



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE QUÍMICA.

“Evaluación por dilatometría de un acero de ultra alta resistencia (UHSS) modificado con molibdeno (Mo)”

T E S I S.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRICA.

PRESENTA:

FERNANDA BARRIENTOS TAVERA.



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2023



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.



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 está 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

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Campillo Illanes Bernardo Fabián.

Vocal: M en M. Aramburo Pérez Gerardo.

Secretario: M en I. Reyes Chaparro Itzel.

1er Suplente: M en I. Sanjuan Sanjuan Gerardo.

2do Suplente: M en I. Ruíz Ramírez Agustín.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Facultad de Química, UNAM.

Edificio D, Laboratorio de posgrado.

Asesor del tema:

M en I. Itzel Reyes Chaparro.

Supervisor técnico:

Dr. Bernardo Fabián Campillo Illanes.

Sustentante:

Fernanda Barrientos Tavera.

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO.

Resumen	I
Introducción	II
Hipótesis	III
Objetivo	III
Objetivo general	III
Objetivos específicos	III
Capítulo 1. Marco Teórico.	
Aceros	1
Clasificación aceros	2
Acero AISI 4140.	2
Aceros AHSS/UHSS	3
Molibdeno	3
Dilatometría	4
Diagramas CCT	6
Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	6
Microdureza	7

Capítulo 2. Desarrollo experimental.

Corte de probetas de acero.	9
Caracterización microestructural de la muestra de llegada por Microscopía Óptica	11
Tamaño de grano.	12
Construcción de diagramas CCT a partir de la composición química experimental empleando el software JMat-Pro versión 6.0.	12
Ensayos de dilatometría.	13
Ensayo de microdureza	13

Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados

Pieza de llegada Acero 4140	14
Pieza de colada Acero 4140 modificada con Mo	17
Tratamiento termo-mecánico del Acero 4140 modificada con Mo	19
Diagrama CCT	21
Dilatometría	25
Caracterización microestructural	33
Microdureza	41

Capítulo 4. Conclusiones

Conclusiones	43
--------------------	----

Capítulo 5. Referencias

Referencias	44
-------------------	----

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Composición química acero 4140.

Tabla 2. Composición química Acero 4140 modificada con Molibdeno.

Tabla 3. Temperaturas y tiempos de fases esperados, de acuerdo con el diagrama CCT teórico.

Tabla 4. Temperaturas y tiempos de fases esperados, de acuerdo con el diagrama CCT experimental.

LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Representación esquemática del coeficiente de dilatación.

Figura 2. Descripción esquemática de un MEB.

Figura 3. (A) Acero de llegada 4140, (B) Pieza de colada Acero 4140 modificada con Molibdeno, (C) Acero 4140 modificado con Molibdeno, deformada mecánicamente, (D) Acero 4140 después del ensayo de dilatometría Pieza A y C, (E) Acero 4140 después del ensayo de dilatometría Pieza B y D.

Figura 4. (A) Acero de llegada 4140, en el MO 10X, (B) Imagen a detalle de la microestructura.

Figura 5. Imagen de colada Acero 4140 modificada con Molibdeno

Figura 6. (A) Acero 4140 modificado con Molibdeno, deformada mecánicamente, (B) Imagen a detalle de la microestructura.

Figura 7. Diagrama CCT teórico Acero 4140

Figura 8. Diagrama CCT teórico Acero 4140 modificado con Molibdeno.

Figura 9. (A) Curva rapidez de calentamiento a 1°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 1°C/min.

Figura 10. (A) Curva rapidez de calentamiento a 5°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 5°C/min.

Figura 11. (A) Curva rapidez de calentamiento a 15°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 15°C/min.

Figura 12. (A) Curva rapidez de calentamiento a 25°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 25°C/min.

Figura 13. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría, (A) Pieza A con microestructura de ferrita, perlita con bainita y carburos de Manganeso, (B) Imagen a detalle de la microestructura

Figura 14. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría. (A) Pieza B con microestructura de ferrita, perlita con bainita y carburos de Manganeso, (B) Imagen a detalle de la microestructura.

Figura 15. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría. (A) Pieza C con microestructura de perlita con bainita, (B) Imagen a detalle de la microestructura

Figura 16. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría. (A) Pieza D microestructura de perlita fragmentada, bainita y carburos de Manganeso, (B) Imagen a detalle de la microestructura

Figura 17. Resultados obtenidos del ensayo de microdureza.

LISTADO DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Coeficiente de dilatación.

Ecuación 2. Determinar dureza.

Resumen.

La industria manufacturera del acero y los avances tecnológicos en la elaboración de componentes para el transporte exige mayores requerimientos. En respuesta, se han desarrollado aceros de alta resistencia y aceros avanzados de alta resistencia (HSS y AHSS por sus siglas en inglés respectivamente), específicamente en la industria automotriz. En un intento por optimizar el peso de las piezas en la industria del acero, se desarrollaron nuevos aceros estructurales que abarcan una parte de los aceros AHSS con niveles de resistencia de entre 1380MPa y 2000MPa, y elongaciones de entre 5 a 30%, a estos aceros se les conoce como aceros de Ultra-Alta Resistencia (UHSS por sus siglas en inglés)

En este trabajo se contemplan cuatro diferentes rapidezces de enfriamiento (1, 5, 15 y 25°C/min) en un acero de medio carbono 4140 modificado con 0.935% en peso de molibdeno que, de acuerdo con el cambio dimensional y el análisis térmico diferencial de microestructuras, es utilizado para determinar los puntos críticos de una fase, ya sean de expansión o contracción, a través de la aplicación de la dilatación térmica.

Se realizaron los diagramas CCT teóricos a partir de la composición química teórica y experimental, y así poder evaluar las transformaciones de fase, que a través de realizar los ensayos dilatométricos durante el calentamiento continuo hasta una temperatura de austenización de 1050°C y, posteriormente mediante diferentes rapidezces de enfriamiento, conducen a generar más información acerca de la evolución microestructural del acero.

Posteriormente se realizó el análisis microestructural mediante Microscopía Óptica (MO) y finalmente un análisis más detallado en el Microscopio electrónico de barrido (MEB).

Después, con el ensayo de microdureza se compara el cambio que existe en las distintas fases o microconstituyentes que aparecen en la microestructura del acero modificado.

Introducción.

La industria manufacturera del acero, junto con los desarrollos tecnológicos, busca desarrollar aceros de alta resistencia y avanzados de alta resistencia (HSS y AHSS por sus siglas en inglés) para la industria automotriz. El acero 4140 cuenta con un contenido de aleantes como lo son: B, Mn, Mo y V, son los elementos aleantes principales.

El modificar un acero 4140 con molibdeno induce a la formación de la bainita, la formación de precipitados adicionalmente permitirá el análisis de las transformaciones de fases y de líneas intercríticas en el diagrama CCT teórico.

Para el análisis de las transformaciones de fases una de las técnicas utilizadas y eficaz para su estudio es el proceso de dilatometría de fases sólido-sólido, por medio de mediciones de expansión térmica bajo condiciones de enfriamiento y calentamiento continuo e isotérmico. Este proceso permite la evolución microestructural de una fase en términos del cambio dimensional de una probeta que es sometida a ciclos de temperatura.

En este trabajo se contemplan cuatro diferentes rapidezces de enfriamiento (1, 5, 15 y 25°C/min) en un acero 4140 modificado con 0.935%, en peso de molibdeno, que, mediante la dilatación térmica, se hace un seguimiento del cambio dimensional y la respuesta térmica diferencial de microestructuras, que además es utilizado para determinar los puntos críticos de una fase, ya sean de expansión o contracción.

Se realizaron los diagramas CCT teóricos a partir de la composición química experimental y mediante esto evaluar las transformaciones junto con los ensayos dilatométricos al realizar el calentamiento continuo hasta una temperatura de austenización de 1050°C y el enfriamiento a las diferentes rapidezces, lo cual se logra obtener una mayor información acerca de la evolución microestructural del acero.

Finalmente, con el ensayo de microdureza se evalúa la respuesta que existe en las distintas fases o microconstituyentes que aparecen en la microestructura del acero modificado.

Hipótesis.

Un acero 4140 aleado y modificado con 0.935% en peso de molibdeno, enfriado a distintas rapidezces (1,5,15 Y 25°C/min), a una temperatura de austenización (1050°C), se evalúa y se analiza a través de transformaciones de fases, precipitados y líneas intercríticas, para la simulación de los diagramas CCT teórico y experimental, además de las curvas dilatométricas.

Objetivo.

Objetivo general.

- Analizar y estudiar el comportamiento microestructural de un acero de ultra alta resistencia (UHSS) modificado con molibdeno y con diferentes rapidezces de enfriamiento por dilatometría.

Objetivos específicos.

- Analizar microestructuralmente las etapas de transformación (Llegada, colada, deformada mecánicamente y posterior a dilatometría) que se obtienen al modificar un acero 4140 con molibdeno.
- Estudiar las transformaciones de fase sólido-sólido, en condiciones de calentamiento y diferentes condiciones de enfriamiento continuo e isotérmico por la técnica de dilatometría.
- Determinar el efecto del Molibdeno en la construcción del diagrama CCT teórico (con y sin modificar) en las temperaturas de transformación de fases (Perlita, Bainita y Ferrita)
- Evaluar el efecto de las diferentes rapidezces de enfriamiento en la microdureza del acero 4140 modificado con Molibdeno.

Capítulo 1.

Marco Teórico.

Capítulo 1. Marco Teórico.

A continuación, se presenta, de manera general los temas relacionados para llevar a cabo el desarrollo y análisis del presente trabajo.

Aceros.

La etimología de la palabra **acero** nos lleva al latín *aciarium*, que proviene de *acies* (“**filo**”). Se utiliza para referirse a las armas **blancas** (como la espada) y al temple y corte de éstas. [1]

El acero es una aleación formada de hierro con una cantidad de carbono y otros elementos en menos proporción como lo son el molibdeno, níquel, aluminio, silicio, manganeso, cromo, etc., estos elementos alteran las propiedades del acero, obteniendo un material más resistente.

El acero es el material más importante en cualquier sector de la industria, es ampliamente usado como material de construcción y como materia prima de diversas herramientas y piezas mecánicas.

Dentro de las propiedades más importantes que presenta el acero son:

- Ductilidad
- Dureza
- Resistencia
- Maleabilidad
- Tenacidad

Estas propiedades dependerán de la composición química y del tratamiento al que es sometido el acero, entre estos tratamientos están: térmico, mecánico, termoquímico y superficial. [2]

Los aceros contienen elementos de aleación, la aleación se refiere a la adición de otros elementos, para lograr las propiedades mecánicas, físicas y químicas que son deseadas. Cada elemento de aleación tiene su propio efecto sobre las propiedades del acero. Los efectos combinados de los elementos aleantes y de los tratamientos térmicos producen diferencia tanto en la microestructura como en las propiedades. [3]

Una de las clasificaciones de los elementos de aleación es según su interacción con el carbón en el acero y se divide en dos categorías:

1. Elementos formadores de carburos: algunos ejemplos son Mn, Cr, Mo, V, Nb, Ti y Zr. En concentraciones altas forman carburos de aleación más estables.
2. Elementos no formadores de carburos: como Ni, Co, Cu, Si, P y Al, normalmente se encuentran disueltos en la matriz. [3]

Clasificación Aceros:

Existe una gran variedad en la forma de identificar y clasificar a los aceros, según normas SAE:

- Aceros al carbono.
 - Aceros de muy bajo % de carbono (desde SAE 1005 a 1015)
 - Aceros de bajo % de carbono (desde SAE 1016 a 1030)
 - Aceros de medio % de carbono (desde SAE 1035 a 1053)
 - Aceros de alto % de carbono (desde SAE 1055 a 1095)
- Aceros de media aleación.
- Aceros aleados.
- Aceros inoxidables.
 - Austeníticos.
 - Martensíticos.
 - Ferríticos.
- Aceros de alta resistencia.
- Aceros de herramientas. [4]

Acero AISI 4140

Existen diferentes tipos de clasificaciones para los aceros, algunos pueden ser aceros al carbón, aceros baja aleación, aceros inoxidables y aceros para aplicaciones especiales. En cuanto a su clasificación por cantidad de carbono, pueden ser bajo carbono ($\%C < 0.20$), medio carbono ($0.20 < \%C < 0.60$) y alto carbono ($\%C > 0.60$). [5]

La composición química del acero AISI 4140 sin ser modificado se muestra en la **tabla 1**. Se le considera como un acero aleado grado maquinaria. Al aumentar el contenido

de cromo y/o molibdeno incrementará la resistencia a la tensión, templabilidad, tenacidad y resistencia al desgaste.

Aceros AHSS/UHSS.

Los aceros de ultra alta resistencia (UHSS) o AHSS por sus siglas en inglés (Advanced High Strength Steels), son aceros que se caracterizan por su alta rigidez, absorción de grandes energías y su alta capacidad para no deformarse, se han desarrollado especialmente para la industria automotriz, pero también se le dan usos para infraestructura, transporte ferroviario, energía, construcción naval y aeroespacial. El uso más común es donde se requiere una elevada capacidad de absorber energía, sin deformación de la pieza. [6]

Surge una clasificación “atípica” debido a cualquier acero que este dentro del rango de resistencia se considera UHSS, en esta nueva clasificación se incluyen diferentes familias de aceros como: los de medio C, entre otros. Este tipo de acero se produce a partir de una velocidad de enfriamiento controlada, debido a la formación de ferrita y de austenita. Los aceros atípicos como el 4140 cuentan con elementos aleantes como: B, Mn, Mo, V, por mencionar algunos, por lo que su composición es variable. [7][8]

Molibdeno.

Su nombre proviene del griego “*Molybdos*” que quiere decir “*parecidos al plomo*” y hace su referencia al gris oscuro, este elemento fue identificado en el siglo XVIII, paso un siglo antes de que fueran conocidas sus propiedades en el uso de aleaciones de acero. La molibdenita (MoS_2), es el mineral más abundante que contiene molibdeno, en 1782 Peter Jacob Hjelm por sugerencia de Carl Wilhelm Scheele redujo químicamente el óxido con carbono de la molibdenita y obtuvo un polvo de metal oscuro que llamo “*Molibdeno*”. [8]

Este elemento se utiliza en aleaciones de alta resistencia, que soportan altas temperaturas y una buena resistencia a la corrosión, formando parte de aleaciones que se utilizan para la industria automotriz, construcción, agricultura e incluso en la medicina, en la industria petrolera como catalizador para la eliminación de azufre y en la elaboración de distintos pigmentos para pinturas, tintes, plásticos y algunas aplicaciones electrónicas.[9]. Tiene una de las temperaturas de fusión más elevadas que todos los elementos de 2623°C , al igual que es uno de los metales con menor coeficiente de expansión térmica que favorecerá para la dilatometría. Tiene dos tipos de usos: primarios y finales, en el primario se utiliza principalmente en la industria metalúrgica, los finales son para la producción en las industrias petroleras, química, automotriz y aeronáutica. [8]

El molibdeno es el principal elemento de aleación añadido para mejorar la resistencia al ataque de los cloruros, también proporciona endurecimiento por dispersión y endurecimiento por solución sólida a alta temperatura a través de su influencia sobre los carburos presentes. Las aleaciones de molibdeno también se verán afectadas por el porcentaje de níquel para así lograr minimizar la formación de fase sigma. [3]

Al modificar el porcentaje de molibdeno en el acero 4140 aumentándolo del 0.15-0.25 al 0.935 poseerá un efecto en la microestructura, en los tratamientos térmicos, propiedades químicas y físicas.

Dilatometría

La prueba dilatométrica (DMT por sus siglas en inglés) fue desarrollada en Italia e inducida en Europa y América del Norte. Se lleva a cabo con el uso de un dilatómetro mediante mediciones de la expansión térmica o bien la expansión relativa de un material con respecto a diferentes temperaturas, estas mediciones ayudan a encontrar el coeficiente de contracción o de dilatación, en este caso se le realizara este método a un acero SAE 4140 modificado con Molibdeno denominado como un acero de ultra alta resistencia, es una de las técnicas de análisis térmico más utilizadas para las transformaciones de fase sólido-sólido, estas transformaciones de fase involucran a su vez cambios en el arreglo atómico en la estructura cristalina, lo que origina cambios positivos de expansión o negativos de contracción, esto denominado como dilatación térmica. [10]

El dilatómetro opera sobre el principio con valores de verificación por medio del uso de desplazamientos de los sensores inductivos, es principalmente utilizado para el control de calidad en materiales y en producción. Con esto se mide el desplazamiento de la probeta mediante actuadores que están conectados a una barra conocida como pistón, el pistón se somete al mismo tiempo que la probeta al ciclo térmico establecido, esto origina una sobrestimación de la dilatación térmica del material, por eso es necesario determinar la contribución del pistón a través de una prueba de corrección, para eliminar el efecto del pistón y así obtener los datos reales de dilatometría, que posteriormente serán ocupados para realizar la curva dilatométrica. [10][11]

Se debe realizar el cálculo del coeficiente de dilatación que se muestra en la **Ecuación y Figura 1**, porque las probetas al ser expuestas a altas temperaturas comienzan a ganar energía térmica, la distancia que existen entre los átomos incrementa y las dimensiones que tiene el material cambian, este cambio por unidad de longitud es expresado por la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{l_f - l_o}{l_o(T_f - T_o)} \quad \dots \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

T_o: Temperatura inicial

T_f: Temperatura final

l_o: Longitud inicial

l_f: Longitud final [10]

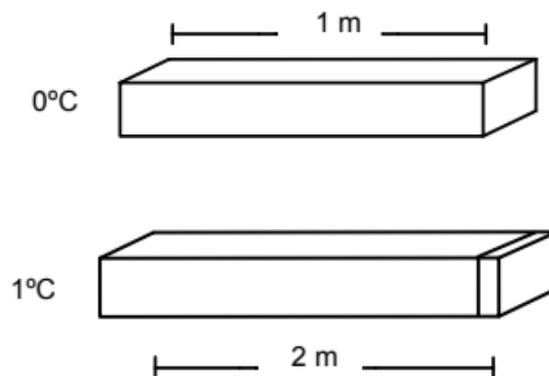


Figura 1. Representación esquemática del fenómeno de dilatación.

Los datos obtenidos por dilatometría sirven para construir las curvas por dilatación vs temperatura, conocidos como curvas dilatométricas, las cuales permitirán analizar los cambios de volumen asociados a las transformaciones de fase, determinar coeficiente de expansión térmica lineal con una fase, así como las temperaturas críticas del inicio y final de la transformación. [11]

Para las curvas Dilatométricas se emplea el criterio de la primera deriva de dilatación con respecto a la temperatura, para identificar los puntos máximos y mínimos de la curva, que revelan las temperaturas de inicio y fin de la transformación de las fases.[12]

Diagramas CCT.

Los diagramas CCT (Continuos Cooling Transformation) es una forma visual para determinar la microestructura y dureza de un acero, inmediatamente de un proceso de enfriamiento continuo desde temperaturas austeníticas, que acceden a determinar que fases fueron formadas, regiones de estabilidad de fases y porcentajes en los que se encuentran. [11]

Se realizan los ensayos de dilatometría para la caracterización de estos diagramas, tras conseguir la condición de la austenita esperada se realizan enfriamientos a diferentes velocidades que dan parte a microestructuras finales variadas. [12]

Para revelar el tamaño de grano se necesita realizar un proceso de tratamiento térmico de temple con una oxidación superficial que involucra, tres etapas significativas: velocidad de calentamiento, tiempo de permanencia en la temperatura de austenizado y la velocidad de enfriamiento. En la segunda es donde se determina el tamaño de grano. [13]

Para la realización de los diagramas de transformación con enfriamiento continuo (CCT), se utilizó el software JMatPro versión 6.0 que simula con exactitud, las temperaturas y porcentajes de transformación de los microconstituyentes de acuerdo con la composición química del material.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

En la década de 1920 diversos descubrimientos comprobaron que un haz de electrones acelerados en el vacío, además de recorrer trayectorias rectas, se comportaba también como una onda similar a la luz visible caracterizada por una longitud de onda 100.000 veces más pequeña. Se encontró que el comportamiento de los electrones frente a campos eléctricos y magnéticos era similar al de la luz visible en espejos y lentes. Precisamente, un haz de electrones acelerados por un alto potencial eléctrico (25.000 Voltios) constituye la fuente de radiación de un microscopio electrónico de barrido (SEM por Scanning Electron Microscope **Figura 2**). [14]

Todos los microscopios electrónicos de barrido constan de un cañón electrónico en una columna de alto vacío, del orden de 10⁻⁵ mm de Hg, en la cual se genera un haz de electrones de alta energía (5 - 30 kV).[14]

Se pueden obtener así imágenes de todo tipo de materiales estructurales o de material biológico con un mínimo de preparación previa y así observar directamente todo tipo de superficies con una gran profundidad de foco.[14]

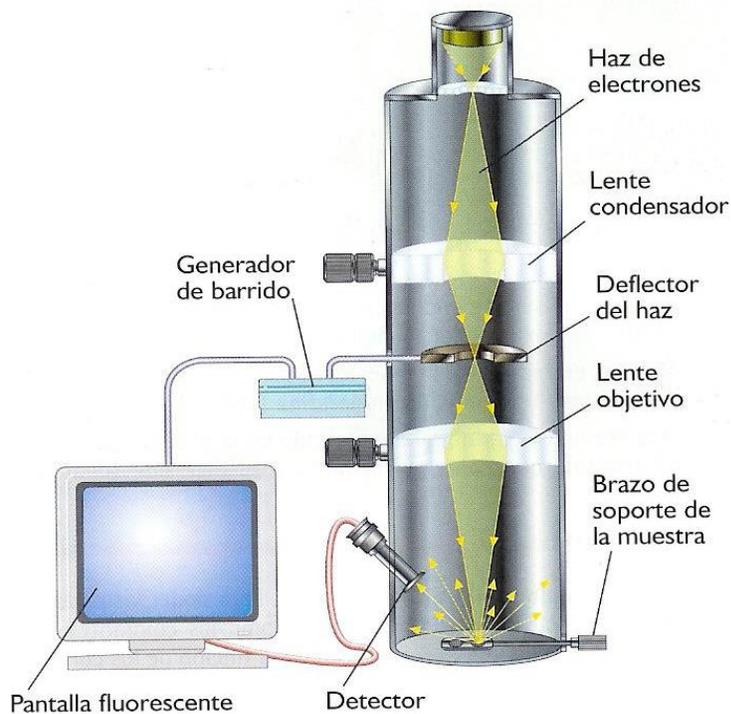


Figura 2. Descripción esquemática de un MEB.

Microdureza.

Este ensayo consiste en generar una huella muy pequeña utilizando un indentador piramidal de diamante, se aplican cargas muy pequeñas, siendo un ensayo de precisión. Para este tipo de ensayos, la carga que se aplica varía entre 1 y 1000 gr los números de microdureza Vickers expresan en términos de carga y área de impresión. [15]

Como resultado de la forma del indentador, la impresión de la huella en la superficie de la muestra será un cuadrado, la longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado por un micrómetro ocular.

El número de dureza se puede terminar por la ecuación:

$$VHN = \frac{1.8544(P)}{d^2} \dots \text{Ec. 2}$$

Donde:

P: Carga utilizada en el ensayo

d1: Diagonal al cuadro de la marca generada [13]

La dureza Vickers (HV), se considera como una dureza plástica, ya que se ha determinado a partir de la huella permanente o residual, es decir sobre una deformación plástica, obtenida en la superficie del material después de la penetración. [16]

Se ha encontrado que las pruebas de dureza son muy útiles para la evaluación de materiales, el control de calidad de los procesos de fabricación y los esfuerzos de investigación y desarrollo. [17]

Las pruebas de microindentación se utilizan para evaluar y cuantificar las variaciones de dureza que ocurren en una pequeña distancia permiten probar la dureza de fases o constituyentes específicos y regiones o gradientes demasiado pequeños para su evaluación mediante pruebas de microindentación. [18]

Capítulo 2.

Desarrollo experimental.

Capítulo 2. Desarrollo experimental.

En el siguiente capítulo se describe, de manera general el desarrollo de las técnicas experimentales empleadas en el presente trabajo.

I. Corte y preparación de las probetas de acero en las diferentes etapas.

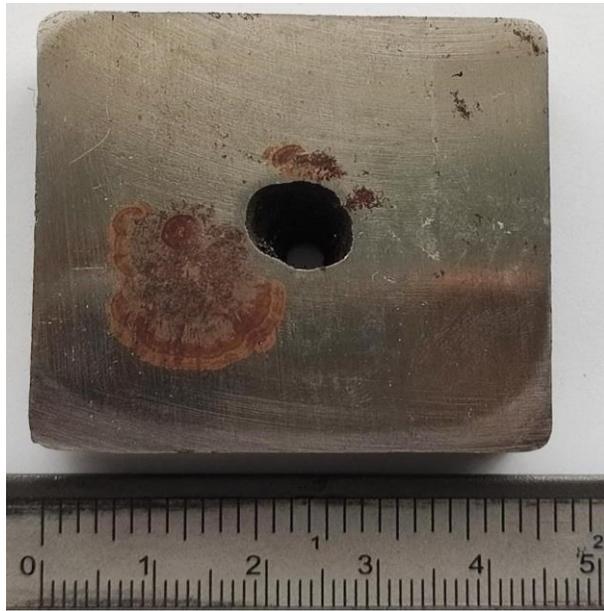
Se realizó el corte con disco abrasivo, ya que la superficie resultante es suave y el corte se realiza rápidamente. Los discos de corte están formados por granos abrasivos el carburo de silicio o el óxido de aluminio, para corte húmedo que fue el que se efectuó.

En la **Figura 3** se muestran las piezas y probetas de: (**Figura 3A**) Acero de llegada 4140 sin modificar, se parte de una barra redonda y se cortan tochos de 2.5x2 cm, para realizar la refusión del acero y obtener lingotes de 5x5x20 cm. Después de la refusión se corta una probeta de 4.5x5.5 cm (**Figura 3B**).

Posteriormente, se realizó un termo-mecánico para romper la estructura dendrítica (**Figura 3C**), partiendo de estas muestras se maquinaron probetas cilíndricas con una relación 1:3, diámetro-longitud, respectivamente, pieza A y C de 0.5x1 cm (**Figura 3D**) por último las Piezas B y D. 0.3x1 cm de (**Figura 3E**).



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)

Figura 3. (A) Acero de llegada 4140, (B) Pieza de colada Acero 4140 modificada con Molibdeno, (C) Acero 4140 modificado con Molibdeno, deformada en caliente, (D) Acero 4140 después del ensayo de dilatación Pieza A y C, (E) Acero 4140 después del ensayo de dilatación Pieza B y D.

II. Caracterización metalográfica por Microscopía Óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

a) Desbaste

El desbaste tiene como finalidad, preparar la pieza para llevarla a pulido y obtener una superficie plana. Consta de tres etapas:

- **Desbaste burdo**
Se realiza de forma manual, con una lija de banda de grano 60, esto con finalidad de tener una cara totalmente plana y libre de rebabas de la misma pieza. No se debe ejercer presión excesiva sobre la pieza, ya que puede causar rayas muy profundas, que posteriormente serán difíciles de eliminar.
- **Desbaste intermedio**
Se utiliza papel abrasivo (lijas de mineral de óxido de aluminio), colocándolo en una superficie limpia y plana, comprimiendo suavemente con dirección (a 0 y 90°) y movimiento constante, esto con objetivo de disminuyendo la profundidad de las rayas. Se debe ir usando una lija cada vez más fina, con la siguiente secuencia de las lijas: 240, 320, 400 y 600. Utilizando como lubricante agua. Entre lija y lija, deben quedar las rayas en una sola dirección.
- **Desbaste final**
Este desbaste se realiza igual que el anterior a diferenciar que las lijas a usar son 1000, 1200, 1500 y 2000, se realiza hasta eliminar por completo las rayas de las lijas anteriores.

Cada una de las etapas se debe realizar cuidadosamente para obtener una superficie libre de rayas.

b) Pulido

El pulido tiene como objetivo eliminar de la superficie las rayas finas producidas por la última fase de desbaste y así conseguir una superficie sin rayas.

Se utilizaron dos tipos de pulido, para llegar a terminado tipo espejo:

- **Pulido grueso**

Se realiza en una superficie plana con paño de billar (tela de lana), este debe estar perfectamente limpio y se ocupa alúmina (óxido de aluminio) como abrasivo para el pulido en los dos tipos de pulidos que se ocuparon, en el caso pulido grueso con alúmina de una 1 micra.

- Pulido fino

Este se realiza en paño especial para pulir manualmente, se le aplica presión moderada y se mueve con sentido a las manecillas de reloj y posteriormente en sentido contrario, eso para evitar colas de cometa, este se realiza con alúmina 0.5 micras.

Al final de cada pulido es muy importante realizar una limpieza, tanto manual como ultrasónica con alcohol, esto para impedir y proteger de la oxidación.

- c) Ataque químico

Como siguiente paso fue realizar el ataque químico con Nital 2 a las piezas a tratar, esto se realizó colocando reactivo en toda la superficie del metal hasta que su coloración cambie. Esto es necesario para hacer visible la microestructura.

- d) Análisis microscópico

Posteriormente del ataque y ya la pieza, se analizaron las muestras para definir sus fases en el Microscopio Óptico (MO) y finalmente en el Microscopio electrónico de barrido (MEB).

En el MO se tomaron diversas fotografías con diferentes aumentos, en el MEB se tomaron las fotografías para realizar un análisis más detallado con mayores magnificaciones.

- e) Análisis de imagen por el Software Dino Capture 2.0 e ImagePro-Plus.

III. Tamaño de grano

Para determinar el tamaño de grano austenítico se debe tener la muestra pulida, posteriormente se ingresa a la mufla a 900°C con un flujo constante de oxígeno durante una hora y media, posteriormente se realiza un temple en agua y volver a pulir, se observa sin ataque en el microscopio óptico a un aumento de 10X según la norma ASTM-E112 [19], para realizar la medición del tamaño de grano.

IV. Construcción de diagramas CCT a partir de la composición química experimental empleando el software JMat-Pro versión 6.0

Para llegar a la construcción del diagrama teórico se tomó en cuenta la composición química teórica y el tamaño de grano austenítico que marca el programa. Para el diagrama CCT experimental, se realiza con la composición química experimental y el tamaño de grano austenítico experimental.

V. Ensayos de dilatometría.

Se maquinaron probetas cilíndricas con una relación 1:3, diámetro-longitud, respectivamente. Para este ensayo, la superficie de contacto de cada probeta fue preparada mediante un desbaste mecánico con lijas de carburo de silicio (SiC) de grado 400 a 2000. Posteriormente se pulió de forma manual empleando alúmina de 1 mm. y suspensión de alúmina de 0.5 μm como abrasivo en un paño MicroCloth™, previo al ensayo dilatométrico se realizó limpieza a cada probeta.

Se establecieron ciclos térmicos, los cuales fueron realizados en un dilatómetro vertical L75 V (Linseis, Alemania), el cual está implementado con un transductor electromecánico LVDT (Linear Variable Differential Transducer), con una resolución de 0.125 μm y una exactitud de 1% sobre la escala real.

Ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento.

Con el objetivo de estudiar las transformaciones de fase en la aleación experimental, mediante el análisis térmico por dilatometría diferencial se realizaron ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento.

Se estableció una temperatura de austenización (T_γ) a 1050°C como un parámetro fundamental en el ciclo térmico de calentamiento y los ciclos térmicos de enfriamiento. Cada probeta fue precalentada hasta 35°C, a una rapidez de 5°C/min, posteriormente se calentó hasta la T_γ con una rapidez de 20°C/min, con un tiempo de permanencia de 35 min.

Los ciclos térmicos de enfriamiento consistieron en enfriamientos variables, a partir de la T_γ se aplicó una rapidez de enfriamiento de 1, 5, 15 y 25°C/min a una temperatura de 50°C para el acero UHSS 4140- Mo.

A partir de los resultados obtenidos por dilatometría se realizaron las Curvas Dilatométricas y se analizaron los datos por dos métodos, Criterio de la primera Derivada y por el Método de Regresión Lineal, para determinar las temperaturas críticas de transformación.

VI. Ensayo de microdureza.

Se realizó el ensayo en un HV Micro Hardness Tester de marca Shimadzu con una carga de 980 N (1Kg), se efectuó el ensayo en las piezas de llegada, dilatometría A, B, C y D con ataque, de forma transversal a una distancia de 1 mm entre cada toma hasta formar un perfil de durezas.

Capítulo 3.

Resultados y análisis de resultados.

Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, mediante el procedimiento experimental descrito en el capítulo anterior; el análisis se divide en la caracterización microestructural en cada una de sus etapas (Llegada, colada, termo-mecánico y dilatometría), también el estudio de diagramas CCT (Teórico y experimental) por simulación con el software J-MatPro 6.0, obteniendo un valor aproximado de microdureza que se compara con la microdureza experimental, posterior a la técnica de dilatometría.

Pieza de Llegada Acero 4140.

En la **Tabla 1**, se muestra la composición química teórica del acero 4140, donde sus principales elementos de aleación, además de hierro y carbón, son cromo, manganeso y molibdeno, que son elementos formadores de carburos de aleación más estables. Estos elementos excepto el manganeso son elementos alfégenos, que estabilizan la estructura ferrítica, aumentando la región alfa. El manganeso por su parte es un elemento gammágeno, que estabilizan la estructura austenítica. El silicio y el fósforo a pesar de ser de los componentes mas abundantes no son formadores de carburos y normalmente se encuentran disueltos en la matriz.

Tabla 1. Composición química teórica acero 4140. [20]

Elemento	C (Carbón)	Mn (Manganeso)	P (Fósforo)	S (Azufre)	Si (Silicio)	Cr (Cromo)	Mo (Molibdeno)
%	0.39- 0.43	0.75-1	0.035	0.040	0.15- 0.35	0.8-1.1	0.15-0.25

La **Figura 4-A**), corresponde a la muestra de llegada sin modificar analizada por microscopía óptica, la microestructura revelada está compuesta por tres fases; ferrita, bainita y martensita. La ferrita (Círculo rosa) se encuentra con una tonalidad clara en forma de granos aciculares (F.A) y algunos equiaxiales (F.E).

La bainita originalmente se obtiene ya sea como bainita superior o inferior, depende fundamentalmente de sus temperaturas de formación. Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de bainita, siendo la superior la que se forma en temperaturas entre los 350 y 550°C. La bainita inferior se forma en la transformación isoterma de la austenita, en un rango de temperaturas de 250 °C a 550 °C con morfología principalmente en forma de agujas.

La martensita se encuentra con morfología de agujas, no obstante, esta se puede confundir o traslapar con la bainita por su forma, la martensita que aparece se trata de una martensita revenida, en una transición a transformarse a bainitas.

Estas dos fases anteriores, por Microscopia óptica (**Figura 4-A**) se pueden confundir por lo que se observa a mayor detalle en la **Figura 4-B**) obtenida por MEB a 1500 aumentos, donde se observa principalmente bainita (Círculo azul) y martensita (Círculo naranja) en forma de placas que consiste en “maclas” debido a su alineación entre ellas. Estas transformaciones son resultado de lo que ocurre durante el proceso de fabricación de la barra redonda que consiste en un temple y partición, de acuerdo con este tratamiento posiblemente exista presencia de austenita retenida, sin embargo, se necesitaría un ataque selectivo para observar la presencia de esta fase.

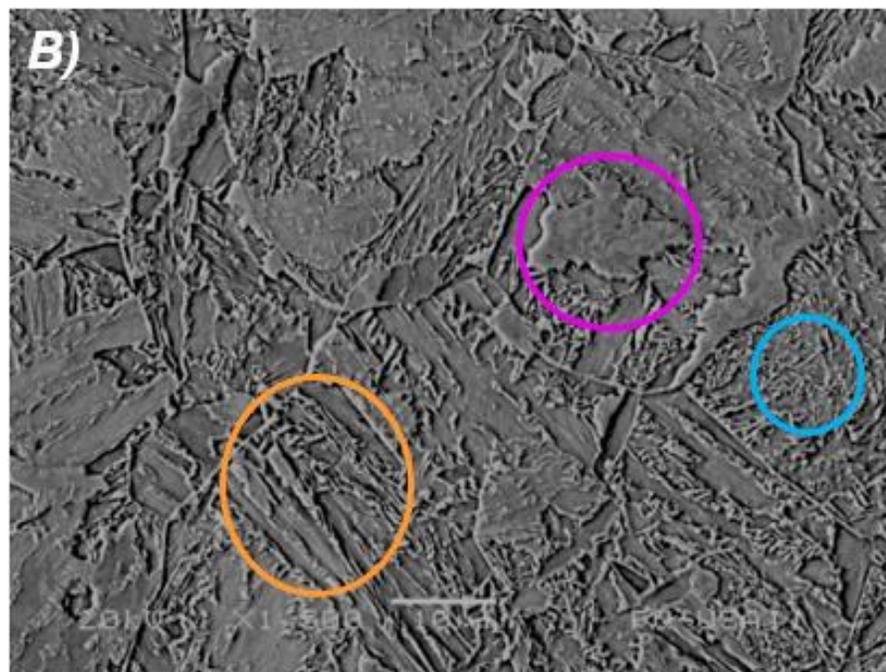
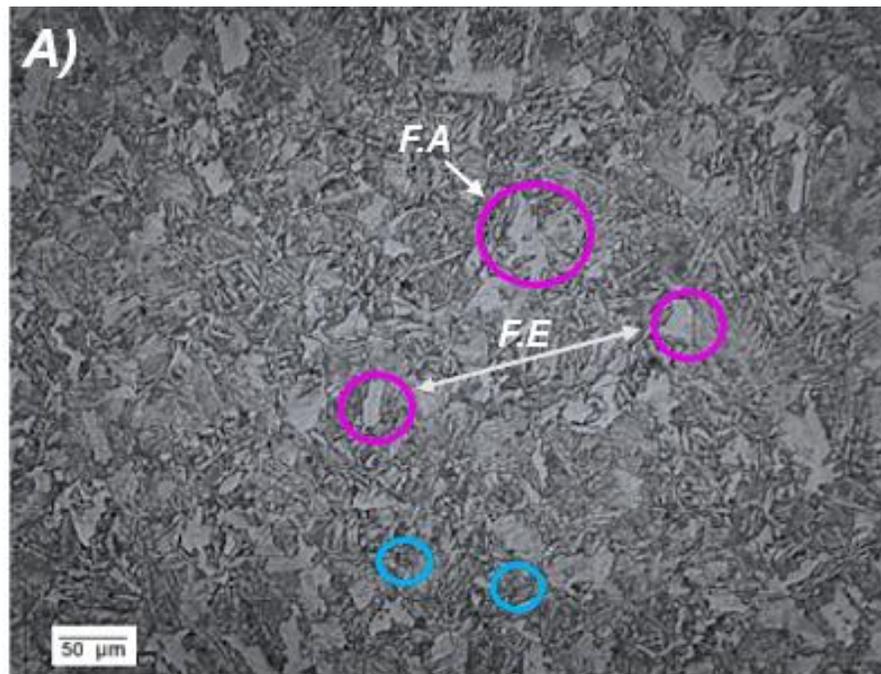


Figura 4. (A) Acero de llegada 4140, en el MO 10X, (B) Imagen a detalle de la microestructura.

■ Ferrita. **■ Bainita.** **■ Martensita.**

Pieza de colada Acero 4140 modificada con Mo.

Al modificar el acero 4140 con Mo, como se observa en la **Tabla 2** y en comparación con la composición química teórica (**Tabla 1**), el Mo alcanza un porcentaje en peso de 0.935%, en cuanto a los demás elementos aleantes hay que considerar los siguientes elementos: manganeso, vanadio, niobio y titanio, ya que su presencia junto con el nitrógeno presente es suficiente para influir en la microestructura que se genera durante su procesamiento ya que son formadores de compuestos, precipitados e inclusiones.

Al tener un alto contenido de molibdeno, cromo y wolframio se disminuye la zona de la fase austenítica, ampliando la zona de la ferrita, a estos elementos se les llaman elementos alfégenos o elementos estabilizadores de ferrita. El silicio se complementa con el manganeso evitando la aparición de poros y rechupes.

Tabla 2. Composición química del acero experimental 4140 modificada con Mo.

Elemento	%	Elemento	%
Fe (Hierro)	96.17	W (Wolframio)	0.028
Mo (Molibdeno)	0.935	N (Nitrógeno)	0.0158
Mn (Manganeso)	0.889	Sn (Estaño)	0.015
Cr (Cromo)	0.726	Co (Cobalto)	0.0098
C (Carbón)	0.319	As (Arsénico)	0.0089
Cu (Cobre)	0.264	Ce (Cerio)	0.007
Si (Silicio)	0.256	Pb (Plomo)	0.0029
Al (Aluminio)	0.159	Ti (Titanio)	0.0019
Ni (Níquel)	0.112	Ca (Calcio)	0.0016
P (Fósforo)	0.08	Bi (Bismuto)	0.001
S (Azufre)	0.042	Nb (Niobio)	0.0007
V (Vanadio)	0.031	O (Oxígeno)	0.0003

En la **Figura 5** se muestra la probeta después de la refusión del acero, tratándose de una macroestructura, característica de una fundición, mostrando un rechupe hacia el centro de la pieza, donde aparecen tres zonas características de la solidificación en molde.

La zona chill (Z.Ch) está constituida por granos poligonales y pequeños, es la zona más cercana al molde de enfriamiento, la extensión de esta depende de la zona subenfriada antes de que ocurra la nucleación. En la probeta no se percibe de forma macroscópica debido al tiempo de solidificación, donde la velocidad de enfriamiento es más rápida.

Posteriormente, sigue la zona columnar (Z.C), estos granos tienen su origen desde la zona chill, la extensión del área se debe a altos niveles de extracción calorífica. Entre un 60 y 70% del área de la pieza, corresponde a esta zona, donde la estructura del grano se alarga en la dirección de la solidificación.

Finalmente, solidificara en forma de granos equiaxiales (Z.E) conformada por granos orientados al azar, que podrían estar formados a partir de brazos dendríticos, teniendo una zona con un porcentaje aproximado entre 30 y 40% del área de la pieza.

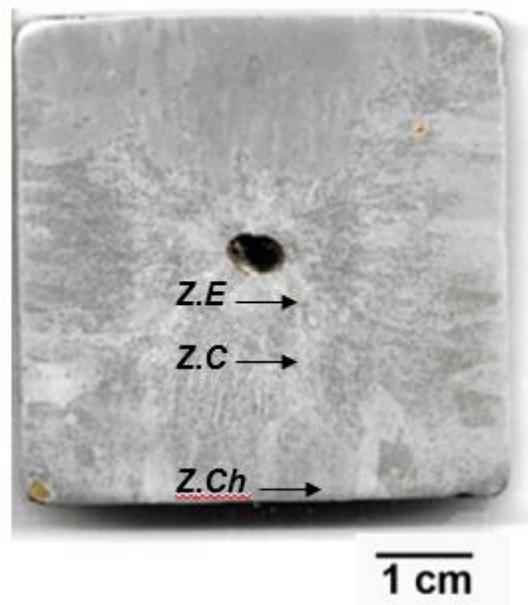


Figura 5. Imagen de colada Acero 4140 modificada con Molibdeno.

Z. Ch: Zona de Chill, **Z.C:** Zona columnar, **Z.E:** Granos equiaxiales.

Tratamiento termo-mecánico del Acero 4140 modificada con Mo.

En la **Figura 6)** se muestra el acero 4140 modificado con 0.935% de Mo y con tratamiento termo-mecánico donde se homogenizo la microestructura, durante una hora y se redujo aproximadamente un 60% del área transversal total, a través de un proceso de laminado en caliente y posteriormente se enfrió a temperatura ambiente, esto para favorecer una microestructura bainítica.

En la **Figura 6-A)** se observa la microestructura, donde se distingue la bainita (Círculo azul) y la ferrita acicular (Círculo rosa), con posibles carburos (Círculo amarillo), que se observan en la parte superior derecha de la **Figura 6-B)** que corresponde a una imagen a mayores aumentos, para asegurar sí lo son, se necesita analizar con más profundidad utilizando otras técnicas de caracterización. Debido al porcentaje en peso de molibdeno, favorece la formación de bainita.

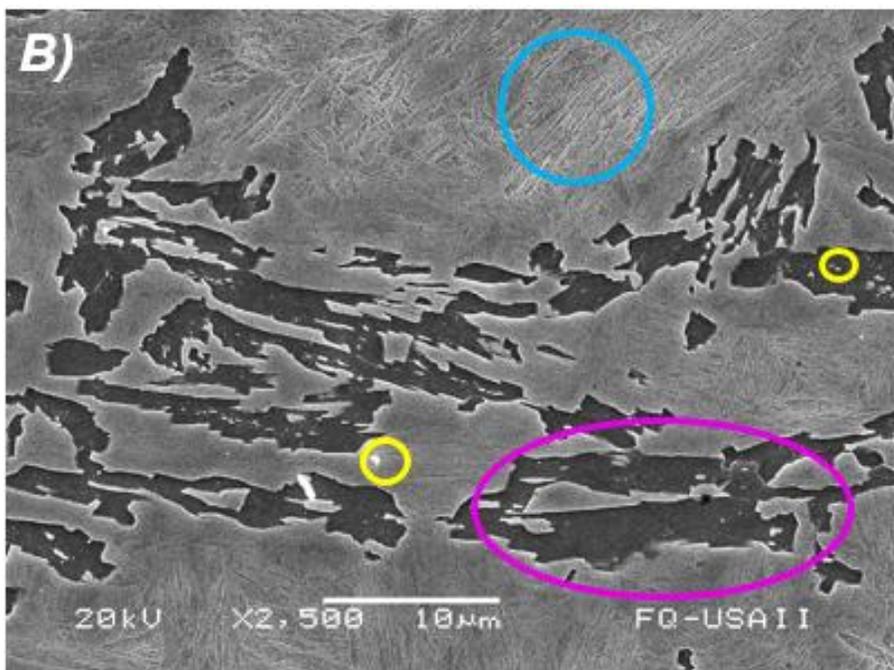
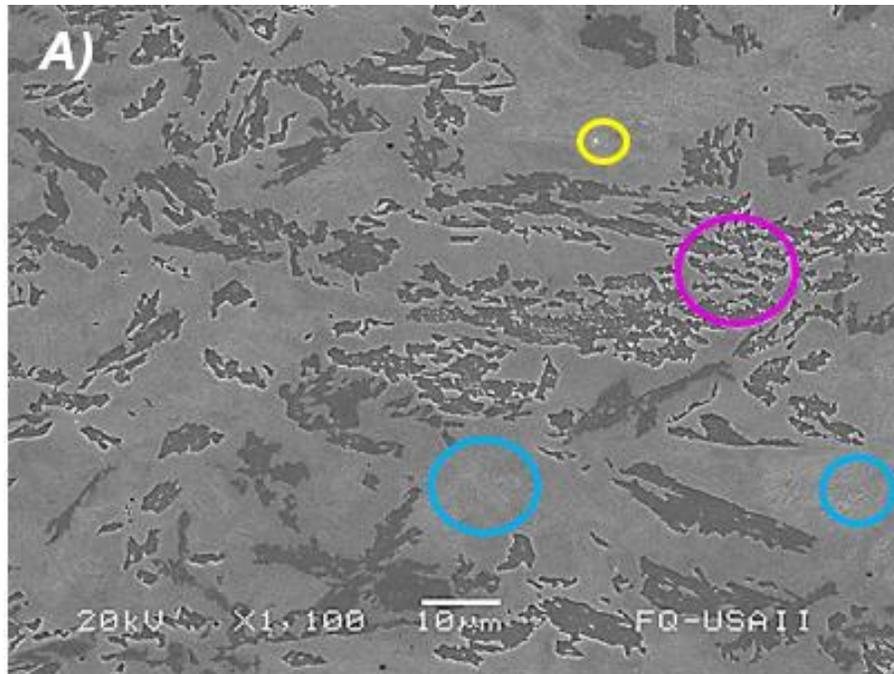


Figura 6. (A) Acero 4140 modificado con Molibdeno, deformada mecánicamente,
 (B) Imagen a detalle de la microestructura.

Ferrita.
 Bainita.
 Inclusiones.

Diagrama CCT.

Los diagramas CCT son una representación gráfica de las transformaciones en condiciones de enfriamiento continuo, es la relación de la temperatura en función de logaritmo del tiempo, el cual indica:

1. Curvas que representan gráficamente las velocidades de enfriamiento.
2. Porcentaje aproximado de la transformación.
3. Zonas de fases.

Estos se obtienen a través de la composición química teórica y experimental respectivamente, reportados en las **Tablas 1 y 2**. En las **Figuras 7 y 8** se muestran los diagramas que corresponden al acero sin modificar y al acero modificado.

Los parámetros (Composición química, tamaño de grano austenítico y temperatura de austenización) utilizados para la realización del Diagrama CCT (**Figura 7**), son generados a través del software JMat-Pro 6.0.

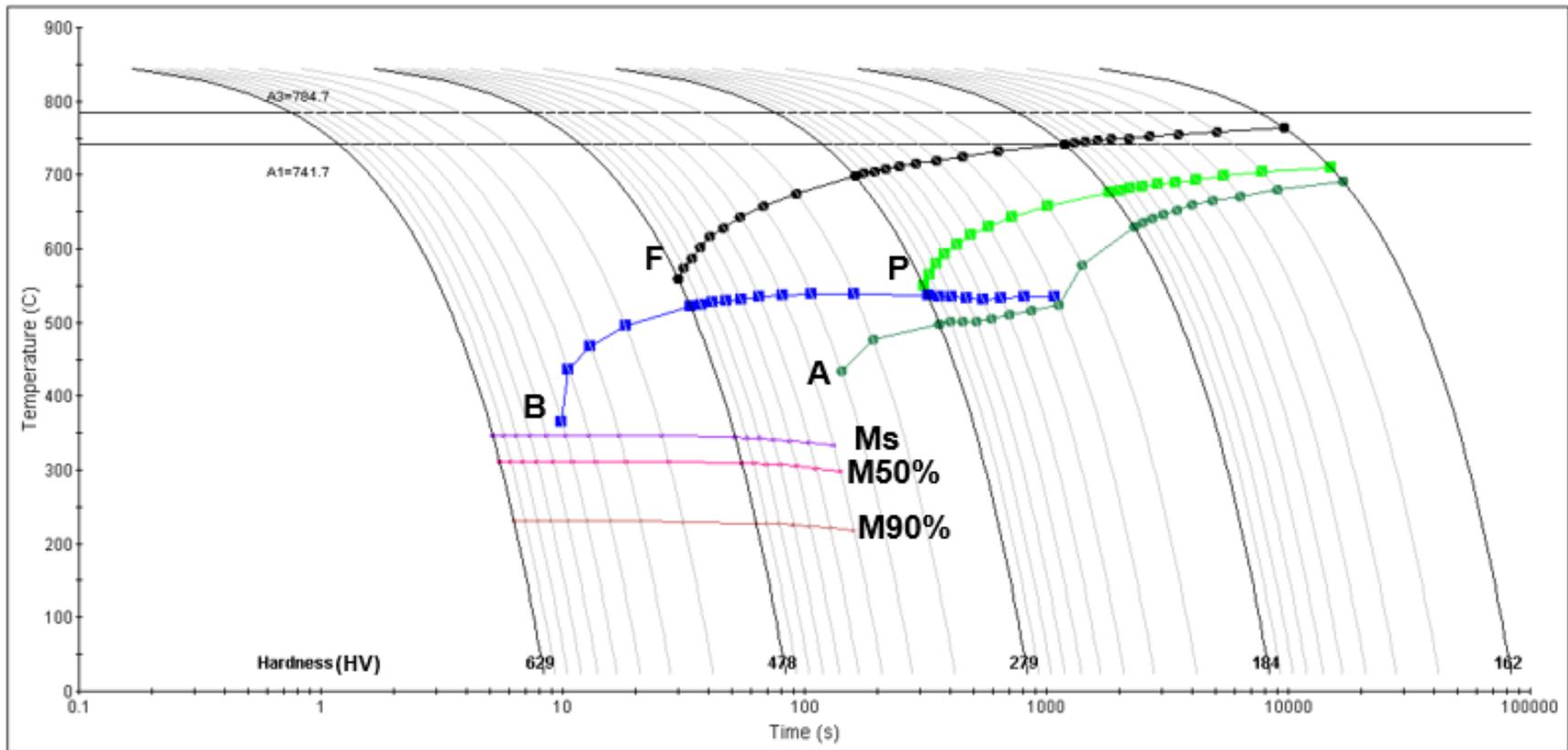
Para el diagrama CCT experimental (**Figura 8**), fue necesario determinar el tamaño de grano austenítico, el tamaño promedio resultante es de 8.11805 μm .

La **Tabla 3**, es un resumen del análisis de la **Figura 7**, donde se muestran el inicio y fin de las transformaciones de las fases, las temperaturas y tiempos en los que ocurren en el acero sin modificar. De acuerdo con los tiempos y temperaturas en la técnica de dilatometría las fases esperadas son; la ferrita, perlita y bainita.

La ferrita tiene un comienzo en 559.4°C y finalizando en 759.8°C. La perlita inicia en 559.4°C y termina en 709°C. La bainita tiene su inicio a 375.7°C y finaliza su transición a 534.89°C.

Tabla 3. Temperaturas y tiempos de fases, de acuerdo con el diagrama CCT teórico.

Fase	Inicio (°C)	Tiempo inicial (s)	Fin (°C)	Tiempo final (s)
Ferrita 1%	559.4	30.06	759.8	10020
Perlita 1%	559.4	300.6	709.7	15030
Bainita 1%	375.7	9.69	534.89	1083
Austenita 1%	434	141	692	16788
Martensita	346.5	5.14	333.91	131.5
Martensita 50%	308.9	5.51	298.7	140.32
Martensita 90%	230.8	6.29	217	160.7



Austenitisation temperature (C) : 860.0
 Grain size : 30.0 microns

Figura 7. Diagrama CCT teórico Acero 4140.

La **Tabla 4**, es un resumen del análisis de la **Figura 8**, donde se muestran el inicio y fin de las transformaciones de las fases, las temperaturas y tiempos en los que ocurren en el acero modificado. De acuerdo con los tiempos y temperaturas en la técnica de dilatometría las fases esperadas son; la ferrita, perlita y bainita.

La ferrita tiene una temperatura inicial de 672°C y finalizando en 754°C. La perlita inicia en 578°C y termina en 785°C. La bainita tiene su inicio a 353°C y finaliza su transición a 578°C.

Tabla 4. Temperaturas y tiempos de fases esperados, de acuerdo con el diagrama CCT experimental.

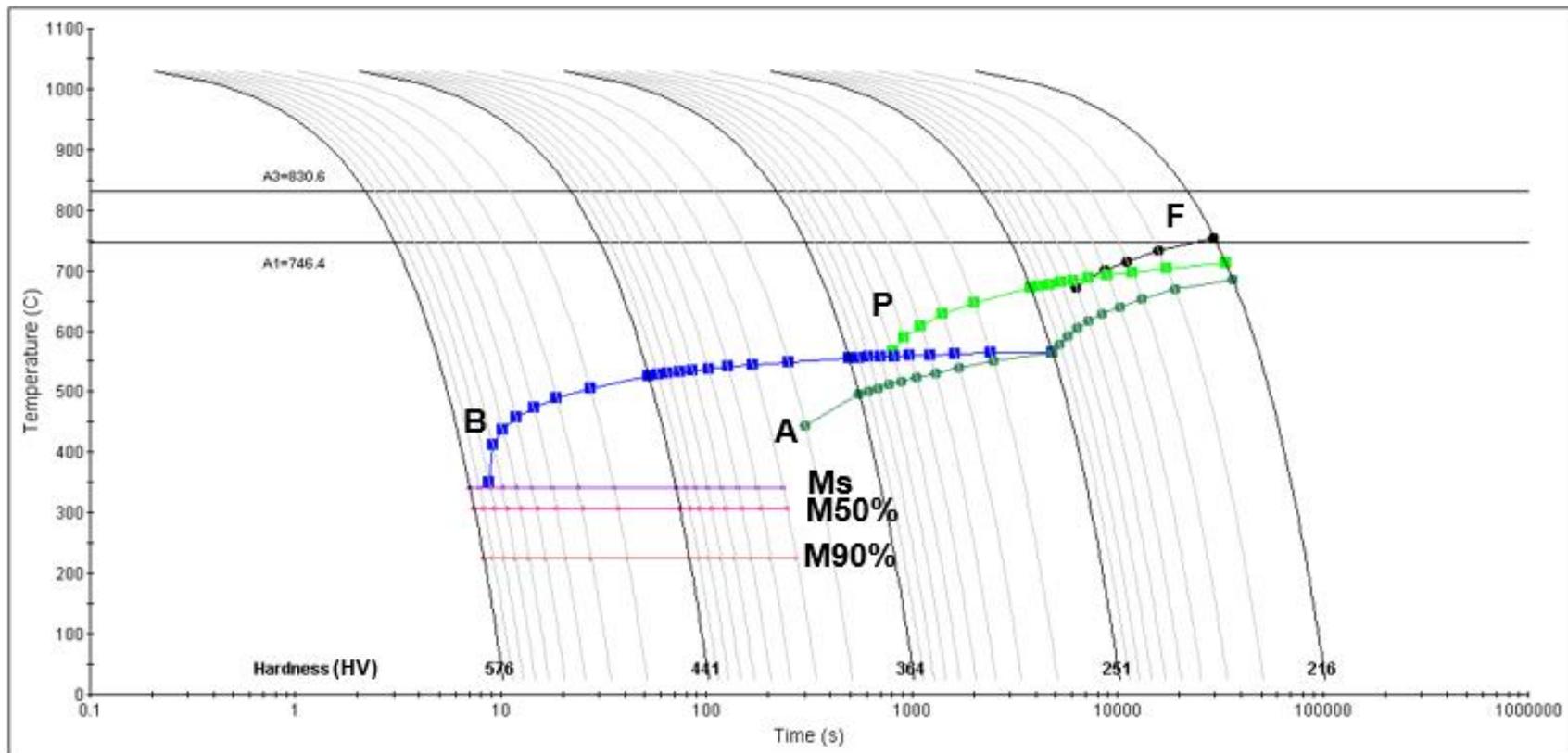
Fase	Inicio (°C)	Tiempo inicial (s)	Fin (°C)	Tiempo final (s)
Ferrita 1%	672	6299	754	29522
Perlita 1%	578	785	722	32800
Bainita 1%	353	8.71	578	4715
Austenita 1%	445	302	701	34850
Martensita	342	7.07	342	235
Martensita 50%	312	7.38	307	247
Martensita 90%	226	8.23	226	274

En los diagramas CCT (**Figura 7** y **Figura 8**) se puede observar un comportamiento similar en el Acero 4140 sin modificar y en el acero modificado con Molibdeno, en ambos diagramas, se presentan los microconstituyentes de ferrita, perlita, bainita, austenita y martensita.

La mayor diferencia visual ocurre en la ferrita; en el CCT teórico del acero sin modificar, el inicio se presenta en los 559.4°C a los 30 segundos, en el diagrama teórico del acero modificado, ocurre aproximadamente a los 672°C a los 29,522 segundos, esto sucede porque el molibdeno y cromo favorecen a la transformación de la bainita a expensas de ferrita acicular. Sin embargo, el efecto combinado de estos elementos puede conducir a la formación de martensita de bajo carbono, en bajo porcentaje, esto se debe a que el acero es modificado con molibdeno, que es clasificado como elemento alfégenos, siendo un estabilizador de la estructura ferrítica.

Comparando el comportamiento de la fase bainita y de la perlita, se tiene un comportamiento similar, tanto en temperatura, tiempo de inicio y final de la transformación. Gráficamente las velocidades de enfriamiento y zonas de fases son similares.

La temperatura crítica A3 de la **Figura 8** es de 830.6°C siendo mayor que la de la **Figura 7**, que es de 784.7°C ya que, por la presencia del Molibdeno que es un elemento alfégeno, aumenta el campo de la ferrita y disminuye el campo de la austenita.



Austenitisation temperature (C) : 1050.0
 Grain size : 8.11805 microns

Figura 8. Diagrama CCT teórico Acero 4140 modificado con Molibdeno.

Dilatometría.

A continuación, de las **Figuras 9 a la 12** se observan las curvas dilatométricas de calentamiento y enfriamiento para las diferentes rapideces de enfriamiento que se manejaron en el proyecto. El termino ΔL denota el cambio de longitud y $d(dl)/dT$ la primera derivada con respecto a la temperatura.

Las curvas dilatométricas del acero modificado, son usadas para determinar la temperatura de comienzo y el fin de transformación de cada fase que se va presentando durante el proceso.

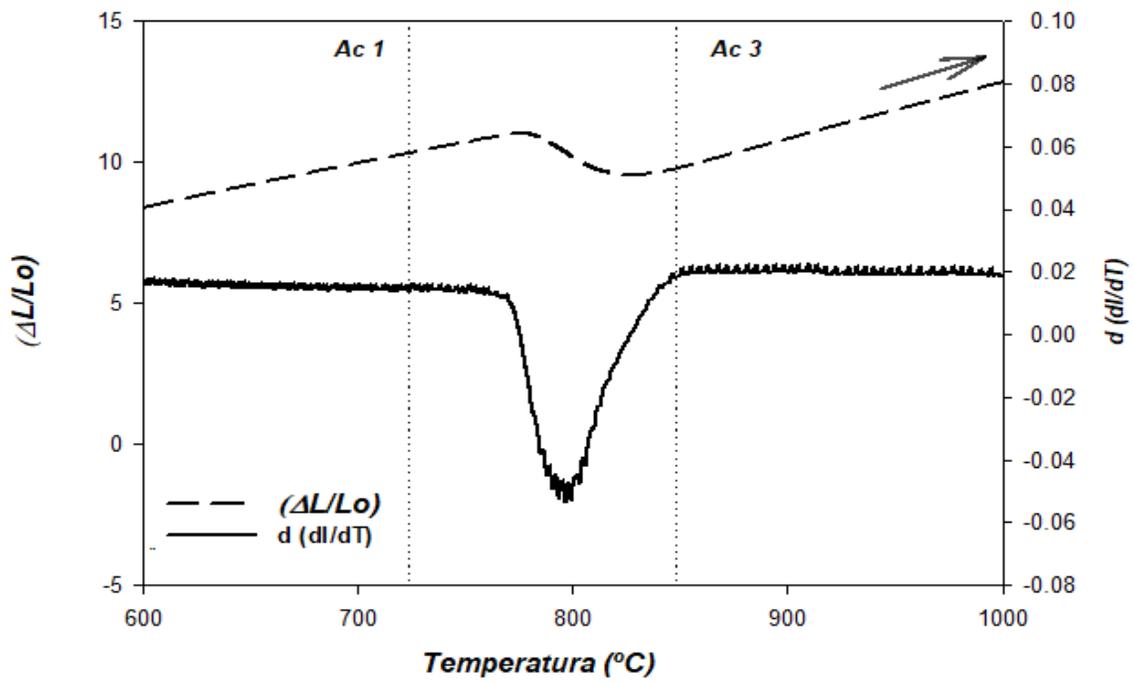
El análisis de las cuatro diferentes rapideces de enfriamiento se realizó, a partir de los resultados obtenidos en las curvas dilatométricas, tanto de calentamiento, como de enfriamiento, donde se generan valles, que se interpretan como las transformaciones de fase ocurridas durante el proceso, se descifra la fase con las temperaturas de inicio y fin de la transformación. Esto se verá reflejado posteriormente en las microestructuras reveladas.

PIEZA A CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 1°C/MIN.

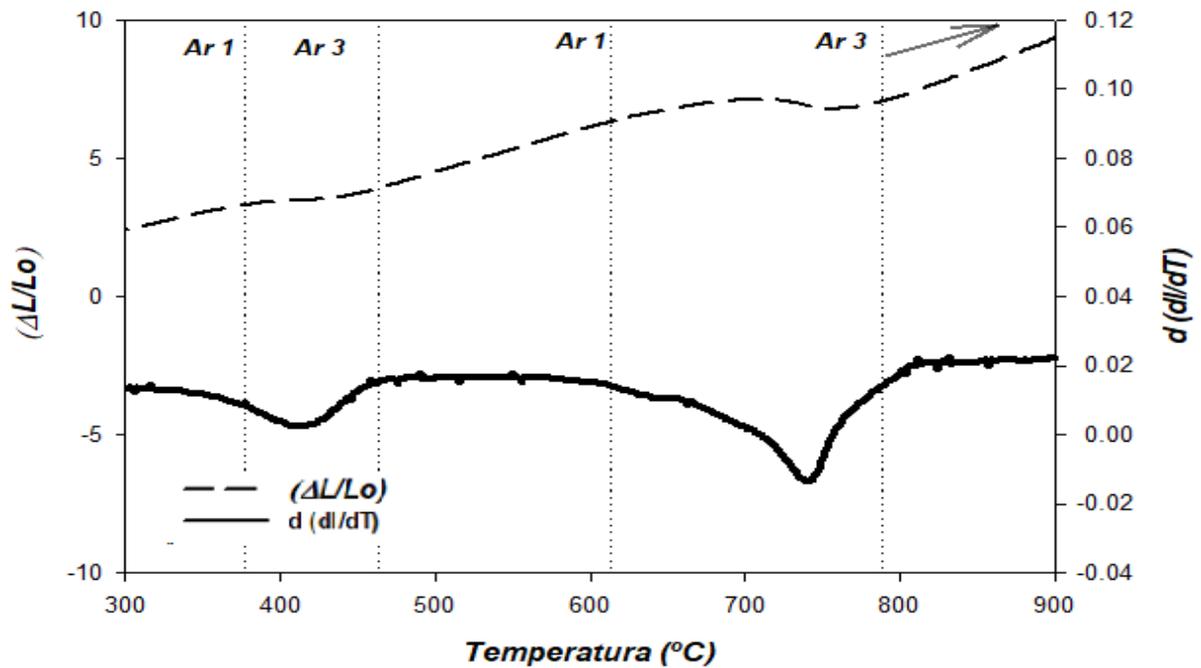
En la **Figura 9** se muestran las curvas de calentamiento así como la de enfriamiento de la primera pieza denominada como "A", corresponde a un enfriamiento de 1°C/min.

La **Figura 9-A**, pertenece a la curva de calentamiento, donde se genera una transformación de fase que inicia en 710 ($Ac1$) y finaliza en los 848°C ($Ac3$), este rango corresponde a la fase de perlita.

En la curva de enfriamiento **Figura 9-B** se generan dos transformaciones de fases en cada una, esto se debe a que, al tener un tiempo largo de enfriamiento (aproximadamente 20hrs), se presenta la probabilidad de observar el desarrollo de las transformaciones de fases existentes. La primera posible fase de bainita superior con trazas de perlita entre los 376 ($Ar1$) hasta 463°C ($Ar3$), la segunda posible fase va de 613 ($Ar1$) hasta 789°C ($Ar3$) de perlita.



(A)



(B)

Figura 9. (A) Curva rapidez de calentamiento a 1°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 1°C/min.

PIEZA B CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 5°C/min.

En la **Figura 10** se presentan las curvas dilatométricas de la pieza “B” con una rapidez de enfriamiento de 5°C/min.

En la **Figura 10-A** se observa que el cambio de longitud presenta un comportamiento lineal con respecto a la temperatura hasta la contracción que ocurre en 713°C (*Ac1*) y finaliza en 858°C (*Ac3*), donde se genera la descomposición de perlita en austenita.

En la curva dilatométrica de enfriamiento que se muestra en la **Figura 10-B**, igual que en la Pieza “A”, se presentan dos posibles fases existentes, la primera ocurre entre los 319 (*Ar1*) a los 510°C (*Ar3*), que corresponde a la fase de bainita superior y la segunda fase va de 692 (*Ar1*) hasta 810°C (*Ar3*) de perlita.

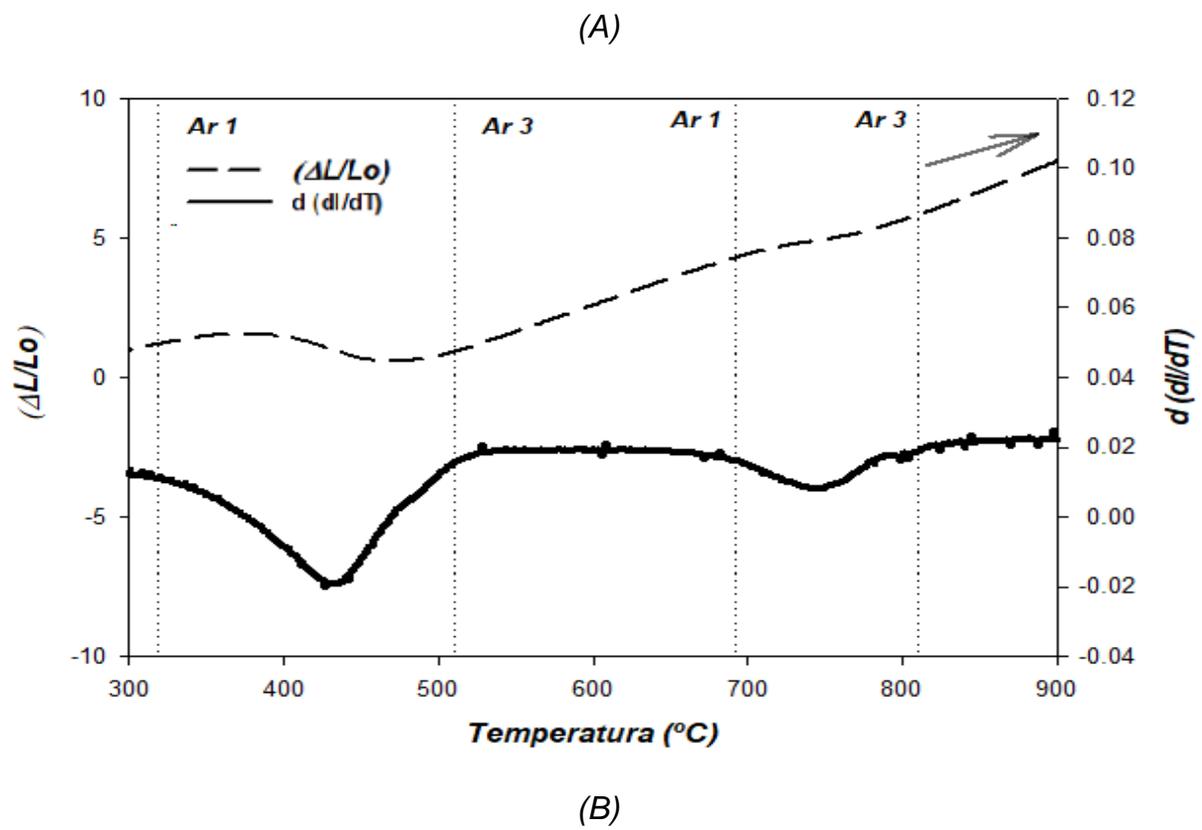
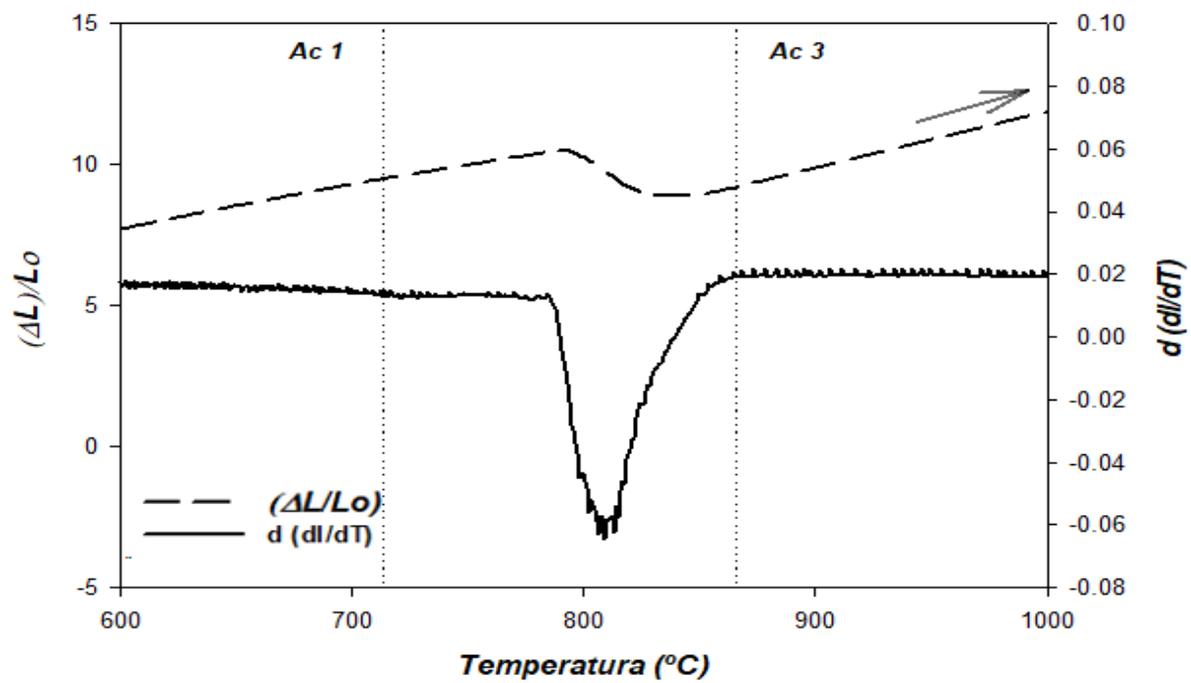


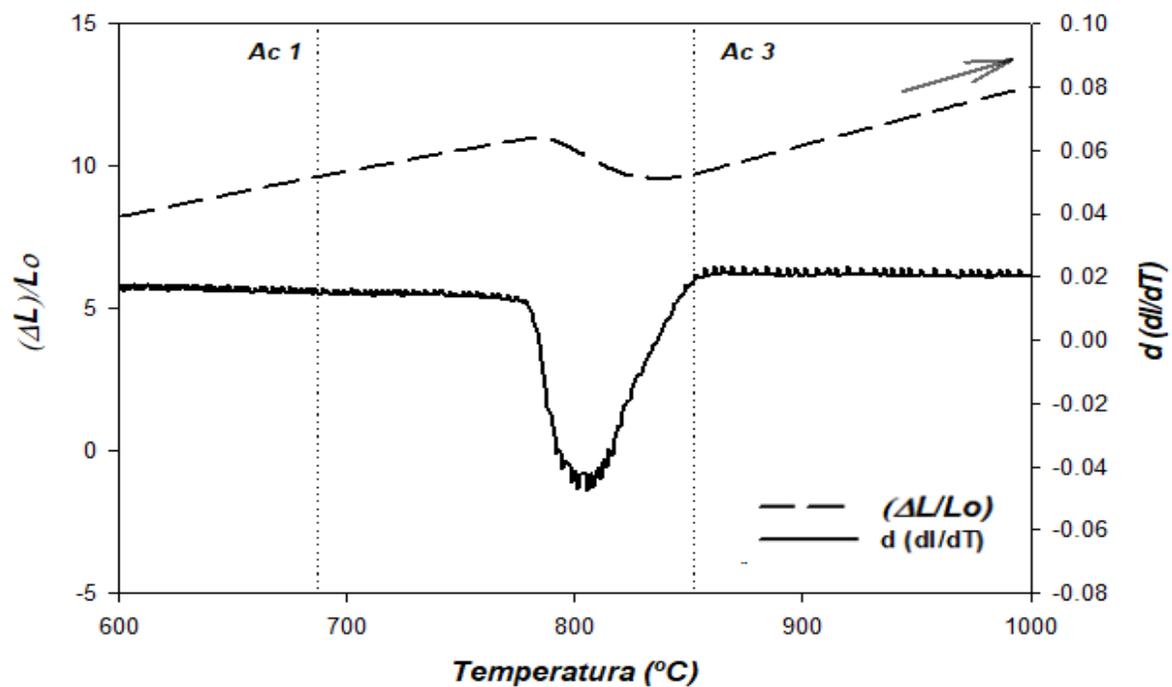
Figura 10. (A) Curva rapidez de calentamiento a 5°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 5°C/min.

PIEZA C CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 15°C/min.

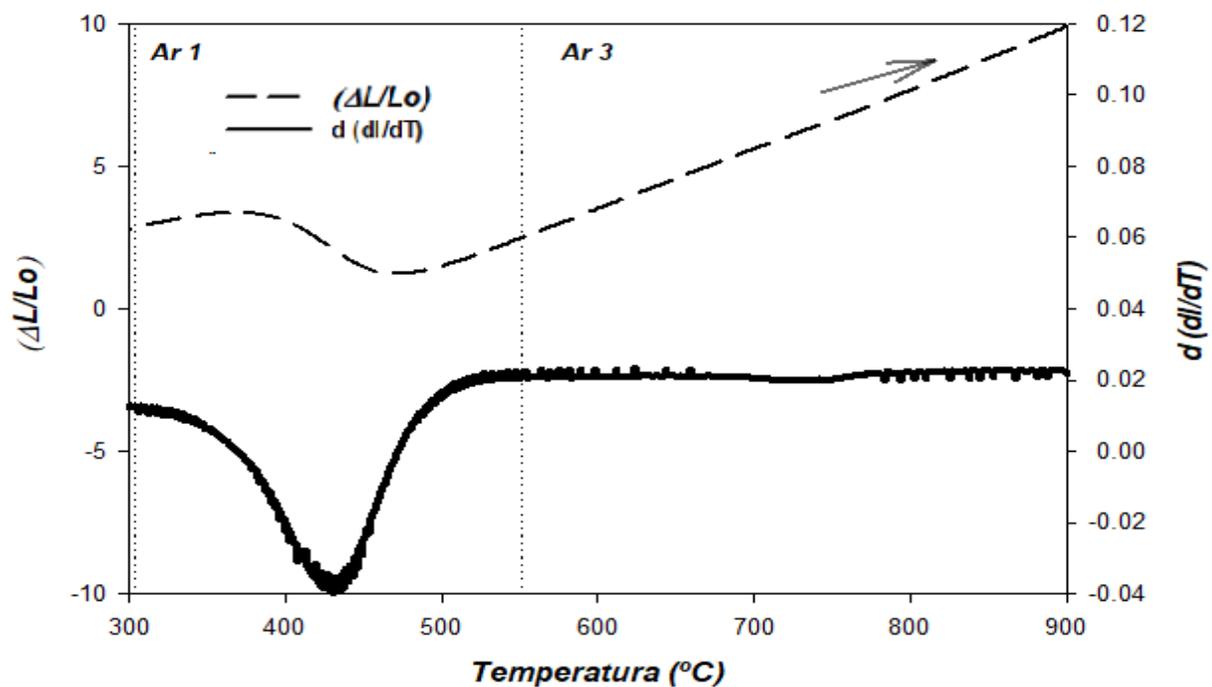
La **Figura 11** muestra la curva dilatométrica de calentamiento y de enfriamiento, de la pieza "C" que corresponde a la rapidez de enfriamiento de 15°C/min.

La curva de calentamiento que se muestra en la **Figura 11-A**, presenta un cambio lineal, desde 680 (*Ac1*) hasta 850°C (*Ac3*), donde se genera la fase perlítica.

A diferencia de las otras rapidezces de enfriamiento, en la **Figura 11-B** solo ocurre una transformación de fase, entre los 301 (*Ar1*) y los 540°C (*Ar3*) de bainita. El hecho de que se haya observado un solo valle en la curva de la derivada indica que la transformación se produjo en una sola etapa.



(A)



(B)

Figura 11. (A) Curva rapidez de calentamiento a 15°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 15°C/min.

PIEZA D CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 25°C/min.

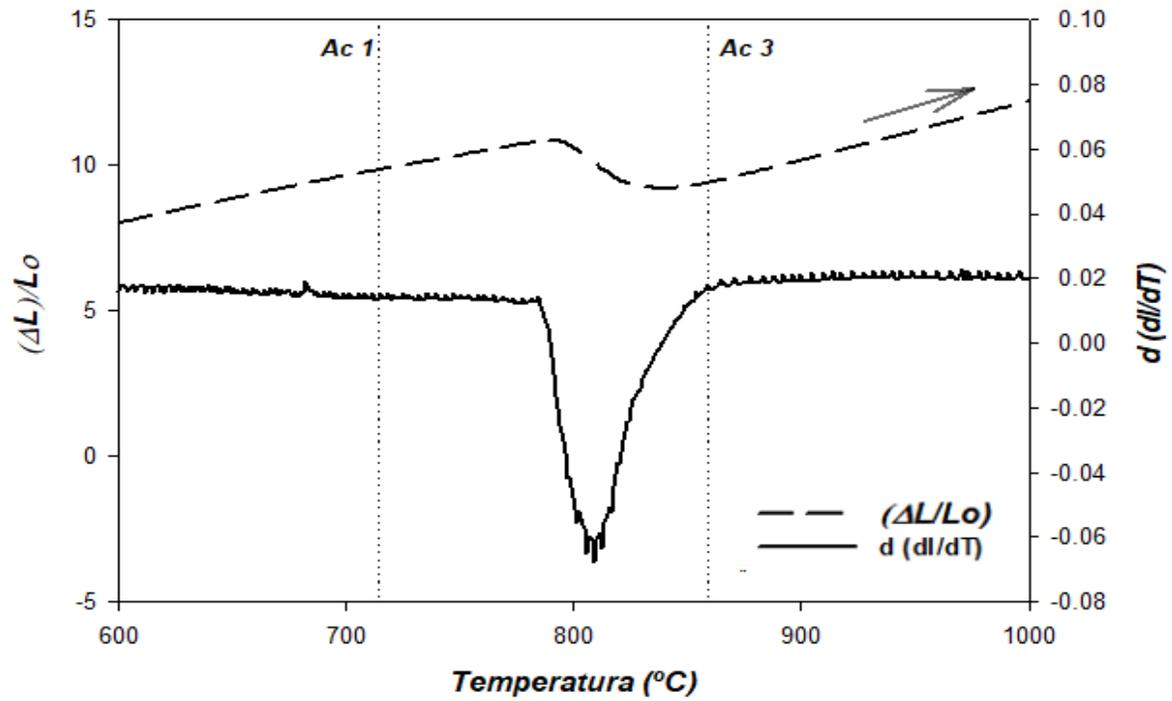
En la **Figura 12** se presentan las curvas dilatométricas de la pieza denominada como "D" con una rapidez de enfriamiento de 25°C/min, que comparando con las demás piezas, su tiempo de enfriamiento es menor.

En la **Figura 12-A** la curva de calentamiento presenta un cambio de longitud lineal entre los 714 (Ac1) de inicio y hasta la contracción de 858°C (Ac3) con respecto a la temperatura, donde se presenta la fase de perlita.

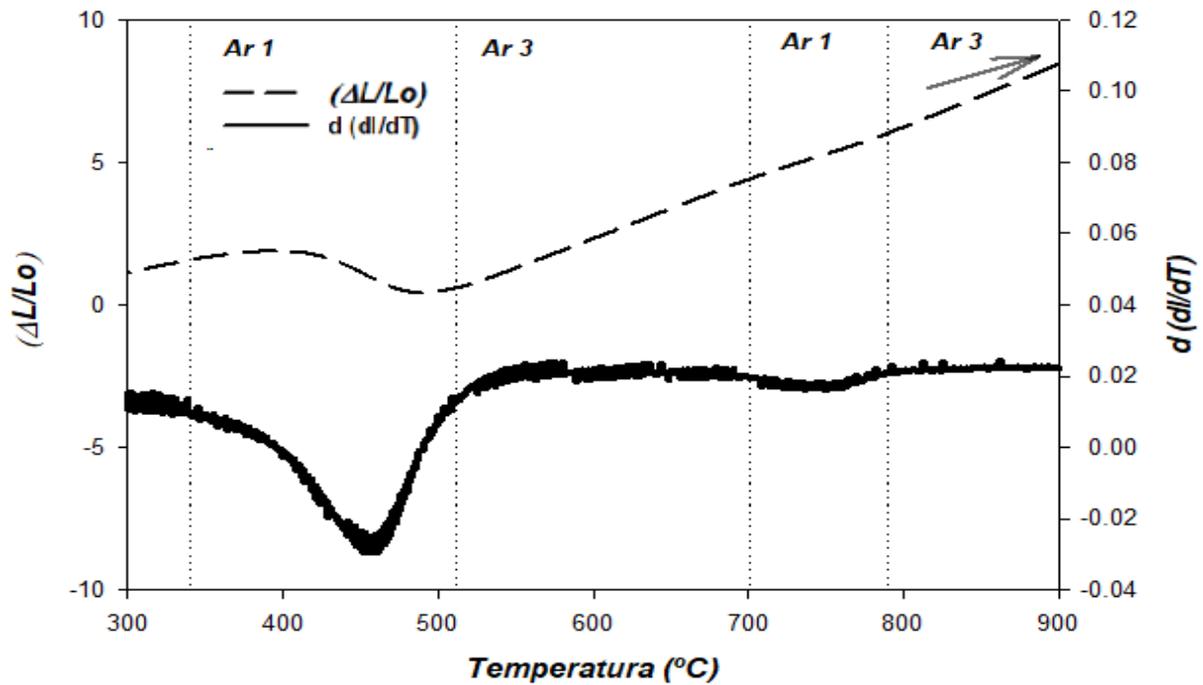
En la de rapidez de enfriamiento **Figura 12-B**, al igual que en la pieza "A" y "B" se generan dos posibles fases; la primera ocurre entre los 339 (Ar1) y 511°C (Ar3) una fase de bainita, la segunda fase que se genera es de perlita que transforma de 687(Ar1) a 789°C (Ar3).

Comparando las transformaciones de fases que se presentaron en las cuatro piezas, se logra distinguir que, en la curva de rapidez de calentamiento, todas presentan la fase perlítica, entre los 704 y 858°C. En las curvas de rapidez de enfriamiento, primero se presenta la bainita y posteriormente perlita, excepto en la pieza "C", con una velocidad de enfriamiento de 15°C/min, donde únicamente ocurre la fase de bainita.

En las ocho curvas presentadas de la **Figura 9** a la **12** se generan los cambios de volumen en forma negativa (contracción) del material, sin obtener algún cambio de volumen positivo (expansión), esto es denominado como dilatación térmica. Estas transformaciones de fase se verán reflejadas en la microestructura de cada pieza.



(A)



(B)

Figura 12. (A) Curva rapidez de calentamiento a 25°C/min. (B) Curva rapidez de enfriamiento a 25°C/min.

Caracterización microestructural.

En el análisis microestructural se presentan las diversas imágenes obtenidas por Microscopía Óptica (MO) y por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se realizó a partir del ensayo de dilatometría, esto con la finalidad de realizar un seguimiento de las transformaciones de fase que ocurren en las curvas dilatométricas (valles y rangos de temperaturas), que se presentaron anteriormente.

PIEZA A CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 1°C/min.

En la **Figura 13)** se observa la microestructura después de realizar el ensayo de Dilatometría en la Pieza A, tuvo un tiempo de enfriamiento de aproximadamente 20 horas, observándose una microestructura bandeada, formada por un aproximado de 50% granos equiaxiales de tamaños heterogéneos de ferrita (fase clara, marcada en círculo rosa), bandas de perlita con bainita (fase oscura, resaltadas en círculo azul).

En la **Figura 13-B)** es una imagen a detalle de la **Figura 13-A)**, donde se observan las fases de ferrita (Círculo rosa), bainita en transición hacia una perlita fragmentada (Círculo azul y verde), eso confirma las fases que se presentan en las curvas dilatométricas (**Figura 9)**. Estas transformaciones ocurren en las curvas de calentamiento de 710 ($Ac1$) y finaliza en los 848°C ($Ac3$), este rango corresponde a la fase de perlita. y en la curva de enfriamiento en los intervalos de bainita superior con trazas de perlita entre los 376 ($Ar1$) hasta 463°C ($Ar3$), la segunda posible fase va de 613 ($Ar1$) hasta 789°C ($Ar3$) de perlita.

Además, en los círculos amarillos marcado en la **Figura 13-B)**, se observa inclusiones de sulfuro de manganeso.

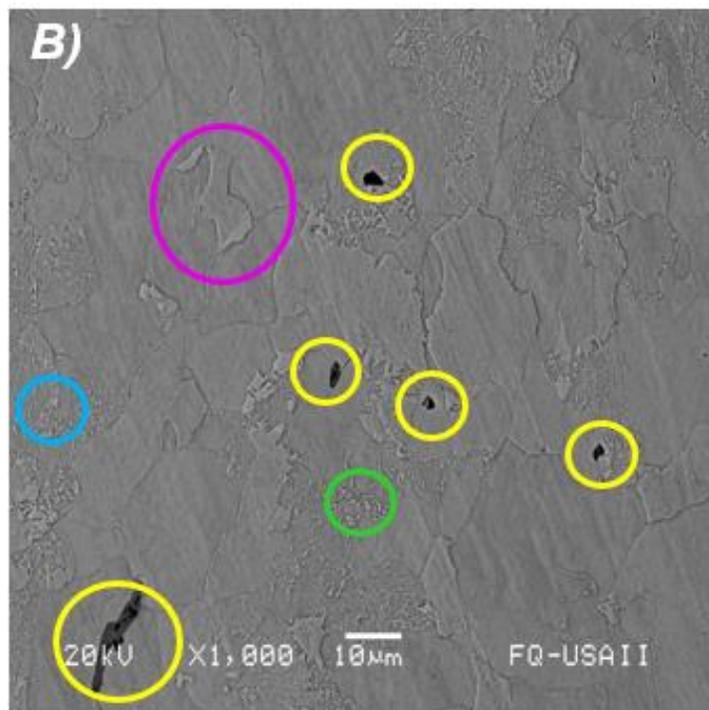
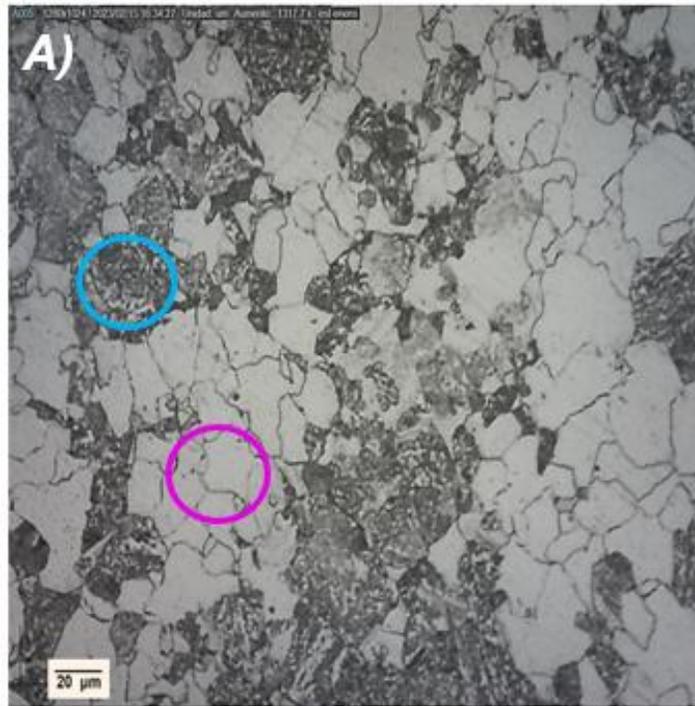


Figura 13. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría, **(A)** Pieza A con microestructura de ferrita, perlita con bainita y carburos de Manganeso, **(B)** Imagen a detalle de la microestructura.

Ferrita.
 Bainita.
 Perlita.
 Inclusiones.

PIEZA B CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 5°C/min.

La **Figura 14)** se observa la microestructura después de realizar el ensayo de Dilatometría en la Pieza B, esta pieza tuvo un tiempo de enfriamiento de aproximadamente 15 horas.

En la **Figura 14-A)** se observan las fases; de ferrita con un aproximado del 30% (fase clara resaltada en círculo rosa), perlita con agujas de bainita (fases oscuras, marcadas en los círculos azul y verde), al analizar la microestructura y las curvas dilatométricas en conjunto (**Figura 10)** de esta pieza, se confirman las transformaciones de fases ocurridas en la probeta durante la prueba. Estas transformaciones ocurren en la curva de calentamiento en 713°C (*Ac1*) y finaliza en 858°C (*Ac3*), donde se genera la descomposición de perlita en austenita y en la curva de enfriamiento en los intervalos de 319 (*Ar1*) a los 510°C (*Ar3*), que corresponde a la fase de bainita superior y la segunda fase va de 692 (*Ar1*) hasta 810°C (*Ar3*) de perlita.

Los sulfuros que se presentan marcadas en el círculo amarillo en la **Figura 14-B)** son de sulfuro de manganeso, estos sulfuros se encuentran en la mayoría de las muestras, debido a la composición química que se muestra en la **Tabla 2**, por el porcentaje en peso de sulfuro y manganeso, se ubican en el límite de grano de la perlita y ferrita.

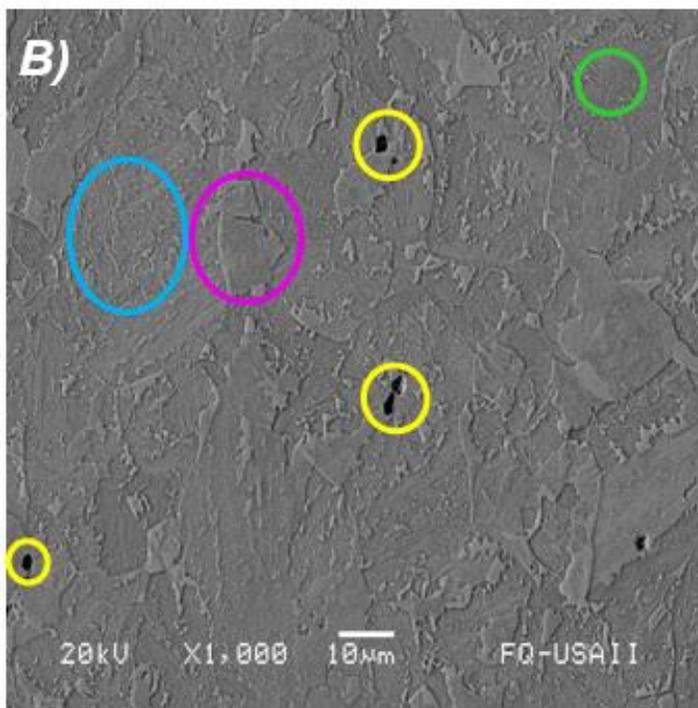
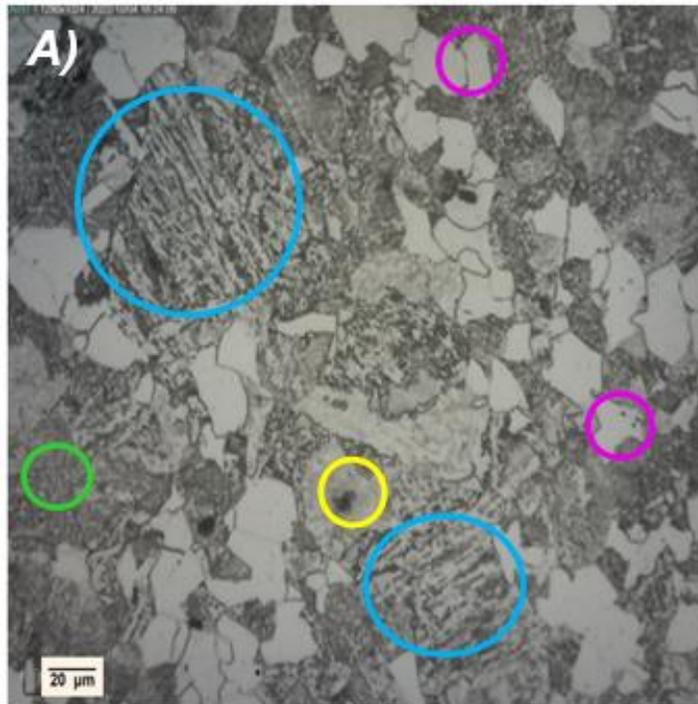


Figura 14. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría.

(A) Pieza B con microestructura de ferrita, perlita con bainita y carburos de Manganeso, **(B)** Imagen a detalle de la microestructura.

Ferrita.
 Bainita.
 Perlita.
 Inclusiones.

PIEZA C CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 15°C/min.

En la **Figura 15)** se observa la microestructura después de realizar el ensayo de Dilatometría en la Pieza C, su tiempo de enfriamiento fue de aproximadamente 10 horas.

La **Figura 15-A)** fue tomada en el Microscopio óptico, esta metalografía a diferencia de las demás piezas, contiene un aproximado del 10% de ferrita (Círculo rosa), lo que la hace la pieza con la menor cantidad de ferrita (10% aproximadamente) y la microestructura es mayormente homogénea de fase perlítica (Círculo verde), con trazas de bainita (Círculo azul), en la microestructura tomada. En la **Figura 15-B)**, que fue tomada en el MEB, se detalla la microestructura.

El porcentaje de ferrita se debe a la rapidez de enfriamiento de la probeta y se confirma con la curva dilatométrica de calentamiento a 680 ($Ac1$) hasta 850°C ($Ac3$), donde se genera la fase perlítica y en la de enfriamiento la fase bainítica que ocurre en un intervalo de entre los 301 ($Ar1$) y los 540°C ($Ar3$) que se muestra en la **Figura 11)**, a diferencia de las otras piezas, es la única en la que se presenta una sola fase.

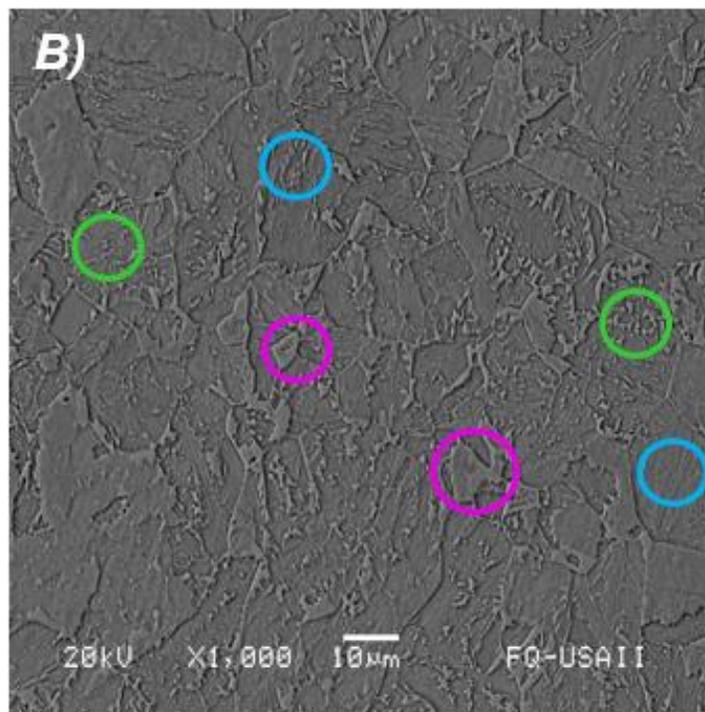
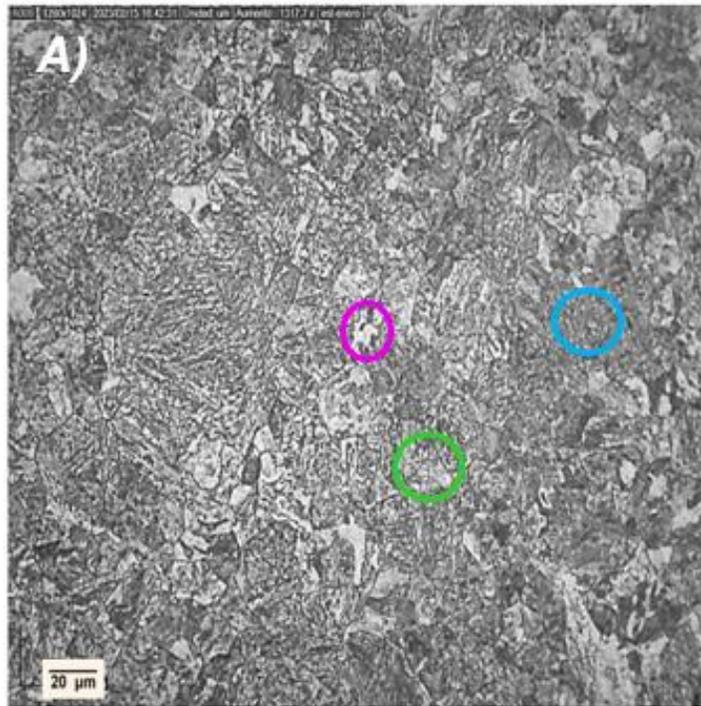


Figura 15. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría.
(A) Pieza C con microestructura de perlita con bainita, **(B)** Imagen a detalle de la microestructura.

Ferrita.
 Bainita.
 Perlita.

PIEZA D CON UNA RAPIDEZ DE ENFRIAMIENTO DE 25°C/min.

En la **Figura 16)**, se observa la microestructura obtenida al realizar el ensayo de Dilatometría de la Pieza D, que comparando con la pieza de dilatometría A, ya que no se generó un bandeado, esto se debe por la diferencia de tiempo de enfriamiento, ya que la pieza A dura aproximadamente 20 horas en llegar a temperatura ambiente y la pieza D 5 horas, sin embargo, las microestructuras coinciden en todas las piezas, esto se observa en MO y en el MEB.

Al igual que en la anterior se puede observar en la **Figura 16-B)** donde se detalla las fases de ferrita con un aproximado del 20% del total de microestructura (Círculo rosa), bainita en transición hacia una perlita fragmentada (Círculo azul y verde), esta región es distribuida homogéneamente en toda la muestra y la región ferrítica no está definida como en la **Figura 13-A)** en donde la presencia de la ferrita es más evidente. Esto último confirma las fases que se presentan en las curvas dilatómétricas (**Figura 12)**, donde se da el inicio de la fase perlítica en 714 (Ac1) inicio y hasta la contracción de 858°C (Ac3) y en la curva de enfriamiento la primera fase se da entre los 339 (Ar1) y 511°C (Ar3) una fase de bainita superior, la segunda fase que se genera es de perlita que transforma de 687(Ar1) a 789°C (Ar3).

Además, en los círculos amarillos marcado en la **Figura 16)**, se observa inclusiones de sulfuro de manganeso.

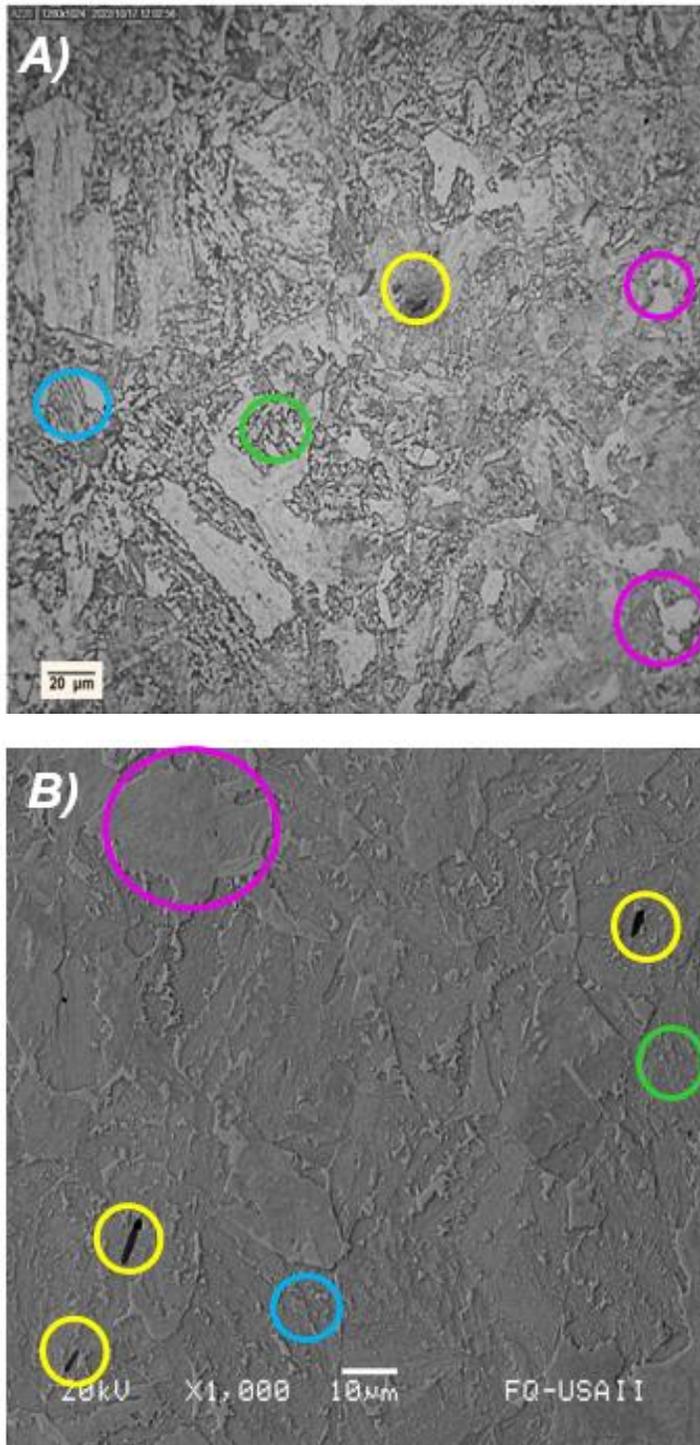


Figura 16. Microestructuras del acero después del ensayo de Dilatometría.

(A) Pieza D microestructura de perlita fragmentada, bainita y carburos de Manganeso,
(B) Imagen a detalle de la microestructura.

Ferrita.
 Bainita.
 Perlita.
 Inclusiones.

Microdureza.

Para el análisis de los datos obtenidos del ensayo de microdureza, se utilizan los Diagramas CCT, para tener los datos teóricos esperados y compararlos con los experimentales, además de ocupar al análisis microestructural de la pieza de llegada y de las piezas de dilatometría, ya que estas imágenes reveladas, dan información acerca de los porcentajes que hay de cada fase, esto será relevante para el promedio de las tomas de microdureza.

En la **Figura 17**, se muestra la microdureza promedio para cada una de las piezas analizadas. Se observa que hay una diferencia de dureza (+/-100 HV) entre la pieza de llegada y las de dilatometría, esta diferencia se debe al aumento del porcentaje de Molibdeno en el acero 4140, ya que el molibdeno es un fuerte formador de carburos, que es causado por una precipitación muy fina de posibles carburos de molibdeno y hierro, incrementándose la dureza en general promedio, a partir del aumento de la rapidez de enfriamiento, estableciéndose una diferencia no relevante.

Los Diagramas CCT observados en la **Figura 7 y 8**, muestran en la parte inferior la dureza (HV) deseable en el tiempo de enfriamiento. En la **Figura 7**, los datos obtenidos son del acero sin modificar, para la ferrita se espera una dureza de 478, en la bainita de 600, para la perlita 279 y por último para la austenita de 350. En la **Figura 8** los datos obtenidos son del acero modificado, para la ferrita se desea una dureza de 240, en la bainita 550, para la perlita de 350 y para la austenita de 400. Las durezas obtenidas son similares, excepto en la fase ferrítica, donde la diferencia es de más de 200, esto como se menciona anteriormente, se debe a la presencia del molibdeno, ya que éste se disuelve en la ferrita.

Entre las piezas de dilatometría a diferentes rapidezces de enfriamiento, no se encuentra variación en la dureza, a excepción de la pieza A, que se enfrió a una velocidad de 1°C/min en un tiempo aproximado de 20 horas, esto se debe a que a pesar de tener las mismas fases (Ferrita, Perlita y Bainita), el porcentaje de contenido en cada una de las piezas es diferente, el porcentaje de ferrita en la pieza A es del 50%, siendo la que tiene mayor contenido, respecto a las demás, se tiene en consideración que la ferrita es el microconstituyente con menor dureza (240 HV) respecto a los valores obtenidos en el Diagrama CCT del acero modificado que se muestra en la **Figura 8**, esto justifica que sea la pieza con menor promedio de dureza como se muestra en la **Figura 17**. Las piezas B, C y D, se mantienen en un promedio de 350 HV de dureza, ya que su microestructura es parecida y la toma de datos, es equivalente.

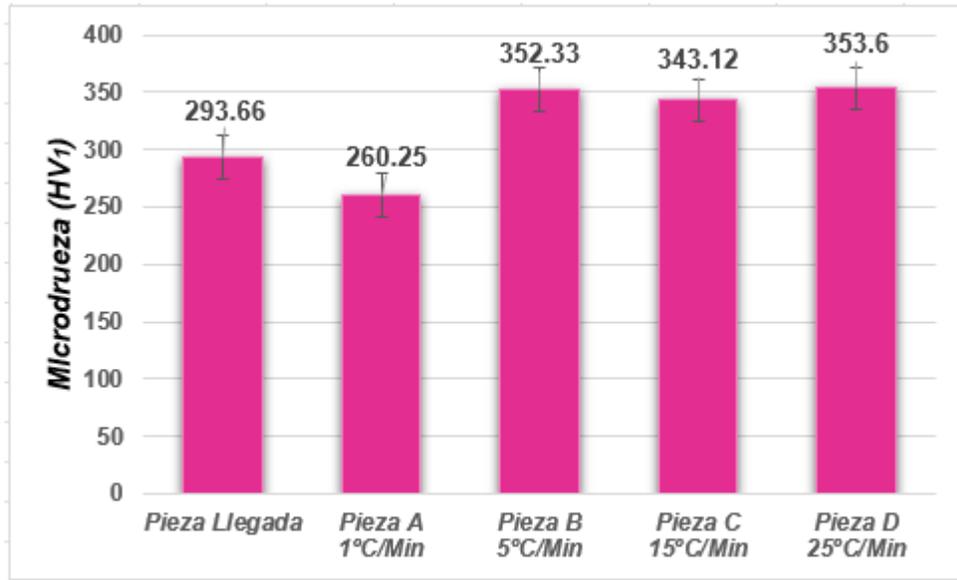


Figura 17. Resultados obtenidos del ensayo de microdureza HV₁.

Capítulo 4.

Conclusiones.

Conclusiones.

- El acero AISI 4140 A modificado con 0.935% en peso de Mo mostro durante sus tres distintas etapas de procesamiento: llegada, el proceso termomecánico y su comportamiento en dilatometría; que las microestructuras predominantes consistieron principalmente en una combinación de fases y microconstituyentes conformados por ferrita, perlita y bainita, con cambios morfológicos definidos.
- Las microestructuras obtenidas y debido a las distintas rapidezces de enfriamiento estas demostraron ser específicamente ferrita, perlita y bainita y además se pudo establecer los diversos rangos de inicio y fin de las transformaciones involucradas y las temperaturas intercriticas. Todo esto traducido de los diagramas CCT obtenidos tanto el teórico del acero 4140 como el del mismo acero modificado con Mo.
- Las tres trasformaciones de fase (perlita, bainita y ferrita), son más perceptibles a una rapidez de enfriamiento de 1°C/min, mientras que a 5, 15 y 25°C/min hay una distribución homogénea en las fases presentadas.
- De acuerdo con la distribución de las fases y por su posible precipitación, el valor promedio de dureza se modificó.

Capítulo 5.

Referencias.

Referencias.

- [1] Definición de acero. (s. f.). Recuperado 21 de diciembre de 2022, de <https://definicion.de/acero/>
- [2] Maldonado Flores, J. L. M. F. (1996). Aceros y sus aplicaciones. Tesis. <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>
- [3] G. E. Totten, Steel Heat Treatment Handbook Metallurgy and Technologies, 2 ed., Oregon: Taylor & Francis Group, 2006, pp. 2,3.
- [4] Clasificación de los aceros. (s. f.). fceia.unr. Recuperado 2 de febrero de 2023, de <https://usuarios.fceia.unr.edu.ar/~adruker/Clasificaci%F3n%20de%20aceros%20Mat%20y%20Pro.pdf>
- [5] Chatterjee D, “Behind the development of advanced high strength steel (AHSS) including stainless steel for automotive and structural applications – an overview”, in: Mater Sci Metall Eng. 2017
- [6] A. Perez. Notas de curso: Selección de Aceros. FIME-UANL, 2010.
- [7] Perla Alicia Galván G., “soldabilidad de los aceros de ultra-alta resistencia (UHSS) del tipo martensíticos, boro y twip (plasticidad inducida por maclaje) de segunda generación”, tesis de Maestría.
- [8] Rafael Pla Fernando, Samuel Sánchez Caballero, et. al., “Nuevos aceros TWIP/TRIP en los automóviles del futuro”, en: Revista de investigación Editada por Área de Innovación y Desarrollo, S.L., 2012.

[9] García Lázaro, D. (2008). Aceros de ultra alta resistencia: mayor resistencia – menor peso. Centro Zaragoza. Recuperado 9 de enero de 2023, de http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R36_A2.pdf

[10] Monografía de Molibdeno. (2020). SGM. Recuperado 9 de enero de 2023, de https://www.sgm.gob.mx/pdfs/monografias/metalicos/Monografia_de_Molibdeno_2020.pdf

[11] López Amell, O. A. (2005). Estudio dilatométricos de material vitreo utilizado para obtener espuma cerámica. Repositorio. Recuperado 16 de octubre de 2022, de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23150/u281536.pdf?sequence=1>

[12] Oliver Reynoso, a. (s. F.). “efecto de la estructura de colada sobre la formación de austenita en un acero de bajo carbono.” [tesis de maestría]. Instituto Tecnológico De Morelia.

[13] Zang, Z., & Farrar, R. A. (1995). An Atlas of continuous cooling transformations (CCT) diagrams applicable to low carbon low alloy weld metals. London: The Institute of Materials.

[14] Ipohorski, M., & Bozzano, P. B. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. Argentinapciencias. Recuperado 2 de febrero de 2023, de <http://aargentinapciencias.org/wp->

content/uploads/2018/01/RevistasCel/tomo63-3/5-microscopia-electronica-de-barrido-en-la-caracterizacion-de-materiales-cei63-3-2013-5.pdf

[15] López, R. D., Maldonado, A., López, C. e, Guzmán, J. E. & García, M. A. (s. f.). Efecto del Tamaño de Grano Austenítico en el Comportamiento Mecánico para los Aceros AISI 1045 y 4140 Mediante Experimentación y Modelado. Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 7, 2. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/download/4919/6730/>

[16] López B, J., & Vitriago A, J. C. (2011, noviembre). Determinación de la microdureza y la metalurgia de uniones soldadas a tope en función del tipo de revestimiento del electrodo en acero ASTM A-36 y ASTM A-569. mriuc. Recuperado 28 de enero de 2023, de <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/6982/jonalopez.pdf?sequence=1>

[17] Materiales utilizados para la conformación en estado semisólido- Procedimiento experimental. (s. f.). upcommons. Recuperado 28 de enero de 2023, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93359/08Mtbp08de29.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

[18] Consultoría y Pruebas de Materiales S.A. de C.V. (2020, 6 octubre). ASTM E384 - 17 Método de prueba estándar para la dureza por microindentación de materiales. <https://cypma.mx/mecanicas/astm-e384/>

[19] Métodos de Prueba para Determinar el Tamaño de Grano Promedio. (Vol. 96). (s. f.). <https://es.scribd.com/document/488114784/Norma-ASTM-E112>

[20] ASTM A29 Specification - Boltport Fasteners. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2022, de <https://boltport.com/specifications/astm-a29/>