sostenimiento de 40 minutos. Para la determinación de la resistencia a la tracción del acero se hizo la prueba de tracción utilizando la

máquina universal de ensayos marca Shimadzu, las dimensiones de las probetas y el procedimiento del ensayo se registrarán mediante la norma ASTM A370 [6].

3.2 TRATAMIENTO TÉRMICO

Muestras de 2.54 cm de diámetro y 1 cm de espesor del acero de estudio fueron sometidas a dos (2) ciclos de tratamiento térmico, uno que corresponde a un tratamiento térmico de recocido y el otro a un tratamiento térmico de temple más un revenido. Cada tratamiento se realizará a tres (3) muestras diferentes con el fin de obtener resultados más confiables.

3.2.1 Recocido. Se realizó un recocido de homogenización a una temperatura de 1050 °C, con un tiempo de sostenimiento de 2 horas y enfriado a una velocidad de 20°C por hora hasta una temperatura de 700°C. Posterior a ello se enfrió a una velocidad de 150°C por hora hasta 100°C y finalmente se dejó enfriar al aire hasta temperatura ambiente.

3.2.2 Temple y revenido. Se realizó un temple directo desde una temperatura de austenización de 890°C, a la cual se mantuvo la muestra previamente por 50 minutos. Posteriormente se enfrió en aceite hasta temperatura ambiente, para evitar la distorsión y el agrietamiento de las piezas. El revenido se hizo a las muestras previamente templadas a una temperatura de 400°C durante 2 horas, después de este tiempo se apagó el horno y se dejaron enfriar las muestras allí.

Finalmente todas las muestras tratadas térmicamente fueron caracterizadas por metalografía y ensayos de dureza, siguiendo los procedimientos descritos en el apartado 3.1.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL ACERO

4.1.1 Composición química. El acero contiene 0.477% en peso de carbono con 2.972% en peso de cromo, 1,198% en peso de níquel y 0.276% en peso de molibdeno como principales elementos aleantes (Tabla 5), lo que corresponde a un acero de medio carbono y media aleación.

Tabla 5. Composición química del acero de medio carbono modificado en estudio.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
Porcentaje en peso (%)	0,477	0,508	0,838	2,972	0,276	1,198	0,005	0,150

También se observa que el porcentaje de silicio es alto, esto puede ser atribuido a la necesidad de tener un agente desoxidante durante el proceso de fabricación, ya que es un acero fabricado por un proceso de colada, con chatarra en un horno de arco eléctrico. La chatarra base utilizada fue de acero de varilla ASTM A615 grado 60, también se le agregaron en ciertos porcentajes chatarra de acero AISI 304 y algunas ferroaleaciones con el fin de alcanzar la composición deseada.

La composición química obtenida es muy semejante a la presente en los aceros de la serie 4xxx, con la variación notable del porcentaje de cromo, provocada por el fabricante. La adición de 3% en peso de cromo cambia el diagrama hierro-carbono, de forma que el punto eutectoide pasa de estar en 0,8% de carbono a alrededor de 0,62% en peso, así como también, la temperatura Ac3, que pasa de ser 723°C a ser alrededor de 785°C [24]. La razón para aumentar el contenido de cromo, es que se desea mejorar las propiedades mecánicas. El cromo es un fuerte formador de carburos, además de aumentar la dureza del acero. El carbono es el principal elemento endurecedor y como se reporta en la literatura, trae muchos

beneficios tener elemento aleantes que engranen con el carbono y optimicen las principales propiedades mecánicas requeridas industrialmente.

Lo que lo hace un acero de la serie 4XXX sin duda es la presencia de molibdeno, el cual aumenta la templabilidad y la resistencia en caliente, así como disminuye considerablemente la probabilidad de fragilización por revenido y forma carburos, [12]. La presencia de níquel a pesar de no ser mayor al 1,5% en peso ayuda a evitar el crecimiento de grano durante los tratamientos térmicos [25], mientras que la presencia de silicio en una buena cantidad como se presenta en este acero modificado ayuda a aumentar su resistencia mecánica y la templabilidad. Por otra parte el manganeso ayuda a aumentar la resistencia y la dureza del acero, así como también a promover la formación de carburos y endurece la ferrita [25].

Sin embargo, el porcentaje de azufre en el acero es muy alto, la cantidad máxima permitida está alrededor de los 0.04% en peso. Este alto contenido de azufre aumentará considerablemente la fragilidad y disminuirá la resistencia al impacto [25]. Cabe destacar, que el acero contiene 0,508% en peso de manganeso, lo que podría ayudar a inhibir en una parte el efecto del azufre al formar MnS en vez de FeS [15].

4.1.2 Análisis de difracción de rayos X (DRX). De acuerdo con el difractograma observado en la Figura 2 el acero modificado en estudio presenta dos compuestos principalmente, carburo hierro cromo ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$) y cromo hierro ($\text{Cr}_{0.03}\text{Fe}_{0.97}$). El carburo compuesto Cr-Fe generalmente es una fase asociada a procesos de corrosión como producto y tiene una estructura cúbica [18]. Dado el alto porcentaje de cromo adicionado al acero, es normal la presencia de compuestos ricos en este elemento.

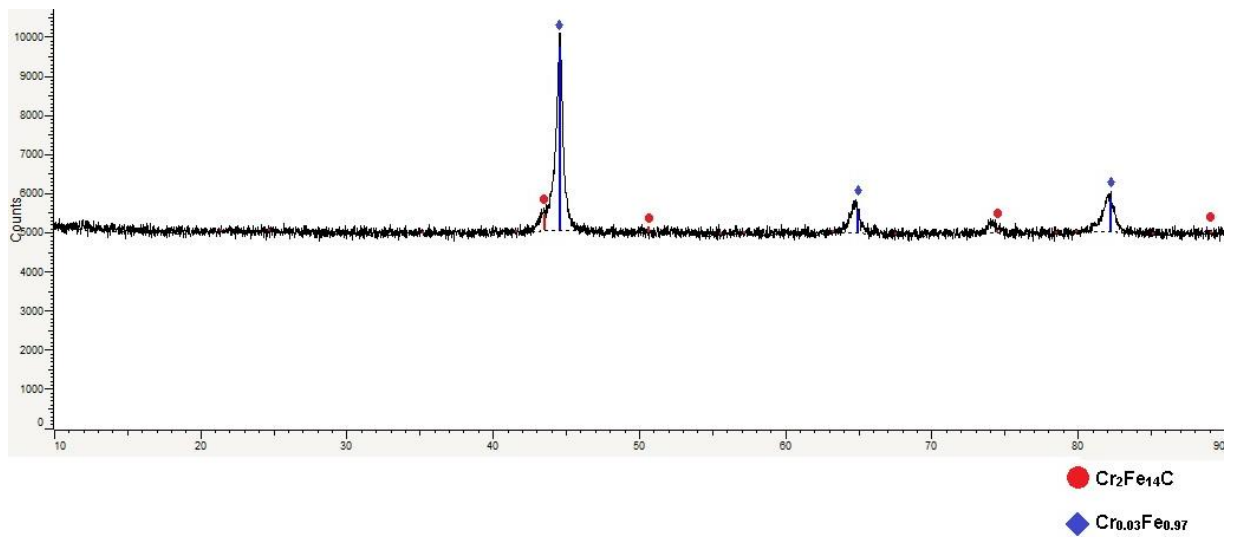


Figura 2. Difractograma de acero de medio carbono modificado en estudio.

4.1.3 Análisis de inclusiones. De acuerdo con la micrografía de la Figura 3, el acero presenta inclusiones no metálicas tipo D 2 ½, las cuales corresponden a óxidos globulares. También cabe resaltar la presencia de algunos poros.

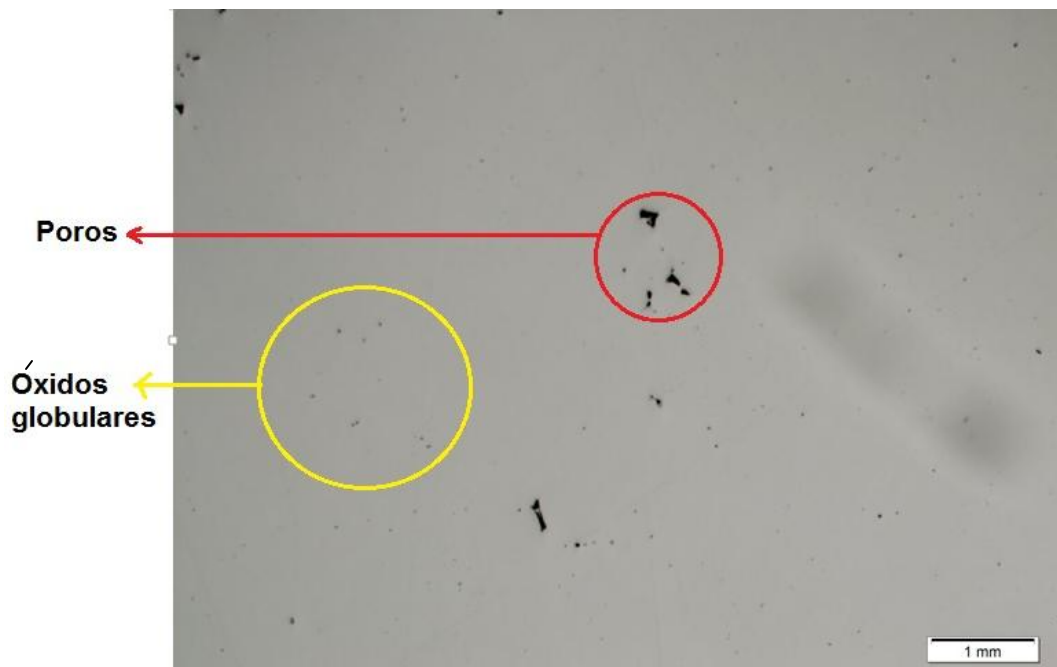


Figura 3. Micrografía óptica del acero modificado con adición de 3% en peso de Cr sin atacar, sección longitudinal a 100X.

4.1.4 Análisis del tamaño de grano. El acero tiene un tamaño de grano 5 (Figura 4), lo cual lo identifica en la clasificación como un acero de grano fino. Este grano fino favorece la resistencia a la tracción y mejora la dureza, así mismo disminuirá la susceptibilidad al agrietamiento y permitirá menor distorsión en el temple [3].

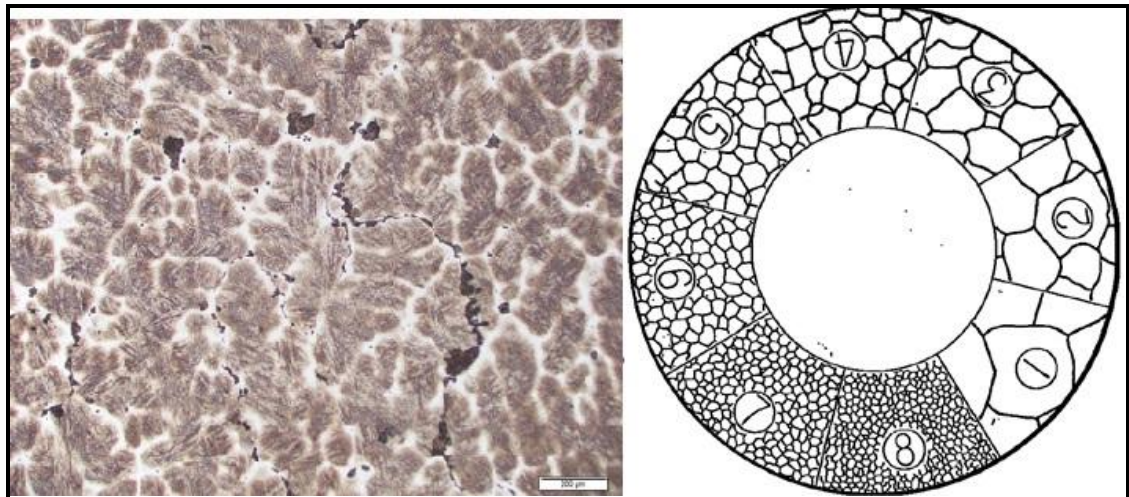


Figura 4. Comparación entre microestructura del acero modificado a 100x con la plantilla de comparación del ocular del microscopio.

4.1.5 Microestructura. Siguiendo las condiciones de colada suministradas por el proveedor del acero en estudio, el acero sufrió un tratamiento térmico de temple incompleto o con velocidad crítica de temple no alcanzada, debido al tamaño de las muestras coladas y al contenido adicional de cromo, por ende, la microestructura esperada una vez colado el acero es de ferrita, bainita y martensita. En la Figura 5 (a) se observa una red blanca que esta sobre los límites de grano y que podría corresponder a ferrita aleada con compuestos de cromo. También se observa en la Figura 5 (b) la presencia de ferrita Widmanstatten, mientras que, en la Figura 5 (c) se observa en el interior del grano la presencia de martensita. Las microsegregaciones intergranulares que se observan en la Figura 5 (d) son un fenómeno característico del proceso de colada y que puede llegar a perjudicar algunas de las propiedades mecánicas principales [23].

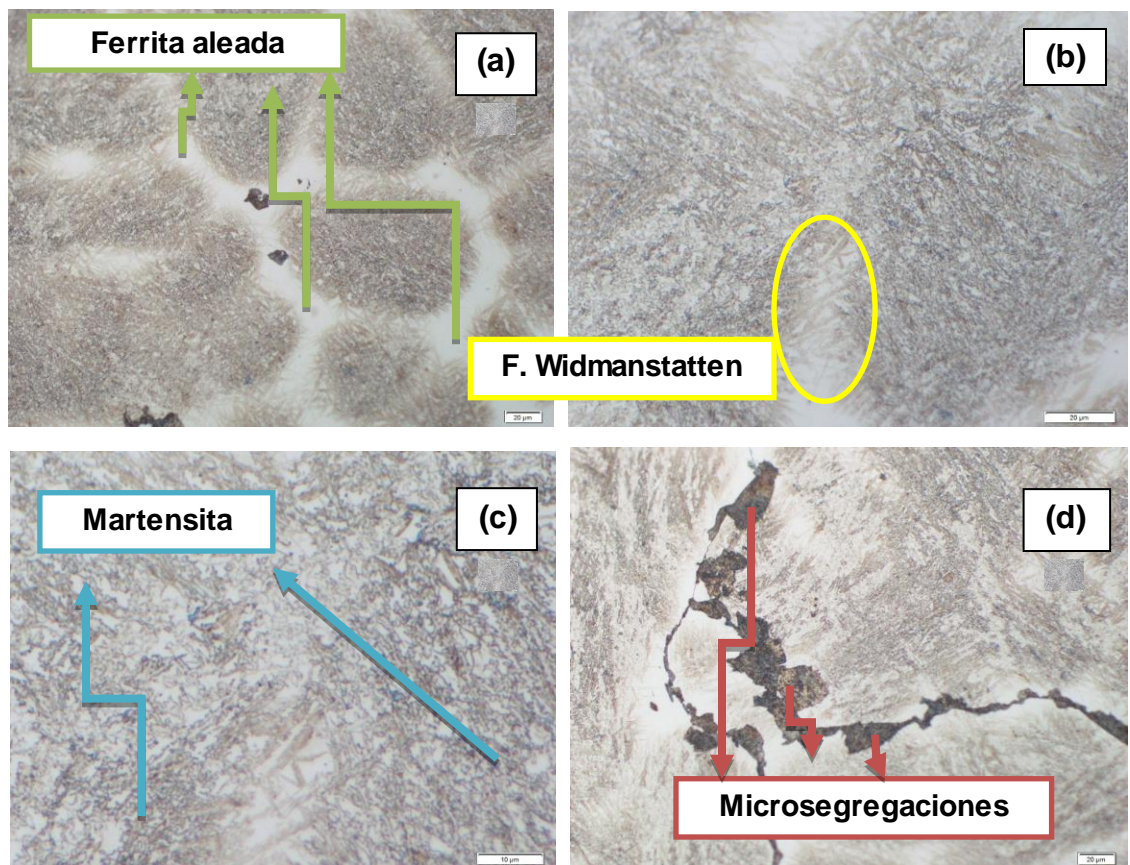


Figura 5. Micrografía óptica del acero de medio carbono modificado con una adición de 3% en peso de Cr, atacada con nital por 14s. (a) 500X (b) 1000X (c) 2000X (d) 1000X presencia de microsegregaciones.

4.1.6 Dureza y microdureza. El acero presenta una dureza de 40,3 HRC (Tabla 6), considerando que es un acero colado sin tratamiento térmico posterior, es una dureza considerablemente alta. De los resultados de microdureza que se observan en la Tabla 7 se confirma que la red blanca de ferrita presente en la microestructura se encuentra aleada con compuestos de cromo ya que presenta una microdureza alta.

Tabla 6. Durezas obtenidas del acero de medio carbono modificado en estado de suministro.

DUREZA HRC			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Centro	40,00	39,00	40,00
Mitad del radio	39,00	40,00	40,50
Extremo	42,00	41,00	41,50
Promedio	40,30	40,00	40,60

Tabla 7. Microdureza obtenida del acero de medio carbono modificado en estado de suministro.

MICRODUREZA VICKERS (Vc)			
	Ferrita aleada	Martensita	Segregaciones
Centro	665,34	602,29	486,55
Mitad del radio	606,55	603,99	461,7
Extremo	640,47	603,12	458,87
Promedio	637,45	603,13	469,04

4.1.7 Análisis microestructural. Teniendo en cuenta lo anterior se procede a hacer un análisis completo del proceso de enfriamiento del acero modificado en estudio. Al pasar por la temperatura A_{c1} inició la formación de una red continua de ferrita alotriomórfica proeutectoide sobre los límites de grano fino de la austenita como se observa en la Figura 5 (a), como el enfriamiento fue relativamente rápido, el mecanismo de transformación de fase pasó de ser difusivo a ser desplazativo, formándose así las placas de ferrita Widmanstätten desde los límites de grano de la ferrita alotriomórfica proeutectoide y posteriormente se formó martensita en el interior del grano. La alta microdureza obtenida a lo largo de la red blanca (Tabla 7) podría atribuirse a que esta ferrita alotriomórfica proeutectoide se encuentra aleada con carburos de cromo y otros compuestos y/o elementos que no alcanzaron a difundir en el enfriamiento del acero. Sin embargo, sería necesario realizar una mejor caracterización de esta fase en estudios posteriores.

4.1.8 Análisis de templabilidad. La curva Jominy del acero en estudio se presenta en la Figura 6. Se observa que la dureza en el extremo templado es 60 HRC correspondiente a una microestructura totalmente martensítica, a medida que aleja del extremo templado la dureza del acero disminuye hasta 43 HRC. La curva de tendencia conformada por los tres (3) ensayos realizados se ubica dentro del rango que tienen las bandas de templabilidad del acero AISI-SAE 4140 [23]. Esto es un resultado favorable y acorde a los elementos aleantes que contiene el acero y que mejoran la templabilidad.

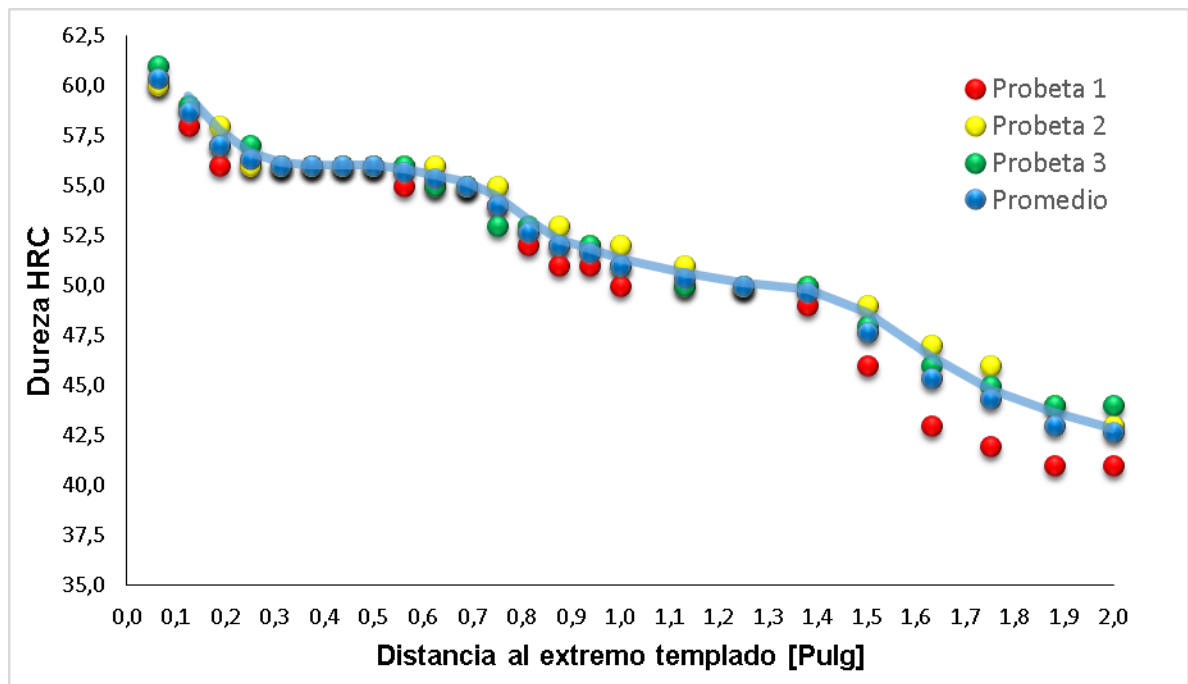


Figura 6. Curva Jominy del acero modificado en estudio.

4.1.9 Análisis de resistencia a la tracción. Según los resultados presentados en la Figura 7 en la que se describe la resistencia a la tracción del acero modificado de cada una de las probetas, se puede asegurar que el comportamiento del material al aplicarle dos fuerzas axiales en sentidos contrarios es frágil, ya que el esfuerzo de rotura del acero se produjo en la zona elástica sin presentarse alguna

deformación plástica. El esfuerzo máximo arrojado por las tres probetas fue de alrededor de 76000 psi, un valor bajo comparado con el acero 4140 convencional en estado bonificado que es de alrededor de 170.000psi. Esta baja resistencia a la tracción puede darse por diferentes factores, algunos de estos se deben a los defectos del proceso de colada como es el caso de las porosidades que se presentan en las probetas, estos poros funcionan como concentradores de esfuerzo disminuyendo notablemente la resistencia del acero y aumentando así su fragilidad. A nivel microestructural se puede atribuir esta baja resistencia al exceso de azufre, así como también a la red blanca con alta dureza que se encuentra distribuida en toda la microestructura del acero lo cual puede aumentar su fragilidad. Las microsegregaciones presentes afectan notablemente las propiedades mecánicas, ya que al tener el acero un elemento formador de carburos como es el cromo, las microsegregaciones influyen negativamente sobre ellos [25].

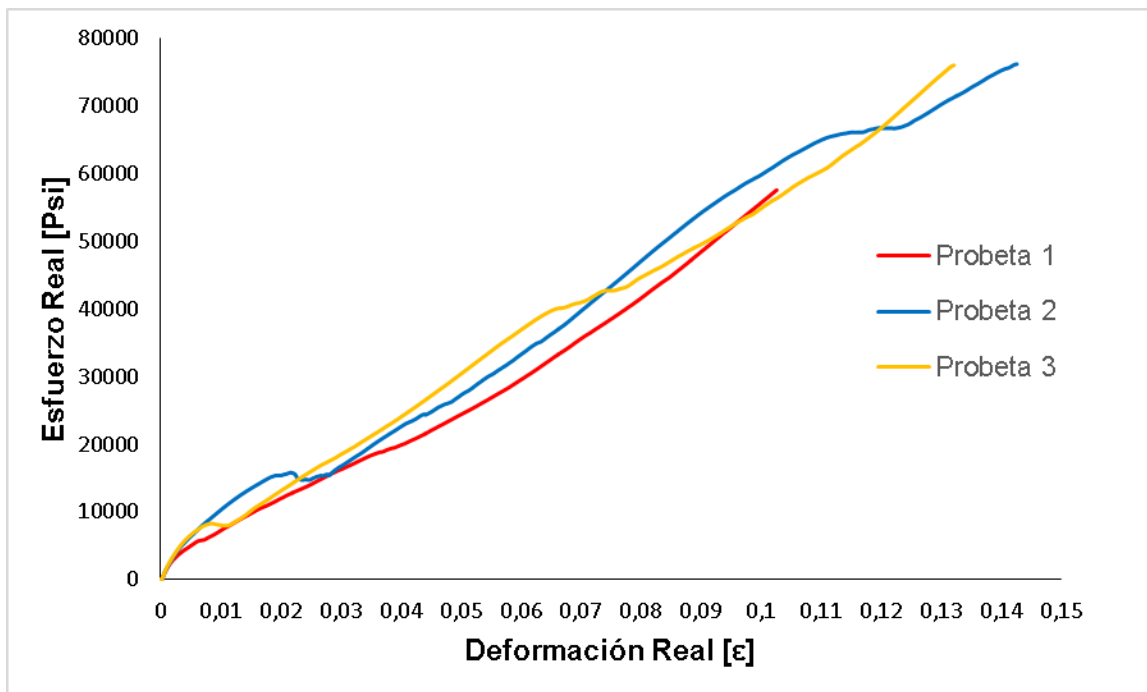


Figura 7. Curva de Esfuerzo vs Deformación del acero de medio carbono modificado en estudio.

En las Figuras 8 (a) y (b) también se puede evidenciar el comportamiento frágil del acero, por la morfología de fractura presente en la zona de rotura, en la que se observa una fractura plana, brillante y sin alguna deformación plástica aparente. Cabe resaltar que los datos de la probeta 1 pueden estar erróneos por la presencia de un defecto interno en la zona de análisis originado durante el proceso de la colada del acero, esto se puede observar en la Figura 8 (c).

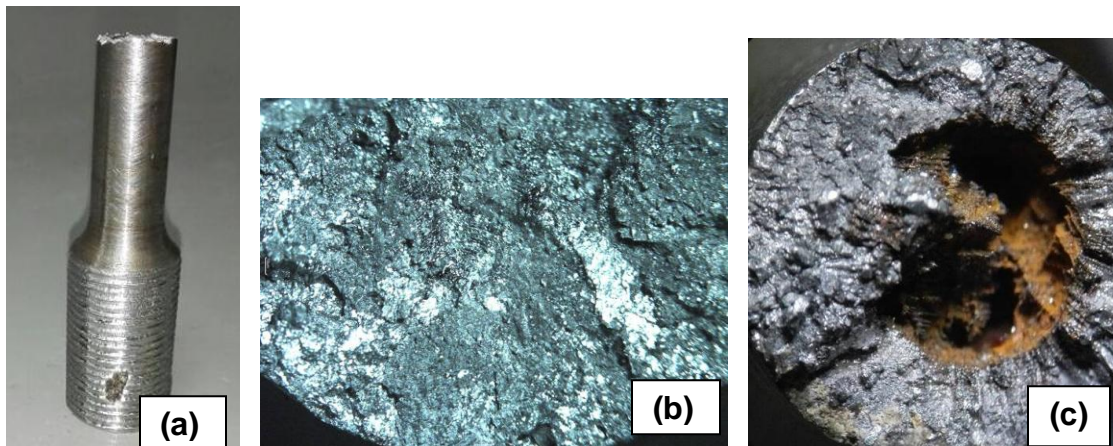


Figura 8. Morfología de fractura del acero modificado. (a) Macroscópicamente (b) Microscópicamente. (c) Defecto en la probeta 1.

4.2 TRATAMIENTO TÉRMICO

4.2.1 Recocido. En la Figura 9 (a) se observa la microestructura obtenida luego de realizar el recocido de homogenización al acero de colada. La microestructura corresponde a una matriz completamente ferrítica con presencia de perlita en los bordes de grano. Los valores de microdureza confirman la presencia de estos microconstituyentes dando 234,67Vc para ferrita y 270,51Vc para perlita. Se destaca que el tratamiento térmico de recocido logró la homogenización de la microestructura, eliminando la red de ferrita aleada observada en la muestra en estado de suministro.

4.2.2 Temple y revenido. En la Figura 9 (c) se observa la microestructura formada una vez templadas las piezas. Se observa que la red blanca que se había erradicado en el recocido volvió a aparecer luego de realizado el temple, sin embargo en el interior del grano se puede observar una martensita masiva y de buen aspecto. Así mismo en la Tabla 8 se presentan las durezas obtenidas luego del temple. Se concluye que este tratamiento térmico se realizó satisfactoriamente alcanzándose aproximadamente un 90% de martensita en la microestructura. Posteriormente se procedió a realizar el revenido, en la Figura 9 (e) se presenta la microestructura final, en la que se puede observar de igual manera la red blanca y una mezcla en el interior del grano de martensita y martensita revenida. En la Tabla 8 están los resultados de dureza obtenidos luego del revenido, los cuales son 4 puntos más bajos. Esta pérdida de dureza se compensa con la formación de la martensita revenida la cual es más fina y se encuentra mejor distribuida en toda la estructura del acero disminuyendo su fragilidad de este.

4.2.3 Comparación entre las piezas tratadas térmicamente con el acero AISI/SAE 4140 convencional. La microestructura y dureza alcanzada en los diferentes tratamientos térmicos aplicados en las probetas de acero de medio carbono modificado y AISI-SAE 4140 convencional cambiaron satisfactoriamente logrando homogeneidad en la estructura proporcionando una mejora en las propiedades del acero. Las Figuras 9 (b), (d) y (f) corresponden a los tratamientos térmicos efectuados sobre el acero AISI SAE 4140 convencional, se debe resaltar que para lograr una comparación con el acero de medio carbono modificado se le realizó un normalizado común en vez del recocido de homogenización ya que este acero no requería un tratamiento térmico de tanto tiempo.

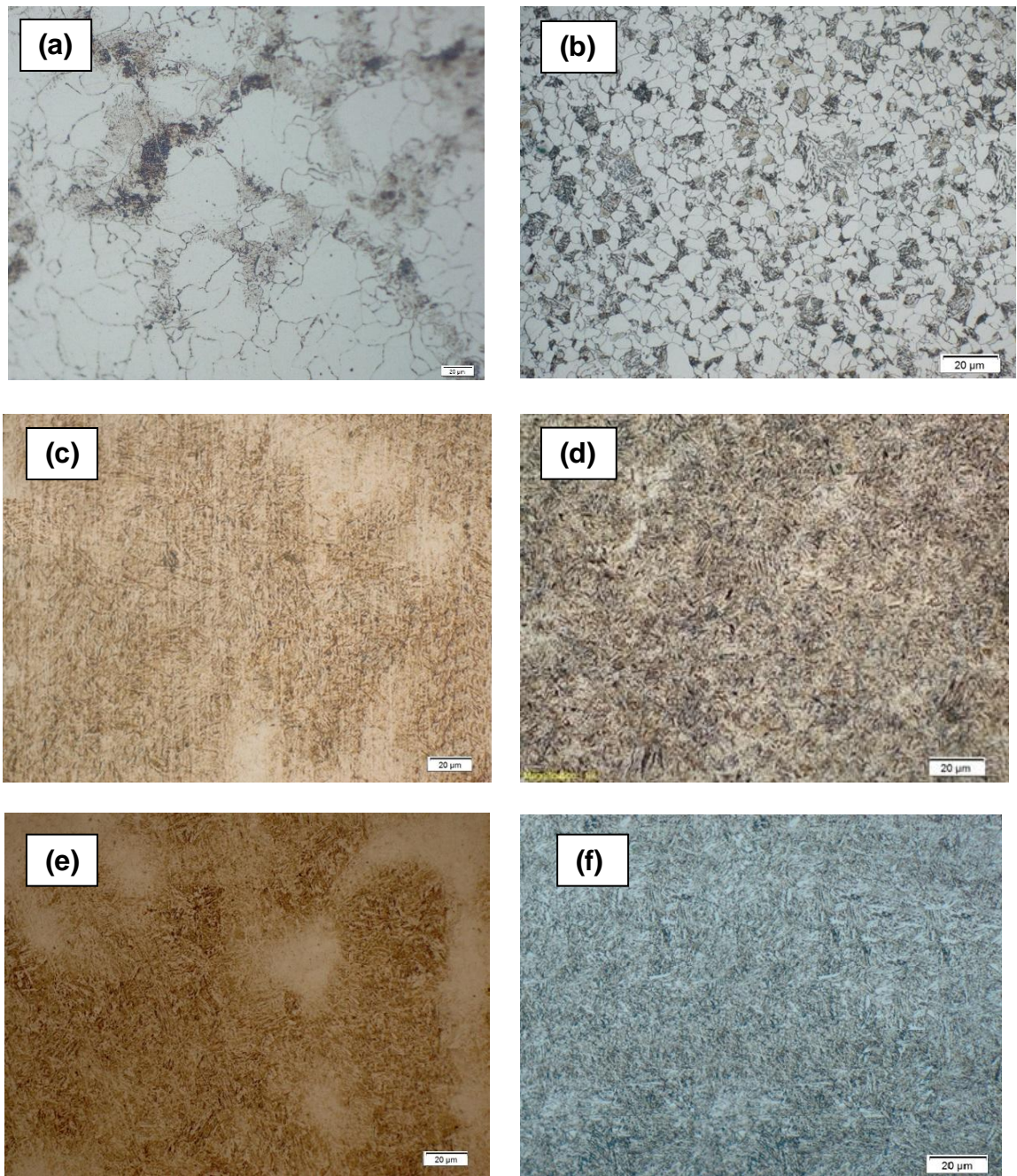


Figura 9. Micrografías ópticas a 500X del acero modificado con Cr y del acero AISI-SAE 4140 convencional tratados térmicamente y atacadas con nital por 20s. (a) Acero modificado recocido, (b) Acero convencional normalizado, (c) Acero modificado templado, (d) Acero convencional templado, (e) Acero modificado bonificado y (f) Acero convencional bonificado.

Respecto a la microestructura observada en los dos aceros es claro observar que el 4140 convencional tiene mayor formación de perlita en los tratamientos térmicos de homogenización microestructural. Se observa en las Figuras 9 (a) y (b) que a diferencia del acero modificado en estudio nuclea la perlita en los límites de grano de la ferrita mientras que el acero 4140 convencional forma granos a los largo de toda la microestructura. En las Figuras 9 (c) y (d) se observa una mejor distribución de martensita sobre toda la microestructura del acero 4140 convencional, sin la presencia de la red blanca que si vuelve a estar presente en el acero modificado en estudio, en las Figuras 9 (e) y (f) observamos una martensita revenida muy parecida para los dos aceros con la única diferencia que aún en el acero modificado en estudio sigue estando la red blanca. En cuanto a las durezas obtenidas se observa en la Tabla 8 que son muy semejantes y que sin duda son aceros que presentan templabilidades similares, lo que comprueba lo dicho en el análisis de templabilidad del acero de medio carbono modificado en estudio.

Tabla 8. Durezas obtenidas en los diferentes estados del acero modificado en estudio y el acero AISI-SAE 4140.

DUREZAS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS								
ACERO	AISI-SAE 4140 MODIFICADO				AISI-SAE 4140 CONVENCIONAL			
Tratamiento térmico	Sin T.t	Recocido	Temple	Revenido	Sin T.t	Normalizado	Temple	Revenido
Centro	40,0	23,0	53,0	49,0	34,0	30,0	54,0	50,0
Mitad radio	39,0	23,5	53,0	48,7	33,5	27,0	54,0	51,0
Extremo	42,0	24,0	54,0	50,0	33,0	30,0	55,0	51,5
Promedio	40,3	23,5	53,7	49,2	33,5	29,0	54,3	50,8

5. CONCLUSIONES

- El acero en estudio tiene 0,47% en peso de carbono y 2,97% en peso de cromo, presenta ferrita aleada con carburos y compuestos de cromo, ferrita Widmanstatten y martensita como principales microconstituyentes.
- Los bajos valores del esfuerzo máximo obtenidos durante el ensayo de tracción, pueden atribuirse a la presencia de porosidades y microsegregaciones generadas durante su proceso de colada.
- Se comprobó que el acero en estudio tiene una alta templabilidad.
- El acero en estudio respondió a los tratamientos térmicos propuestos (recocido, temple y revenido) logrando valores de dureza similares a los de un acero AISI-SAE 4140 convencional
- Las industrias metalmecánicas locales tienen la capacidad de fabricar aceros de medio carbono modificados con elementos aleantes con propiedades y características similares a aceros convencionales y de una forma más económica y asequible para la región y el país, dando una mano amiga para empleo de ingenieros metalúrgicos.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar los presentes estudios nuevamente con muestras que no contengan ningún tipo de defecto de colada para corroborar el efecto del cromo en el acero
- Revisar y controlar eficientemente el proceso de colada.
- Para la realización de los tratamientos térmicos se recomienda que los hornos de trabajo posean las condiciones óptimas de atmosfera controlada para evitar el fenómeno de descarburización de las piezas tratadas, si no es posible, entonces tener en cuenta este fenómeno que se presenta en la superficie a la hora de realizar la caracterización.
- Realizar estudios posteriores de propiedades mecánicas al acero tratado térmicamente para comparar su comportamiento con los resultados obtenidos sin tratamiento térmico.
- Realizar estudios posteriores a la red blanca que hemos denominado ferrita aleada ya que presenta una alta dureza y puede contener información interesante sobre el efecto que tendría este porcentaje en peso de cromo en aceros de medio carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **FERROCORTES S.A.S.** Acero AISI-SAE 4140 y 4340. [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/>
- [2] **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.** Aceros aleados. [En línea]: http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_aleados.htm
- [3] **ASKELAND, D.** Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. International Thomson, 1998.
- [4] **ASTM International.** American Society for Testing Materials. Sitio web: <https://www.astm.org/>
- [5] **ASTM International.** Norma ASTM A255-10 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [6] **ASTM International.** Norma ASTM A370-16 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [7] **ASTM International.** Norma ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- [8] **ASTM International.** Norma ASTM E45-05 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken: ASTM International, 2005.
- [9] **ASTM International.** Norma ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocke: ASTM International, 2013.
- [10] **MOLYBDENUM COMPANY.** Austenite transformation kinetics of ferrous alloys. I wrought constructional steels. CLIMAX.
- [11] **AMOEDO, Fernando Martín, et al.** Características del acero IRAM 4140. Conocimiento de materiales I. Facultad de ingeniería. Universidad de Buenos Aires. [En línea]:

<http://www.materias.fi.uba.ar/6713/Caracteristicas%20del%20acero%20IRAM%204140.pdf>

[12] **CARDONA G. Afranio.** Selección de aceros. Bucaramanga. Departamento de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, universidad industrial de Santander, 1988.

[13] **CHANG, Ye, et al.** "Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening". ActaMaterialia, 2011, Nro 59. Pp 1014-1025.

[14] **CÓRDOBA VALENCIA, Sheila.** Proceso de nitruración gaseosa de los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2003, Capítulo IV. Pp 2.

[15] **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID.** Efecto de pequeñas cantidades de otros elementos en los aceros. [Enlínea]: <http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/otros%20elementos.htm>

[16] **HARADA, Y, et al.** "Influence of Microshot Peening on Surface Layer Characteristics of Cold Tool Steel", Materials Science Forum, 2007, Nro 561-565, Pp 897-900.

[17] **KHANI SANIJ, M.H, et al.** "The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel". Materials and Design, 2012, Nro 42. Pp 339-346.

[18] **PARRA SUA, Johanna.** Evaluación de la resistencia a la corrosión a altas temperaturas y su comportamiento como barrera térmica de $\text{Bi}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Macatrónica. Tesis de maestría. 2014

[19] **PENN PLACE, William.** Isothermal transformation of austenite in a wide variety of steels. Pittsburg. United States Steel USS. Third edition. 1963.

- [20] **COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A.** SAE 4140 y 4340, aceros para ingeniería de alta resistencia. [En línea]: <http://www.cga.com.co/productos-y-servicios/productos/aceros-de-baja-aleacion>
- [21] **SENTHILKUMAR, D, et al.** "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel". Journal of Materials Processing Technology, 2011, Nro 211. Pp 396-401.
- [22] **RODRÍGUEZ, J.M, et al.** "Evaluación de Velocidades para la Deposición de FeSi y MoS₂ por Triboadhesión en Aceros SAE 4140 y AISI 304". En: Información Tecnológica, 2005, Volumen 16. Pp 21-28. [En línea]: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000300004
- [23] **UNIVERSIDAD DE OVIEDO.** Templabilidad y ensayo Jominy. [En línea]: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/EnsayoJominy.pdf>
- [24] **VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal.** Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.
- [25] **VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal.** Transformaciones de fase en metalurgia. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 1998.
- [26] **ZEHTAB YAZDI, A, et al.** "Prediction of hardness at different points of Jominy specimen using quench factor analysis method". Journal of materials processing technology, 2008, Nro 199. Pp 124-129.

BIBLIOGRAFÍA

AMOEDO, Fernando Martín, et al. Características del acero IRAM 4140. Conocimiento de materiales I. Facultad de ingeniería. Universidad de Buenos Aires. [En línea]:

<http://www.materias.fi.uba.ar/6713/Caracteristicas%20del%20acero%20IRAM%204140.pdf>

ASKELAND, D. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. International Thomson, 1998.

ASTM International. American Society for Testing Materials. Sitio web: <https://www.astm.org/>

ASTM International. Norma ASTM A255-10 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

ASTM International. Norma ASTM A370-16 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

ASTM International. Norma ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2011.

ASTM International. Norma ASTM E45-05 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken: ASTM International, 2005.

ASTM International. Norma ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocke: ASTM International, 2013.

CARDONA G. Afranio. Selección de aceros. Bucaramanga. Departamento de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, universidad industrial de Santander, 1988.

CHANG, Ye, et al. "Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening". Acta Materialia, 2011, Nro 59. Pp 1014-1025.

COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 4140 y 4340, aceros para ingeniería de alta resistencia. [En línea]: <http://www.cga.com.co/productos-y-servicios/productos/aceros-de-baja-aleacion>

CÓRDOBA VALENCIA, Sheila. Proceso de nitruración gaseosa de los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2003, Capítulo IV. Pp 2.

FERROCORTES S.A.S. Acero AISI-SAE 4140 y 4340. [En línea]: <http://www.ferrocortes.com.co/category/lineas/barras/>

HARADA, Y, et al. "Influence of Microshot Peening on Surface Layer Characteristics of Cold Tool Steel", Materials Science Forum, 2007, Nro 561-565, Pp 897-900.

KHANI SANIJ, M.H, et al. "The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel". Materials and Design, 2012, Nro 42. Pp 339-346.

MOLYBDENUM COMPANY. Austenite transformation kinetics of ferrous alloys. I wrought constructional steels. CLIMAX.

PARRA SUA, Johanna. Evaluación de la resistencia a la corrosión a altas temperaturas y su comportamiento como barrera térmica de $\text{Bi}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Macetrónica. Tesis de maestría. 2014

PENN PLACE, William. Isothermal transformation of austenite in a wide variety of steels. Pittsburg. United States Steel USS. Third edition. 1963.

RODRÍGUEZ, J.M, et al. "Evaluación de Velocidades para la Deposición de FeSi y MoS_2 por Triboadhesión en Aceros SAE 4140 y AISI 304". En: Información

Tecnológica, 2005, Volumen 16. Pp 21-28. [En línea]:
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000300004

SENTHILKUMAR, D, et al. “Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel”. Journal of Materials Processing Technology, 2011, Nro 211. Pp 396-401.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. Efecto de pequeñas cantidades de otros elementos en los aceros. [En línea]:
<http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/otros%20elementos.htm>

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Templabilidad y ensayo Jominy. [En línea]:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/EnsayoJominy.pdf>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Aceros aleados. [En línea]:
http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_aleados.htm

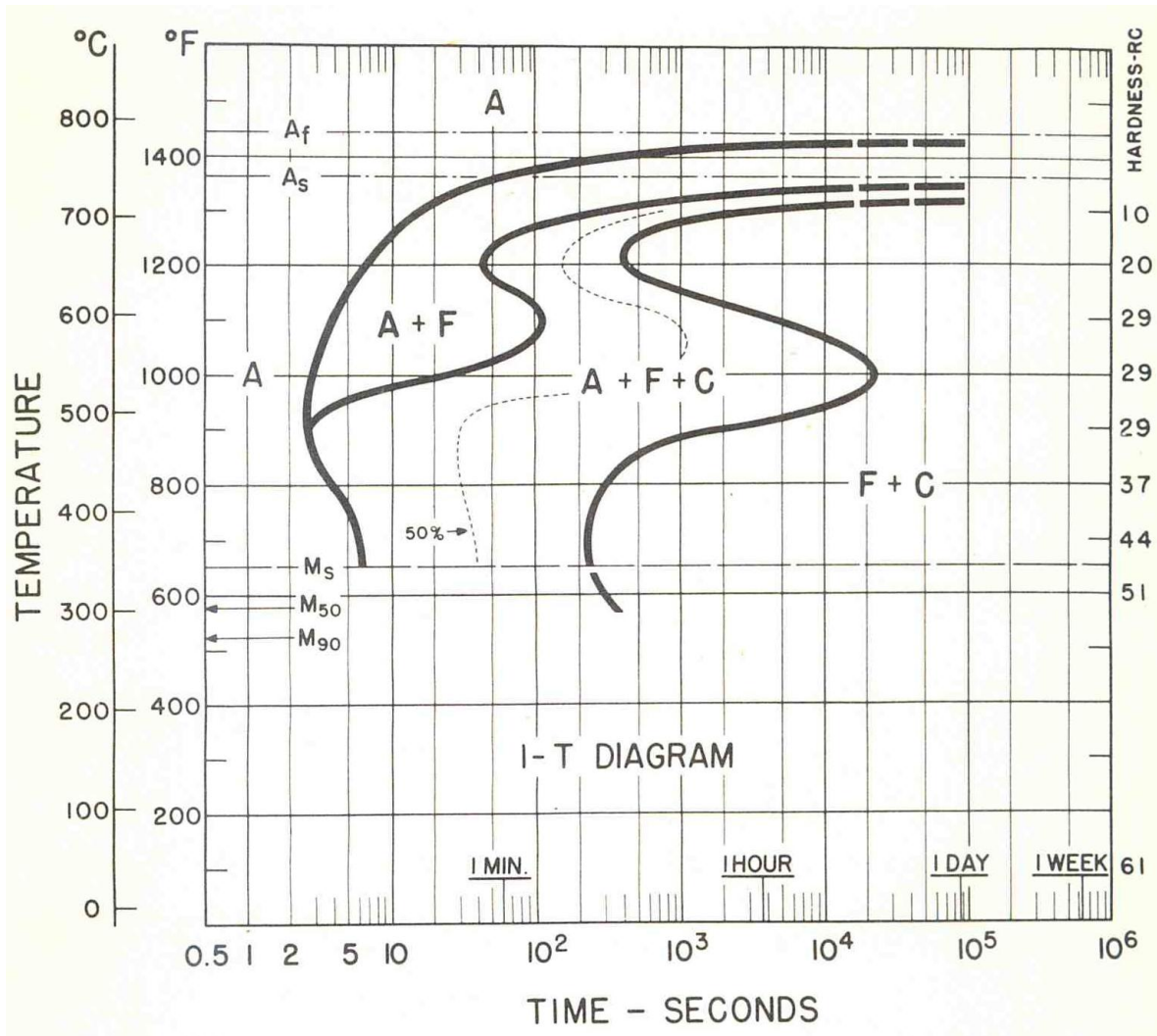
VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal. Transformaciones de fase en metalurgia. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 1998.

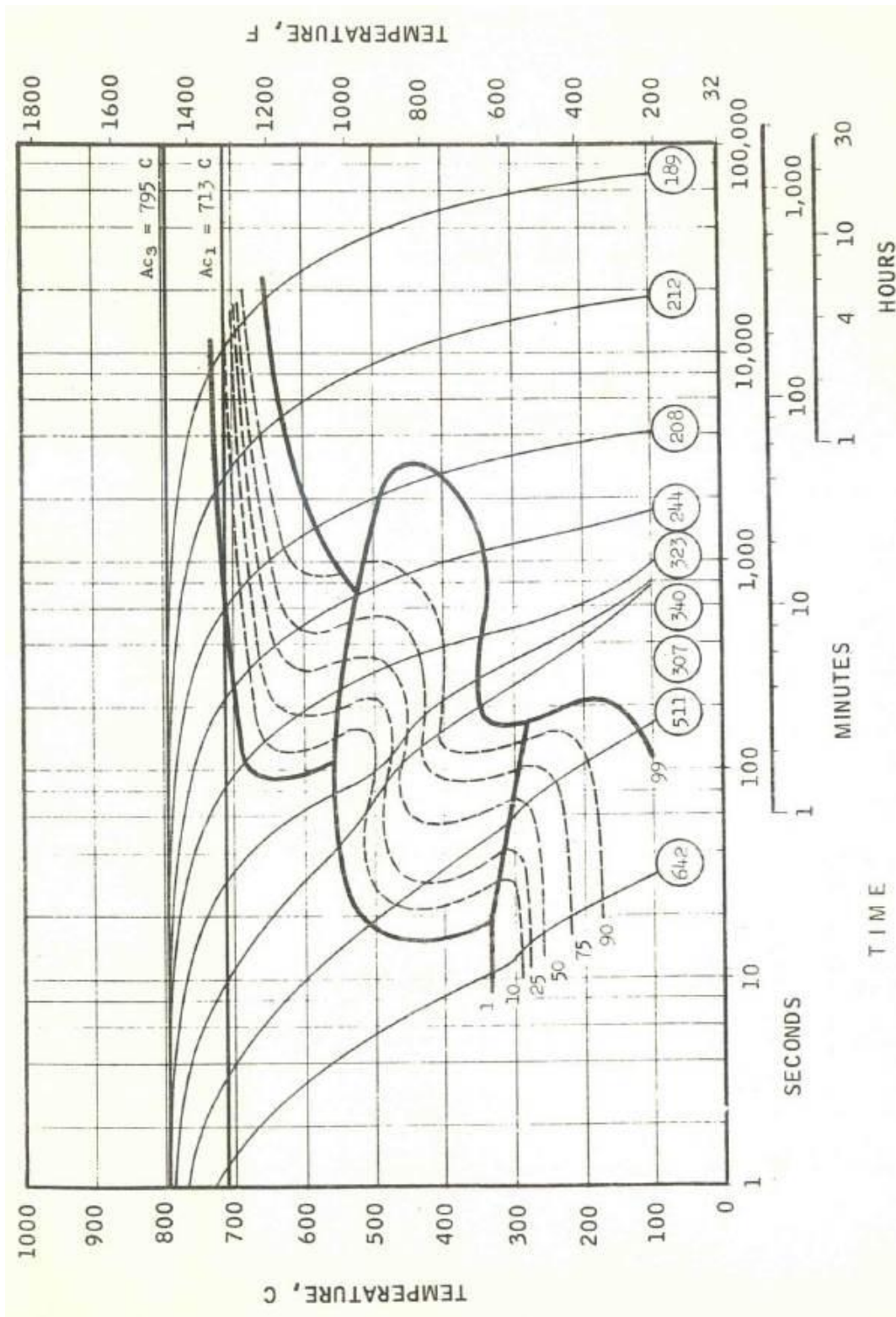
ZEHTAB YAZDI, A, et al. “Prediction of hardness at different points of Jominy specimen using quench factor analysis method”. Journal of materials processing technology, 2008, Nro 199. Pp 124-129.

ANEXOS

ANEXO A. Diagramas TTT y CCT del acero AISI-SAE 4140

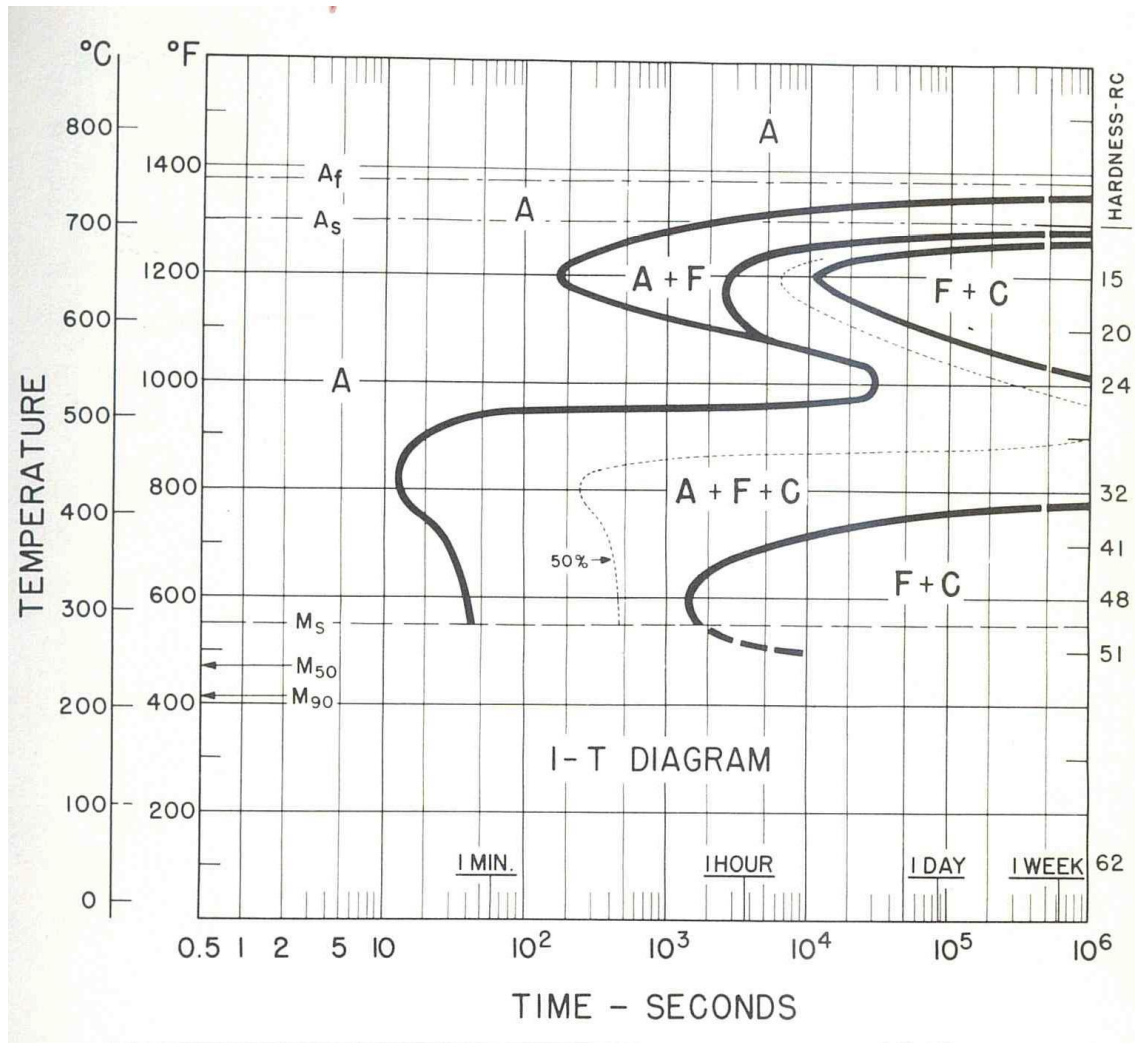


Fuente: Isothermal transformation of austenite in a wide variety of steels [18].

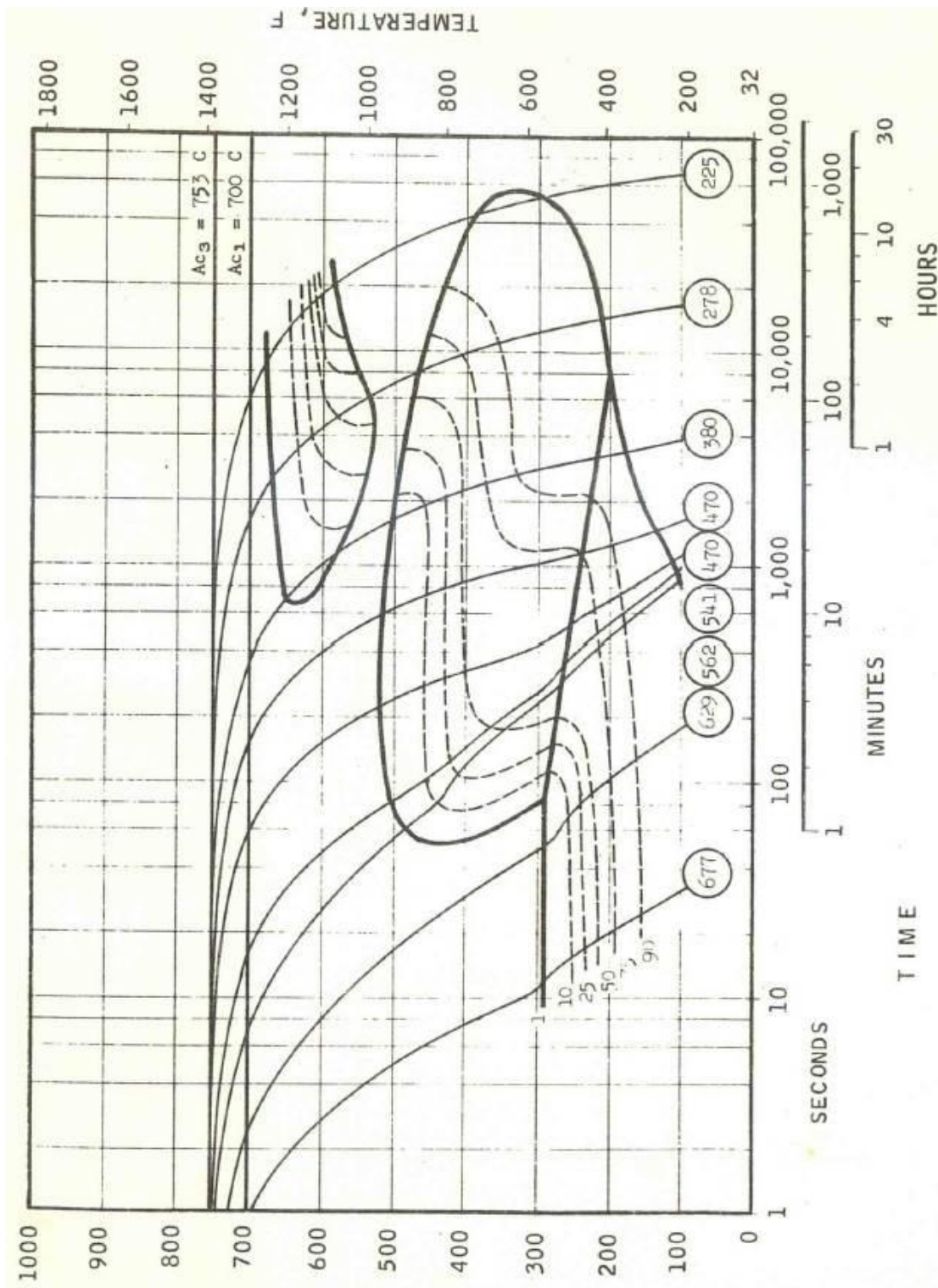


Fuente: Austenite transformation kinetics of ferrous alloys [10].

ANEXO B. Diagramas TTT y CCT del acero AISI-SAE 4340.



Fuente: Isothermal transformation of austenite in a wide variety of steels [18].



Fuente: Austenite transformation kinetics of ferrous alloys [10].