



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFECTO DEL TIEMPO DE DESMOLDEO EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO ASM Hi C
TRATADO TÉRMICAMENTE PARA APLICACIONES DE
MINERÍA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

CARLOS MAURICIO TRUJILLO HERNÁNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

AÑO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Dr. José Alejandro García Hinojosa

VOCAL: Profesor: IQM. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

SECRETARIO: Profesor: M en C. Víctor Antonio Aranda Villada

1er. SUPLENTE: Profesor: IQM. José Alfredo Delgado Álvarez

2° SUPLENTE: Profesor: IQM. Clara Saraid Flores Rosas

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS, LABORATORIO DE METALOGRAFÍA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D,
CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM**

ASESOR DEL TEMA: Dr. José Alejandro García Hinojosa

SUSTENTANTE: Carlos Mauricio Trujillo Hernández

ÍNDICE

1. Introducción	2
1.1 Resumen.....	2
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivos.....	4
2. Antecedentes	7
2.1 Definición de acero.....	7
2.2 Clasificación de aceros	7
2.3 Aceros para aplicaciones de minería	8
2.3.1 Aceros al alto manganeso.....	9
2.3.2 Aceros de baja aleación.....	9
2.3.3 Aceros perlíticos al cromo molibdeno	11
2.3.3.1 Composición química de los Aceros (ASM Hi C)	12
2.4 Influencia de los elementos aleantes	13
2.4.1 Influencia del C	14
2.4.2 Influencia del Si	15
2.4.3 Influencia del Mn	15
2.4.4 Influencia del P y S	16
2.4.5 Influencia del Cromo.....	18
2.4.6 Influencia del Mo	19
2.5 Tratamientos térmicos	20
2.5.1 Tratamientos térmicos aplicables al acero SAE 52100.....	21
2.5.1.1 Recocido	21
2.5.1.2 Normalización	22
2.5.1.3 Temple	22
2.5.1.4 Revenido.....	22
2.6 Aplicaciones	24
3.Desarrollo experimental	26
3.1 Tamaño y composición de las piezas de estudio	26
3.2 Tratamiento térmico aplicado	27
3.3 Planteamiento del experimento	29
3.4 Metodología de trabajo.....	29
4. Resultados	32
4.1 Propiedades Mecánicas.....	32
4.1.1 Ensayo de Tracción	32
4.1.2 Ensayo Charpy (Resistencia al Impacto)	33
4.1.3 Ensayos de Desgaste	34
4.1.4 Ensayo de Dureza Brinell.....	37
4.2 Caracterización Metalográfica.....	39
4.2.1 Metalografías de las piezas	39
4.2.2 Tamaños de grano ASTM	49
4.2.3 Metalografías a altos aumentos	50
4.2.4 Estudios por microscopía Electrónica de Barrido	54
5. Discusión de resultados	63
5.1 Ensayo de Tensión.....	63
5.1.2 Gráficas Esfuerzo-Deformación.....	64
5.2 Ensayo Charpy (Resistencia al impacto).....	65
5.3 Ensayo de Desgaste	66
5.4 Ensayo de Dureza Brinell	67

5.5 Metalografías a las piezas.....	68
5.6 Microscopia Electrónica de Barrido	69
5.7 Discusión	71
Conclusiones.....	75
Referencias	76
Anexos.....	78
Anexo I.....	78
Anexo II.....	83

Capítulo 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

Los materiales que poseen buena resistencia al desgaste son muy importantes para las aplicaciones en la industria minera asociada a las condiciones de trabajo. Esta propiedad depende en gran medida de la composición química del acero y de las condiciones de tratamiento térmico aplicado que controlan las características microestructurales y consecuentemente las propiedades mecánicas.

En el caso de piezas de acero colado, un parámetro importante en la respuesta al tratamiento térmico es el tiempo de desmoldeo después de la etapa de colada y solidificación, ya que esta impacta en la microestructura de la pieza, en particular en piezas de secciones masivas.

En este tipo de aplicaciones están situados los aceros ASM Hi C (High Carbon), que contiene en promedio el 0.8 % de carbono con contenidos de cromo entre 2 y 2.5% para incrementar la dureza de los mismos. El efecto de los elementos aleantes en las propiedades mecánicas de un material ha sido profundamente estudiado por lo que se conoce que algunos elementos (C, Cr, Mo, etc.) favorecen el mejoramiento de las propiedades requeridas para las aplicaciones de minería como lo son la resistencia al desgaste y la resistencia al impacto.

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de un mismo metal, y en particular de los aceros, residen en la composición química de la aleación que los forma y el tipo de tratamiento térmico a los que se les somete. Los

tratamientos térmicos modifican la estructura que forman a los aceros, sin variar la composición química de los mismos.

En el presente trabajo se estudiará el efecto del tiempo de desmoldeo en las propiedades mecánicas, para identificar esta relación se tomaron tres muestras con diferentes tiempos de desmoldeo y se les realizaron diversos ensayos (desgaste, impacto y tensión). Asimismo, se realizaron metalografías a las diferentes muestras para analizar la relación que existe entre las propiedades mecánicas y los cambios en la microestructura

1.2 Justificación

Los materiales que se utilizan en la industria minera están sometidos a desgaste en mayor o menor medida, debido a esto diversos componentes de maquinarias tienen que ser reemplazados con cierta periodicidad lo cual representa un gasto para las empresas de esta rama, por el otro las empresas que se dedican a la fabricación de estos componentes buscan formas de optimizar el proceso sin que se vean afectadas las propiedades mecánicas y la calidad de las piezas.

El propósito de estudiar el efecto del tiempo de desmoldeo sobre las propiedades mecánicas de un acero ASM Hi C tratado térmicamente para aplicaciones de minería es analizar algunas características microestructurales que pueden cambiar dependiendo de la zona de donde se haya obtenido la muestra (centro o borde de la pieza), por lo que es importante que se identifique de qué lugar de la pieza se obtuvieron las muestras, ya que al ser piezas de secciones masivas producidas por fundición puede haber variaciones

microestructurales entre ellas que afectan sus propiedades mecánicas asociadas a las condiciones de solidificación.

Todo esto ayudará a determinar si el tiempo de desmoldeo afecta en general a las piezas de acero colada, si el tiempo de desmoldeo no afectara a las propiedades mecánicas esto conduciría a que los tiempos de desmoldeo se redujeran y la producción aumentaría, por el contrario, si el tiempo de desmoldeo afecta las propiedades mecánicas se tendría que realizar un estudio para determinar el tiempo óptimo de desmoldeo de las piezas.

1.3 Hipótesis

Es posible que el tiempo de desmoldeo de piezas coladas de acero alto carbono afecte las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero ASM Hi C.

1.4 Objetivos

- Estudiar el efecto del tiempo de desmoldeo sobre la respuesta al tratamiento térmico y las propiedades mecánicas, así como la microestructura de un acero denominado ASM Hi C al aplicarle un tratamiento térmico.
- Estudiar las características microestructurales del acero bajo estudio en condiciones de colada.
- Generar información sobre la respuesta y propiedades mecánicas del acero bajo estudio en dos diferentes condiciones de desmoldeo y con tratamiento térmico de normalizado-estabilizado.

- Explicar la diferencia entre propiedades mecánicas asociadas a las diferencias microestructurales para el acero bajo estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

2. ANTECEDENTES

2.1 Definición de acero [1]

Primeramente, antes de comenzar a hablar de los aceros que se utilizan en la industria minera se tiene que definir que es el acero, un acero es una aleación ferrosa con carbono (0.05-2.00% en peso) y ciertas cantidades de otros elementos que le confieren un aumento en las propiedades mecánicas, las aplicaciones para este material son muy extensas debido a la gran variedad de composiciones y tratamientos que se le pueden aplicar.

2.2 Clasificación de aceros [2]

La clasificación de los aceros se puede realizar considerando diferentes aspectos como lo son la composición química, la aplicación, el método de fabricación, etcétera, una clasificación de los aceros es aquella en que estos quedan divididos en 5 grupos: Aceros al carbono, Aceros aleados, Aceros inoxidables, Aceros de herramienta y Aceros Especiales.

Comúnmente se emplean las clasificaciones realizadas por la SAE (Society of Automotive Engineers) y el AISI (American Iron and Steel Institute) las cuales son instituciones encargadas de generar estándares, (en los cuales se especifican las composiciones químicas de cada acero, propiedades mecánicas, métodos de prueba, etc.), con el objetivo de facilitar la localización de información relacionada con los aceros y encontrar equivalencias con aceros fabricados en otras partes del mundo bajo otras especificaciones.

2.3 Aceros para aplicaciones de minería [3, 4]

Los materiales que se utilizan en la industria minera están sometidos a desgaste en mayor o menor medida, el desgaste se produce cuando los materiales se frotan entre sí durante un período de tiempo, algún tipo de desgaste es intencional como lijar, esmerilar y pulir, sin embargo, el desgaste no intencionado puede provocar el fallo de los componentes. Si bien el acero en general tiene una excelente resistencia a la abrasión, no todos los aceros son iguales, existen varios tipos de aceros que se fabrican especialmente para prevenir el desgaste, conocidos como aceros resistentes a la abrasión.

En la actualidad existen una gran variedad de aceros resistentes al desgaste, dependiendo de la aplicación que se le dará se analizan las propiedades mecánicas y la composición química para identificar qué tipo de acero se puede desempeñar de manera óptima en dicha aplicación, entre las principales familias de aceros resistentes al desgaste se encuentran:

- Aceros al alto manganeso
- Aceros de baja aleación
- Aceros perlíticos al cromo molibdeno

La variedad de composiciones existe debido a la complejidad de la forma de la pieza fundida y su susceptibilidad al agrietamiento durante el enfriamiento, el grosor de la pieza fundida y la profundidad a la que debe ocurrir el endurecimiento.

2.3.1 Aceros al alto manganeso

El acero de alto manganeso es un tipo de acero con un contenido de manganeso de 3 ~ 27%. Se aplica en la industria basadas en diversas propiedades, tales como alta resistencia, tenacidad a baja temperatura, resistencia al desgaste. El acero austenítico al manganeso es un material muy resistente y dúctil que tiene una gran resistencia a los impactos fuertes. El acero al manganeso es un material relativamente blando que tiene una dureza inicial de unos 210 - 238 HBN aproximadamente. La resistencia al desgaste del manganeso se basa en la acritud (endurecimiento de los metales al ser trabajados en frío).

Cuando la superficie del acero al manganeso recibe impactos fuertes o cargas de compresión, la superficie se endurece mientras la base del material se mantiene resistente. El grosor y la dureza de la superficie endurecida varía en función de la aplicación y del tipo de acero al manganeso. El grosor de la capa de material endurecido es de entre unos 10 a 15 mm y la dureza puede llegar a ser de 563 HBN en aplicaciones primarias. En aplicaciones de triturado fino, la capa endurecida es más fina y menos dura, alrededor de los 332 - 470 HBN. Las especificaciones de los diferentes grados de este acero se encuentran en la norma ASTM A128.

2.3.2 Aceros de baja aleación

Los aceros de baja aleación contienen una cantidad de elementos aleantes que no supera el 8%. Este tipo de materiales han sido desarrollados y utilizados extensivamente para requerimientos especiales donde no es posible utilizar

aceros al carbono corrientes con poca capacidad de endurecimiento. Al aumentar el contenido de elementos aleantes se consiguen varias mejoras tales como aumentar el grado de endurecimiento, aumentar su resistencia al desgaste, proporcionar resistencia al impacto, lograr buena maquinabilidad incluso con alta durezas, mejorar las propiedades mecánicas en temperaturas elevadas o muy bajas y lograr una resistencia a la corrosión superior a la de un acero al carbono ordinario; estos materiales son producidos para encontrar resistencias a la tracción que oscilan entre 485 a 1380 MPa junto con algunas características especiales.

Los aceros de baja aleación son utilizados en herramientas de máquina, unidades de transporte de alta velocidad, turbinas válvulas y fijaciones rieles, automóviles excavadoras y equipo para procesos químicos, maquinaria de pulpa y papeles, equipos de refinería, maquinaria de telas y varios tipos de equipos marinos. Estas aleaciones también se usan en el campo aeronáutico. Los aceros de baja aleación pueden dividirse en dos grupos de acuerdo a su uso: aquellos utilizados para partes estructurales de elevada resistencia, capacidad de endurecimiento y tenacidad y aquellos que son resistentes a la abrasión o al ataque corrosivo en altas o bajas temperaturas de servicio. No puede definirse una distinción rigurosa entre ambos grupos porque la mayoría funcionan en ambos campos. Las especificaciones de los diferentes grados de este acero se encuentran en las normas ASTM A128, A148 y A958.

2.3.3 Aceros perlíticos al cromo molibdeno

La microestructura perlítica de este tipo de aceros está formada por láminas alternadas de ferrita y cementita (Fe_3C) llamada perlita. En condiciones de equilibrio, la fase de carburo representa solo el 11% del volumen de la microestructura, pero sus efectos son de gran alcance, en comparación con el acero de baja aleación, la presencia de 11% de Fe_3C aumenta el rendimiento y la resistencia a la tracción a 90 y 150 ksi (620 y 1030 MPa), respectivamente, pero reduce el porcentaje de elongación por debajo del 5%. La fase de carburo mejora la resistencia a la abrasión. Si se ha demostrado que la perlita tiene una resistencia a la abrasión equivalente a la de un acero martensítico.

Una característica del acero perlítico al cromo molibdeno que generalmente no se informa es su sorprendente capacidad de endurecimiento, piezas fundidas llamadas rejillas de cabeza divisoria compartimientos separados en el molino de bolas que se utilizan para la molienda del cemento y como consecuencia, actúan como una pared de contención para un extremo de la cascada de bolas, en un caso particular, la acción repetida de las bolas de 3.5 pulgadas (9 cm) de diámetro en las rejillas resultó en un endurecimiento por trabajo de dureza original de 310 BHN (33 HRC) hasta aproximadamente 480 BHN (50 HRC).

Esta capacidad de endurecimiento del trabajo combinada con la presencia de carburo son las razones por las cuales el acero perlítico al cromo molibdeno ha tenido éxito en la industria de procesamiento de materiales y cemento. Al acero perlítico al cromo molibdeno de colada se le añaden solo pequeñas cantidades de elementos de aleación de bajo costo y no requiere tratamientos térmicos

sofisticados. Por lo tanto, a menudo resultan ser una solución económica para problemas de desgaste por abrasión.

El grado de bajo carbono que tiene un contenido de carbono de alrededor del 0,6% después de la austenización y el enfriamiento por aire, muestra una microestructura completamente perlítica con un rango de dureza Brinell de 275 - 325 (23 - 29 HRC).

El grado de alto carbono que tiene un contenido de carbono de alrededor del 0,8%, después del tratamiento térmico, muestra carburos hipereutécticos y perlita no resuelta extremadamente fina, lo que da como resultado un rango Brinell de 352 - 401 (38 - 43 HRC) Sin embargo, los valores medidos de tenacidad a la fractura disminuyen con el contenido de carbono, por lo que es necesario controlar el enfriamiento de esta clase de aceros resistentes a la abrasión para producir la microestructura de perlita, ya que la bainita y la martensita pueden formarse si el enfriamiento es demasiado rápido y su alta dureza baja la tenacidad del material.

2.3.3.1 Composición química de los Aceros (ASM Hi C)

La composición química de este tipo de aceros es uno de los atributos que lo hacen más resistente al desgaste que otros tipos de acero, existen varias aleaciones que pueden usarse para aumentar la resistencia a la abrasión. El carbono ayuda a bloquear las dislocaciones, lo que aumenta la dureza y la resistencia de un acero, también permite que el acero forme microestructuras con una mayor dureza. El cromo y el manganeso también se agregan a los

aceros resistentes a la abrasión para ayudar a reducir los efectos negativos causados por el desgaste.

Las piezas analizadas a lo largo del presente trabajo pertenecen a la familia de aceros perlíticos al cromo molibdeno en concreto al grado ASM Hi C, los datos disponibles indican que existen al menos tres grados de aceros perlíticos al cromo molibdeno y se enumeran en la tabla 1

Tabla 1 Composición química de los aceros perlíticos al cromo molibdeno

Grado	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	HBN
Low C	0.55	0.6	0.3	0.2	2.0	0.3	0.03	0.03	275
	0.65	0.9	0.7	max	2.5	0.4	max	max	325
Med C	0.65	0.6	0.3	0.2	2.0	0.3	0.03	0.03	321
	0.75	0.9	0.7	max	2.5	0.4	max	max	363
Hi C	0.75	0.6	0.3	0.2	2.0	0.3	0.03	0.03	350
	0.85	0.9	0.7	max	2.5	0.4	max	max	400

2.4 Influencia de los elementos aleantes [5]

Como ya se menciona el efecto de los elementos químicos en las propiedades mecánicas de un acero ha sido profundamente estudiado por lo que se conoce que algunos elementos (C, Cr, Mo, etc.) favorecen el mejoramiento de las propiedades requeridas para las aplicaciones de minería como lo son la resistencia al desgaste y la resistencia al impacto, estos elementos se pueden dividir en dos grupos, los elementos de aleación y los elementos aleantes.

Los elementos de aleación son aquellos que se encuentran de manera intrínseca en los aceros (C, Si, Mn, S y P) que provienen del proceso de fabricación, también se agregan de manera intencional para incrementar ciertas

características de interés, a continuación, se hace mención de algunos de los elementos más importantes.

2.4.1 Influencia del C

El carbono es el elemento más importante en el acero, el contenido de carbono puede oscilar entre 0.05% a 2%, éste controla la dureza y resistencia del material, así como la respuesta al tratamiento térmico (endurecimiento), los aceros se pueden clasificar por su contenido de carbono: aceros al bajo carbono (0.05% a 0.25% en peso de carbono), aceros al medio carbono (0.25% a 0.60% en peso de carbono) y aceros al alto carbono (0.60% a 2.0% en peso de carbono). Es esencial que el contenido de carbono sea superior a 0.40% en los aceros que deben endurecerse mediante tratamiento térmico ya que esto favorece la respuesta del material al ciclo térmico.

Los aceros que contienen menos de 0.8% de carbono se llaman aceros hipoeutectoides, mientras que los aceros que contienen de 0.8% de carbono en adelante se les denomina aceros hipereutectoide.

Dependiendo del contenido de carbono la morfología de las estructuras observadas a temperatura ambiente varía, si el contenido de carbono es bajo la estructura será predominantemente ferrita (solución sólida de hierro y carbono), si el contenido de carbono es de 0.8% la estructura será perlita, la cual es un microconstituyente formado por láminas intercaladas de cementita (carburo de hierro Fe_3C) y ferrita, aparece siempre que haya un enfriamiento lento, por debajo de los 720° C. Según la velocidad de enfriamiento estas láminas aparecen más o menos separadas y finalmente si el contenido de carbono es

superior a 0.8% la pieza presenta una matriz predominantemente perlítica con ciertas cantidades de cementita precipitada en los bordes de grano.

2.4.2 Influencia del Si

El silicio es uno de los principales desoxidantes para el acero. El silicio ayuda a eliminar las burbujas de oxígeno del acero fundido. Es el elemento que se usa más comúnmente para producir aceros, y normalmente aparece en cantidades menores al 0.40%, generalmente solo pequeñas cantidades (0.20%) están presentes en el acero laminado cuando se usa como desoxidante. Sin embargo, en las piezas de fundición de acero, el 0.35% al 1.00% está comúnmente presente.

El silicio se disuelve en hierro y tiende a fortalecerlo. Algunos metales de relleno pueden contener hasta un 1% para proporcionar una mejor limpieza y desoxidación para soldar en superficies contaminadas. La disminución resultante en la ductilidad podría resentir los problemas de agrietamiento.

2.4.3 Influencia del Mn

El manganeso podría ser el segundo elemento más importante después del carbono sobre el acero, tiene efectos similares a los del carbono, y por lo general se usan estos dos elementos en combinación para obtener un material con las propiedades deseadas. El manganeso es una necesidad para el proceso de laminación en caliente de acero por su combinación con oxígeno y azufre.

Sus efectos principales son:

- Es un desoxidante suave que actúa como un limpiador que elimina el azufre y el oxígeno de la masa fundida y los deposita.
- Aumenta la capacidad de endurecimiento y la resistencia a la tracción, pero disminuye la ductilidad.
- Se combina con azufre para formar sulfuros de manganeso globulares, esenciales en los aceros de corte libre para una buena maquinabilidad.

Los aceros generalmente contienen al menos 0.30% de manganeso, sin embargo, se pueden encontrar cantidades de hasta el 1.5% en algunos aceros al carbono.

El manganeso también tiende a aumentar la tasa de penetración de carbono durante la carburación y actúa como un agente desoxidante suave. Sin embargo, cuando el carbono y el manganeso son demasiado altos, comienza la fragilización. El manganeso es capaz de formar sulfuro de manganeso (MnS) con el azufre, lo que es beneficioso para el mecanizado. Al mismo tiempo, contrarresta la fragilidad del azufre y es beneficioso para el acabado de la superficie del acero al carbono.

2.4.4 Influencia del P y S

El fósforo tendrá varios efectos sobre el acero dependiendo de la concentración. La cantidad máxima de fósforo en el acero de grado superior está entre el 0.03% y el 0.05% debido al hecho de que es perjudicial. Hasta un 0,10% de fósforo en aceros de baja aleación y alta resistencia aumentará la resistencia y mejorará la resistencia del acero contra la corrosión. La

posibilidad de fragilidad aumenta cuando el contenido en acero endurecido es demasiado alto. A pesar de que la resistencia y la dureza mejoran, la ductilidad y la resistencia disminuyen.

La maquinabilidad se mejora en el acero de corte libre, pero se pueden producir fisuras frágiles y/o de soldadura durante la soldadura si el contenido de fósforo es más del 0.04%. El fósforo también afecta el espesor de la capa de zinc cuando se galvaniza acero.

El azufre se considera normalmente como una impureza y tiene un efecto adverso en las propiedades de impacto cuando un acero es alto en azufre y bajo en manganeso. El azufre mejora la maquinabilidad, pero reduce la ductilidad transversal y la resistencia al impacto con muescas y tiene pocos efectos sobre las propiedades mecánicas longitudinales. Su contenido está limitado al 0,05% en aceros, pero se agrega a los aceros de corte libre en una cantidad de hasta el 0,35% con el aumento del contenido de manganeso para contrarrestar cualquier efecto perjudicial, ya que la adición de azufre en cantidades de 0.10% a 0.30% tenderá a mejorar Maquinabilidad de un acero. Dichos tipos se pueden denominar "resulfurados" o "maquinados libres". Los aceros de corte libre tienen azufre agregado para mejorar la maquinabilidad, generalmente hasta un máximo de 0,35%.

2.4.5 Influencia del Cromo

El cromo aumenta la capacidad de endurecimiento del acero, mientras. La resistencia a la tracción del acero aumenta de 8 a 100 N / m² por cada 1% de Cr agregado.

Normalmente, el cromo se agrega al acero para aumentar la resistencia a la oxidación y para mejorar la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a la corrosión de los aceros aumenta considerablemente a un nivel superior al 12% en cromo. El cromo forma una capa de óxido muy coherente en la superficie del acero que evita la oxidación adicional y, por lo tanto, proporciona resistencia a la corrosión en los aceros.

Como elemento de endurecimiento, el cromo se agrega frecuentemente con un elemento de endurecimiento como níquel para producir propiedades mecánicas superiores. A temperaturas más altas, el cromo contribuye con una mayor resistencia. El cromo es un formador de carburo fuerte, los carburos complejos de cromo-hierro se disuelven lentamente en la austenita y, por lo tanto, se requiere un tiempo de calentamiento suficiente antes del enfriamiento de estos aceros.

Al igual que con el manganeso, el cromo tiene una tendencia a aumentar la penetración de la dureza. De hecho, el cromo tiene muchos efectos interesantes sobre el acero. Cuando se usa 5% de cromo o más junto con manganeso, la velocidad de enfriamiento crítico se reduce hasta el punto en que el acero se endurece al aire. El cromo también puede aumentar la tenacidad del acero, así como la resistencia al desgaste. Probablemente uno

de los efectos más conocidos del cromo sobre el acero es la tendencia a resistir las manchas y la corrosión. Los aceros con un 12% o más de cromo se conocen como aceros inoxidables.

2.4.6 Influencia del Mo

El molibdeno tiene efectos similares al manganeso y el cromo, y se usa a menudo en combinación con uno u otro. Este elemento es un formador de carburo fuerte y suele estar presente en los aceros de aleación en cantidades inferiores al 1%. Aumenta la capacidad de endurecimiento y la resistencia a la temperatura elevada y también mejora la resistencia a la corrosión, así como el aumento de la resistencia a la fluencia. Se agrega a los aceros inoxidables para aumentar su resistencia a la corrosión y también se usa en aceros para herramientas de alta velocidad.

Las adiciones de molibdeno a los aceros al manganeso provocan varios cambios. Primero se baja la temperatura de inicio de martensita que estabiliza aún más la austenita y retarda la precipitación de carburo, las adiciones de molibdeno cambian la morfología de los carburos que se forman durante el recalentamiento después de que el material haya tenido un tratamiento de solución, típicamente se forman películas de borde de grano de carburos aciculares, pero después de agregar molibdeno los carburos los precipitados se unen y dispersan a través de los granos.

Otro beneficio de las adiciones de molibdeno se puede mejorar las propiedades mecánicas fundidas. Esto puede ser un beneficio real durante la producción de fundición. En los grados de carbono más altos, el molibdeno aumentará la tendencia a la fusión incipiente, por lo que se debe tener cuidado para evitar esto, ya que las propiedades mecánicas resultantes se verán gravemente disminuidas.

2.5 Tratamientos térmicos [6,7]

El tratamiento térmico es otro factor que ayuda al acero a resistir la abrasión, el acero resistente a la abrasión debe tener una microestructura que le permita tener una alta dureza, esto se logra, en parte, agregando los elementos de aleación adecuados, sin embargo, esto solo no es suficiente para garantizar que se forme la microestructura adecuada. El acero también debe someterse a un proceso de calentamiento y enfriamiento rápido para formar microestructuras como la martensita y la bainita, que le dan al acero los valores de dureza requeridos.

Esta clase de aceros (Aceros ASM Hi C) deriva casi toda su resistencia a la abrasión de las duras fases finales logradas por el tratamiento térmico. El tratamiento térmico utilizado para producir las propiedades requeridas es un tratamiento de austenización, generalmente entre 870 y 1040 °C, seguido de un enfriamiento en agua, aceite o aire forzado a producir martensita y / o bainita. Finalmente, se realiza un tratamiento de revenido en un rango de 175 y 650 °C, dependiendo de la dureza final requerida para la aplicación dada. La versatilidad en la producción de martensita revenida y algunas bainitas que

tienen una dureza que varía desde 615 BHN (58 HRC) hasta 285 HBN (30 HRC) es la mayor ventaja del acero fundido templado y revenido.

El manganeso y el molibdeno se agregan principalmente como agentes de endurecimiento en piezas de fundición de sección más gruesa, mientras que el níquel no solo contribuye a la capacidad de endurecimiento sino también a la tenacidad, la composición química del acero colado debe de ser adaptada para la aplicación específica para optimizar el costo y el rendimiento.

2.5.1 Tratamientos térmicos aplicables al acero SAE 52100 [8]

Debido a la escasa información publicada acerca de los aceros perlíticos al cromo molibdeno se optó por utilizar la información del acero comercial SAE 52100 el cual posee la composición química más cercana a las piezas bajo estudio, además de poseer también propiedades y aplicaciones similares.

Un acero particularmente utilizado para aplicaciones de resistencia al desgaste es el SAE 52100 de composición química: C (0,98 - 1,10), Si (0,15 - 0,35), Mn (0,25 - 0,45), Cr (1,30 - 1,60).

2.5.1.1 Recocido

Por su alto contenido de carbono el acero 52100 deben someterse a un recocido de esferoidización para optimizar su maquinabilidad. La esferoidización se realiza alrededor de 750 °C durante tiempos que oscilan entre 15 y 20 horas y dejar enfriar en el horno.

2.5.1.2 Normalización

El tratamiento debe calentarse a una temperatura de 870 – 890 °C durante al menos 1 hora por cada 25 mm de espesor de pieza. El método de enfriamiento es aire o en casos especiales se puede usar aire forzado.

2.5.1.3 Temple

La austenización debe llevarse a cabo entre 840 a 850 °C, manteniendo el tiempo necesario para homogeneizar la temperatura en la sección transversal y el enfriamiento en aceite.

2.5.1.4 Revenido

Debe hacerse inmediatamente después del temple. El revenido se realiza a temperaturas entre 120 - 200 °C. La temperatura de revenido habitual es de alrededor de 150 °C. En estas condiciones no hay caída significativa de la dureza. En un revenido a 180 °C aproximadamente la dureza puede caer de 1 a 2 puntos de HRC. La variación de dureza en función de la curva de temperatura de revenido se muestra continuación.

En la figura 1 se muestra el diagrama de transformación isotérmica del acero E52100

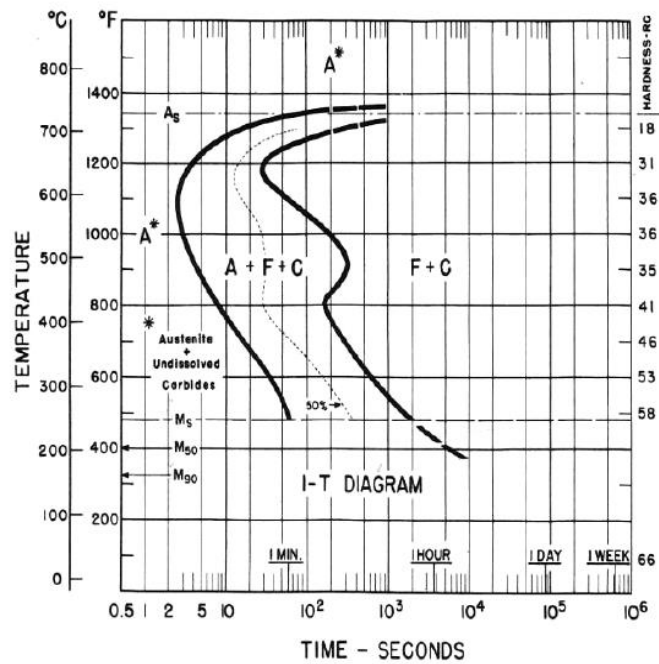


Figura 1 Diagrama de transformación isotérmica (TTT) del acero E52100 [9]

En la figura 2 se muestra la influencia de la temperatura del revenido en la dureza del acero SAE 52100 después del temple

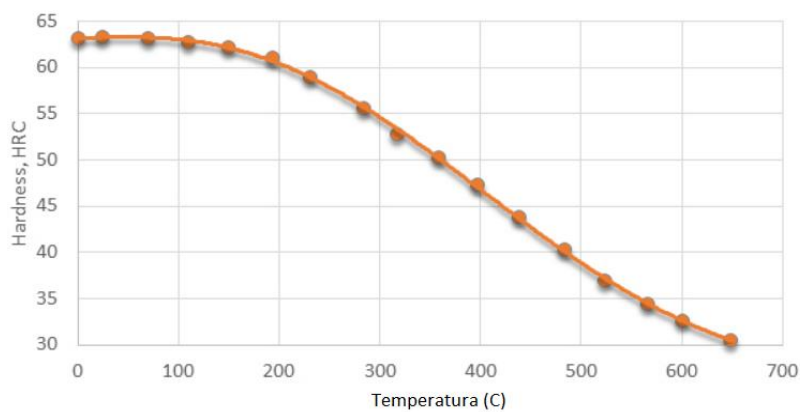


Figura 2 Influencia de la temperatura del revenido en la dureza del acero SAE 52100 [8]

2.6 Aplicaciones

Los aceros desgaste tienen aplicación en diversos campos de la ingeniería mecánica como automoción, transporte, minería y movimientos de tierra, por ejemplo:

- Remolques y contenedores
- Palas para excavadoras y máquinas de movimiento de tierras
- Piezas de desgaste en minería
- Plataformas y estructuras
- Tolvas, alimentadores

Capítulo 3
Desarrollo
experimental

3.DESARROLLO EXPERIMENTAL

A lo largo de este capítulo se describirá la metodología empleada para estudiar el efecto del tiempo de desmoldeo sobre la respuesta al tratamiento térmico.

3.1 Tamaño y composición de las piezas de estudio

Primeramente, se fabricó la pieza mostrada en la Figura 3 para estudiar el efecto del tiempo de desmoldeo sobre la respuesta al tratamiento térmico, las propiedades mecánicas y la microestructura del acero bajo estudio el cual se emplea en la industria minera.

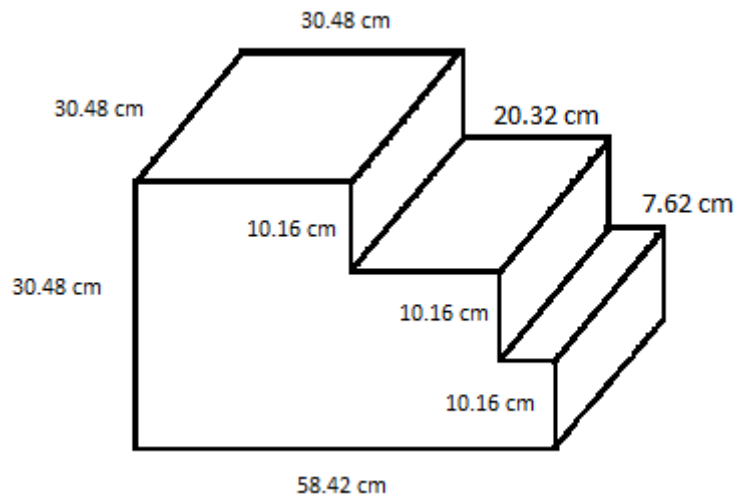


Figura 3 Dimensiones de las piezas coladas de donde se tomaron las muestras.

La pieza fue hecha en molde de arena aglutinada por el proceso de caja fría, de acuerdo al proceso que utiliza actualmente la empresa. El peso aproximado de la pieza incluyendo los sistemas de colada y alimentación fue de 800 kg y se colaron tres piezas, una en condiciones de colada, a la segunda se le aplicó un tratamiento térmico después de 16 horas de desmoldeo y a la tercera también

se le aplicó el mismo tratamiento térmico, pero después de 24 horas de desmoldeo.

Las piezas fabricadas tienen la composición química mostrada en la tabla 2, se obtuvo por espectrometría de emisión atómica.

Tabla 2. Composición química de las piezas fabricadas.

Elementos	Especificación ASM Hi C	Pieza con 16 horas de desmoldeo *CTT	Pieza con 24 horas de desmoldeo con *CTT	Pieza con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)
C	0.75 - 0.85	0.8	0.83	0.82
Mn	0.60 - 0.90	0.7	0.74	0.73
Si	0.30 - 0.70	0.43	0.44	0.39
P	0.03 Max.	0.017	0.018	0.017
S	0.03 Max.	0.016	0.025	0.018
Ni	0.20 Max.	0.054	0.07	0.07
Cr	2.00 - 2.50	2.26	2.21	2.11
Mo	0.30 - 0.40	0.34	0.35	0.34
Cu	Residual	0.07	0.11	0.08
Al	0.12 Max.	0.11	0.085	0.063

* CTT; Con Tratamiento Térmico

3.2 Tratamiento térmico aplicado

A continuación, se describen las condiciones del ciclo térmico aplicado al acero bajo estudio.

- 1) Condiciones de colada. Temperatura de colada 1510 °C colada en molde de arena y desmoldeada después de 30 horas de la colada.
- 2) Desmoldeado después de 16 hrs y con tratamiento térmico. Condiciones de colada similar al anterior y con tratamiento térmico: 5 horas de austenización a 1010 °C enfriado con aire forzado durante 50 minutos y

50 minutos al aire natural después se calentó a 480 °C por 3 horas y se enfrió al aire.

- 3) Desmoldeado después de 24 hrs y con tratamiento térmico. Condiciones de colada similar al anterior y con tratamiento térmico: 5 horas de austenización a 1000 °C enfriado con aire forzado durante 50 minutos y 50 minutos al aire natural después se calentó a 480 °C por 3 horas y se enfrió al aire.

La figura 4 muestra el ciclo del tratamiento térmico aplicado a las piezas bajo estudio, (A-B) 5 horas de austenización a 1000 °C, (B-C) 50 min de enfriamiento con aire forzado, (C-D) 50 min de enfriamiento con aire, (D-E) calentamiento a 480 °C, (E-F) 3 horas de permanencia a 480 °C y (F-G) enfriamiento al aire.



Figura 4 Ciclo del tratamiento térmico aplicado a las piezas fabricadas.

3.3 Planteamiento del experimento

Para poder estudiar con mayor detenimiento el efecto del tiempo de desmoldeo sobre la respuesta del material al tratamiento térmico se decidió tomar una muestra de la parte superficial, media y central de cada una de las piezas fabricadas.

De esta manera las muestras de la pieza con 30 horas de desmoldeo (denominada en condición de colada) serán consideradas como la microestructura de referencia y las muestras tratadas térmicamente se evaluaron para determinar si hay una variación en la respuesta al tratamiento térmico debido al tiempo de desmoldeo (16 y 24 horas).

3.4 Metodología de trabajo

La metodología que se siguió para realizar la parte experimental fue la siguiente:

Parte 1. Se evaluaron las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión, resistencia al impacto, dureza y resistencia al desgaste) y características microestructurales del acero en condiciones de colada.

- El ensayo fue realizado de acuerdo la norma ASTM-E8M, en una máquina universal de ensayos mecánicos servohidráulica, marca MTS, Modelo 810, que cuenta con el sistema de adquisición de datos Testlink 2.0. Los diámetros iniciales y finales de la probeta fueron determinadas por medio de un calibrador digital marca Starret, modelo No. 723.

- El ensayo de impacto fue realizado de acuerdo la norma ASTM-E23, en una máquina de impacto Mohr & Federhaff A.G., con un péndulo de 20 Kg. (44.092 lb).
- El ensayo de desgaste se realizó en una máquina de desgaste con un rodillo de acero templado con un diámetro de 60 mm, las muestras cilíndricas de 6 mm de diámetro y 25 mm de altura se colocan sobre el rodillo con una carga de prueba de 5 Kg. (49 N) con un valor promedio de 1 060 rpm, durante 2 horas de prueba, el peso de la muestra se registró cada 30 minutos, para generar gráficos de pérdida de peso contra tiempo.
- El ensayo de dureza se realizó en un durómetro de la marca “Laryee” modelo HBE-3000 con una carga de 750 Kg utilizando un indentador esférico de 5 mm de carburo de tungsteno (WC), con un tiempo de carga de 30 segundos.

Parte 2. Se evaluaron las propiedades mecánicas citadas en la parte 1, así como la microestructura de las muestras de la pieza desmoldeada después de 16 horas de colada y con tratamiento térmico de normalizado-estabilizado.

Parte 3. Similar al punto anterior, para las muestras de la pieza desmoldeada 24 horas después de la colada y con el mismo tratamiento térmico.

Parte 4. Se realizó la evaluación metalográfica de las piezas para comparar sus microestructuras y determinar la influencia del tiempo de desmoldeo sobre las propiedades y microestructura del acero bajo estudio.

Paso 5. Se analizaron las piezas por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB): espaciamento interlaminar de la perlita.

Capítulo 4

Resultados

4. RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la parte experimental, se han dividido en dos partes: Propiedades mecánicas y caracterización metalográfica.

4.1 Propiedades Mecánicas

4.1.1 Ensayo de Tracción [10]

El ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM-E8M.

Los resultados del ensayo de tensión se presentan en la tabla 3 para tres probetas para cada condición citada, es decir, tres probetas para la pieza de colada, tres probetas para la pieza desmoldeada después de 16 horas y con tratamiento térmico, finalmente tres probetas para la pieza desmoldeada después de 24 horas y con tratamiento térmico.

Tabla 3. Resultados del ensayo de tensión, propiedades tensiles.

Probeta	Resistencia a la fluencia al 0.2%, (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa).	Resistencia a la ruptura (MPa)	% elongación (en 50 mm ¹)	%. reducción de área
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)					
I	460	840	840	3.55	0.38
II	495	743	743	2.96	1.66
III	500	757	757	3.13	0.22
Promedio		780	780	3.21	0.75
		V = 52.43			
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico					
I	1000	1191	1191	3.96	1.39
II	870	1140	1140	3.54	0.38
III	750	1142	1142	4.17	1.97
Promedio		1157.67	1157.67	3.89	1.25
		V = 28.88			
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico					
I	680	776	776	1.35	1.77
II	660	687	687	0.58	1.08
III	740	1008	1008	4.07	3.01
Promedio		823.6	823.67	2.00	1.95
		V = 165.72			

En las figuras 5 a 13 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las muestras estudiadas las cuales se encuentran en el **Anexo I**.

4.1.2 Ensayo Charpy (Resistencia al Impacto) [11]

Los resultados del ensayo de impacto (Charpy) practicado a las nueve probetas de acero identificadas de acuerdo con lo anterior mencionado se muestran a continuación. El ensayo fue realizado de acuerdo la norma ASTM-E23, en una máquina de impacto Mohr & Federhaff A.G., con un péndulo de 20 Kg. (44.092 lb).

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del Ensayo Charpy.

Probeta	Resistencia al impacto Ftlbf (Kpm)
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)	
I	2 (0.276)
II	2 (0.276)
III	2 (0.276)
Promedio	2 (0.276)
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico	
I	3 (0.414)
II	3 (0.414)
III	2 (0.276)
Promedio	2.66 (0.367)
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico	
I	1 (0.138)
II	2 (0.276)
III	2* (0.276)
Promedio	1.67 (0.230)

*Ya que los valores dieron muy bajos en Kpm (Kilopondios-metro) en la primera prueba. Estos se convirtieron a ftlbf (pies-libra fuerza). La conversión es 1 Kpm = 7.233 ftlbf.

4.1.3 Ensayos de Desgaste [12]

El ensayo fue realizado de acuerdo la norma ASTM G99-95 modificado, en una máquina de desgaste con un rodillo de acero templado, en muestras cilíndricas de 6 mm de diámetro y 25 mm de altura, la carga de la prueba fue de 5 Kg. (49 N) a un valor promedio de 1 060 rpm, durante 120 minutos de prueba.

Los resultados de la pérdida de peso se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Pérdidas de peso obtenidas en el ensayo de desgaste.

Probeta	Peso inicial (g)	Tiempo de prueba (min)			
		Pérdida de peso (g)			
		30	60	90	120
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)					
I	5.800	0.037	0.173	0.251	0.261
II	5.789	0.020	0.127	0.242	0.279
III	5.801	0.023	0.117	0.240	0.366
Promedio					0.302
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico					
I	5.777	0.046	0.089	0.126	0.155
II	5.805	0.034	0.075	0.115	0.178
III	5.571	0.067	0.150	0.196	0.286
Promedio					0.206
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico					
I	5.787	0.055	0.109	0.165	0.217
II	5.784	0.032	0.090	0.190	0.258
III	5.779	0.057	0.142	0.226	0.323
Promedio					0.266

*Diámetro del rodillo 60 mm.

Las curvas de desgaste se presentan de las figuras 14 a la 16.

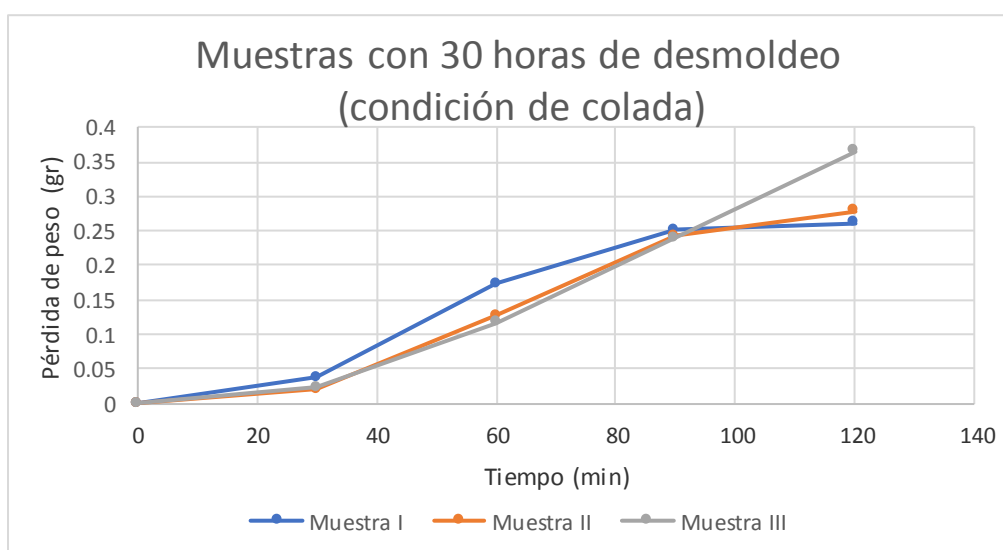


Figura 14. Curvas comparativas de desgaste para las probetas Condición de colada I, II y III

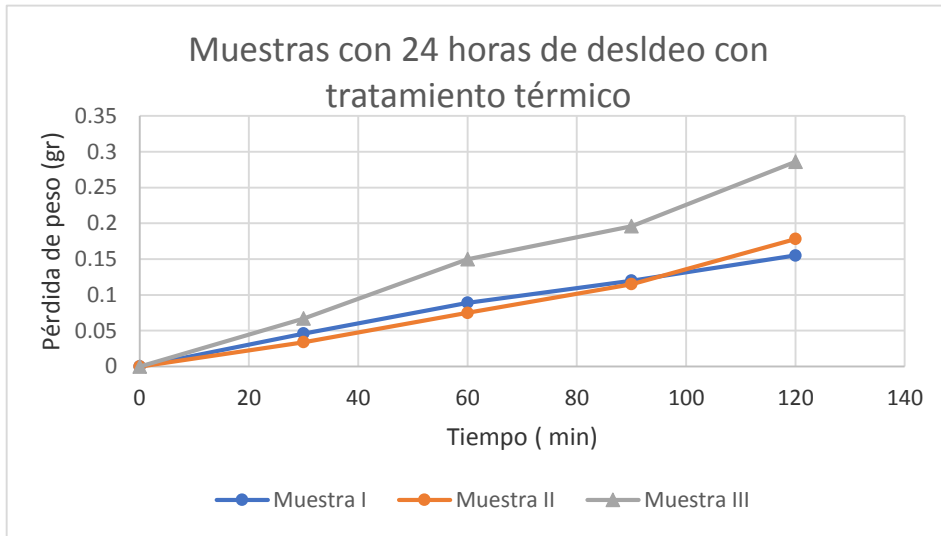


Figura 15. Curvas comparativas de desgaste para las probetas con 24 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico I, II y III.

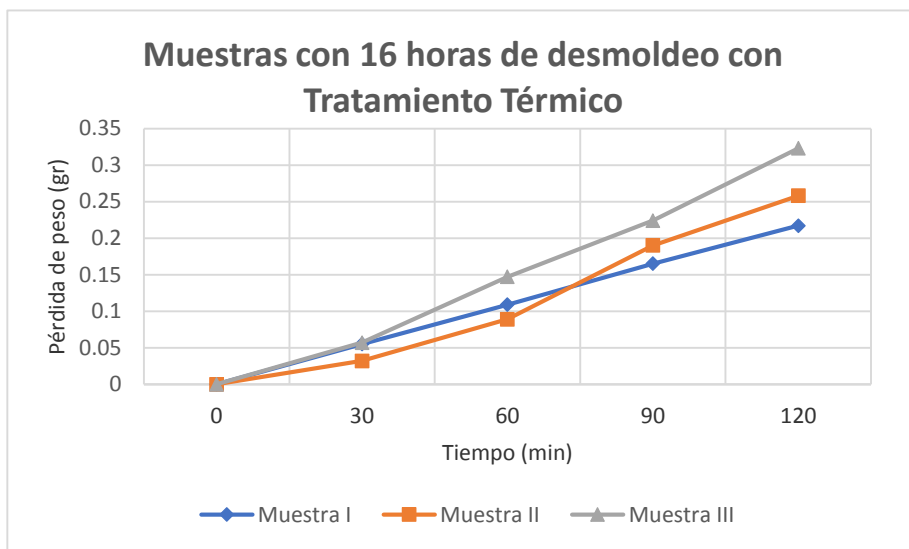


Figura 16. Curvas comparativas de desgaste para las probetas con 16 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico I, II y III.

4.1.4 Ensayo de Dureza Brinell [13]

El ensayo fue realizado de acuerdo la norma ASTM E10, en un durómetro de la marca Laryee modelo HBE-3000. Las condiciones del ensayo fueron las siguientes, carga 750 Kg utilizando un indentador esférico de 5 mm de carburo de tungsteno (WC) con un tiempo de carga de 30 segundos.

Los resultados de los diámetros de las huellas dejadas por el indentador, así como la dureza de las muestras se están en la tabla 6.

La ecuación para calcular la dureza Brinell fue la siguiente:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2 P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde:

HBW = Dureza Brinell, bola de WC

P = Carga 750 kg

D = Diámetro del indentador utilizado 5mm

d = Diámetro de la huella [mm]

Tabla 6 Diámetros de las huellas y dureza de las piezas.

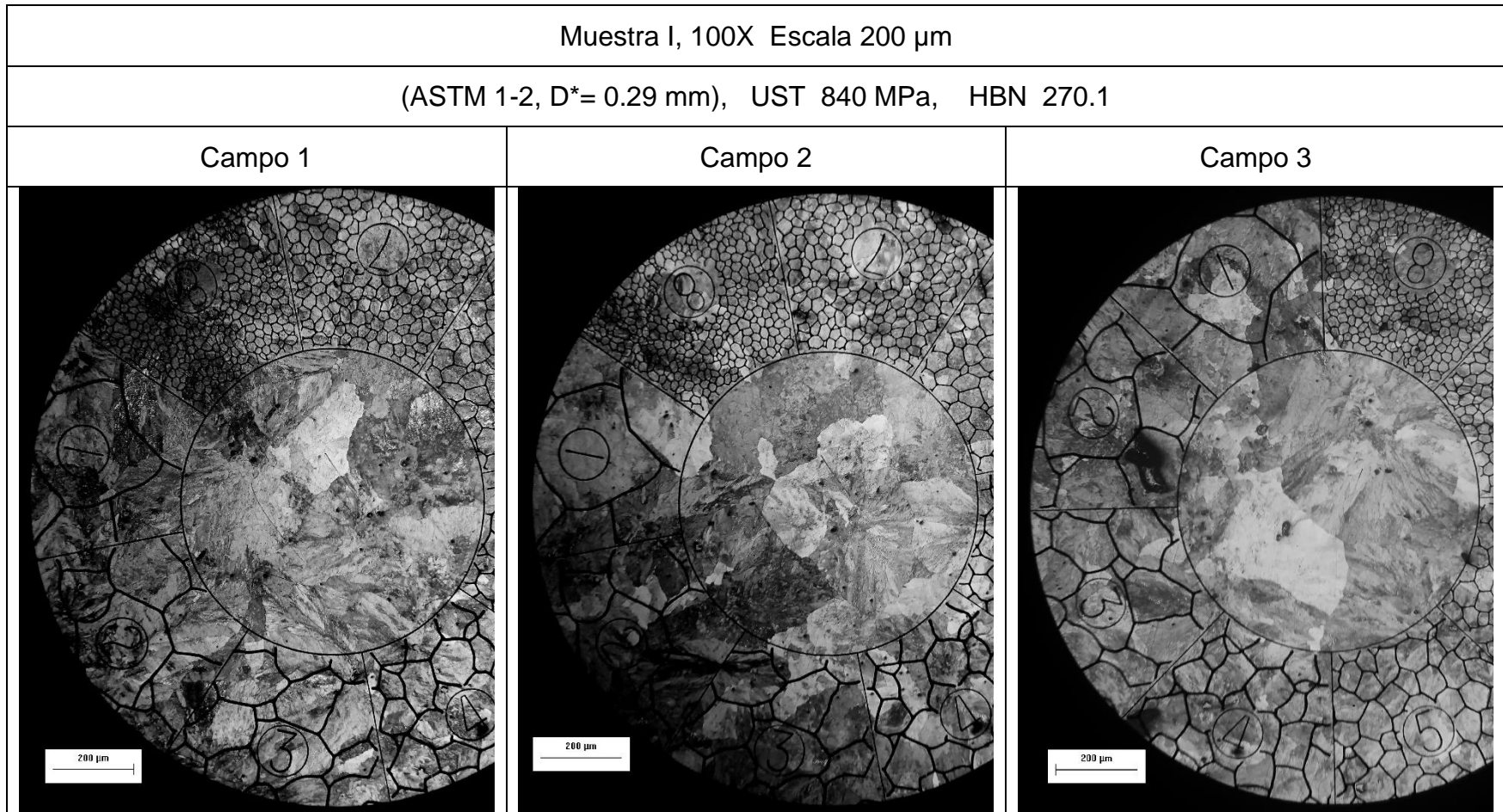
Pieza	Huella	∅ Vertical	∅ Horizontal	∅ Transversal	∅ Pieza	Dureza de la pieza
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)						
I	1	1.88	1.87	1.85	1.847	270.12
	2	1.82	1.77	1.87		
	3	1.85	1.87	1.85		
II	1	1.85	1.86	1.77	1.776	292.94
	2	1.77	1.72	1.72		
	3	1.72	1.78	1.8		
III	1	1.82	1.85	1.82	1.833	274.22
	2	1.86	1.82	1.82		
	3	1.83	1.82	1.8		
Promedio y desviación						279.09 ± 12.16
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico						
I	1	1.65	1.66	1.62	1.656	338.46
	2	1.68	1.66	1.62		
	3	1.65	1.7	1.66		
II	1	1.55	1.65	1.62	1.632	348.86
	2	1.62	1.65	1.6		
	3	1.65	1.67	1.65		
III	1	1.63	1.65	1.6	1.614	356.69
	2	1.57	1.6	1.62		
	3	1.6	1.62	1.6		
Promedio y desviación						348.00 ± 15.09
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico						
I	1	1.6	1.55	1.55	1.613	357.07
	2	1.62	1.6	1.6		
	3	1.65	1.62	1.6		
II	1	1.5	1.55	1.55	1.547	389.40
	2	1.52	1.58	1.57		
	3	1.52	1.55	1.57		
III	1	1.48	1.55	1.47	1.528	399.49
	2	1.55	1.6	1.52		
	3	1.52	1.55	1.5		
Promedio y desviación						381.98 ± 22.15

4.2 Caracterización Metalográfica

4.2.1 Metalografías de las piezas

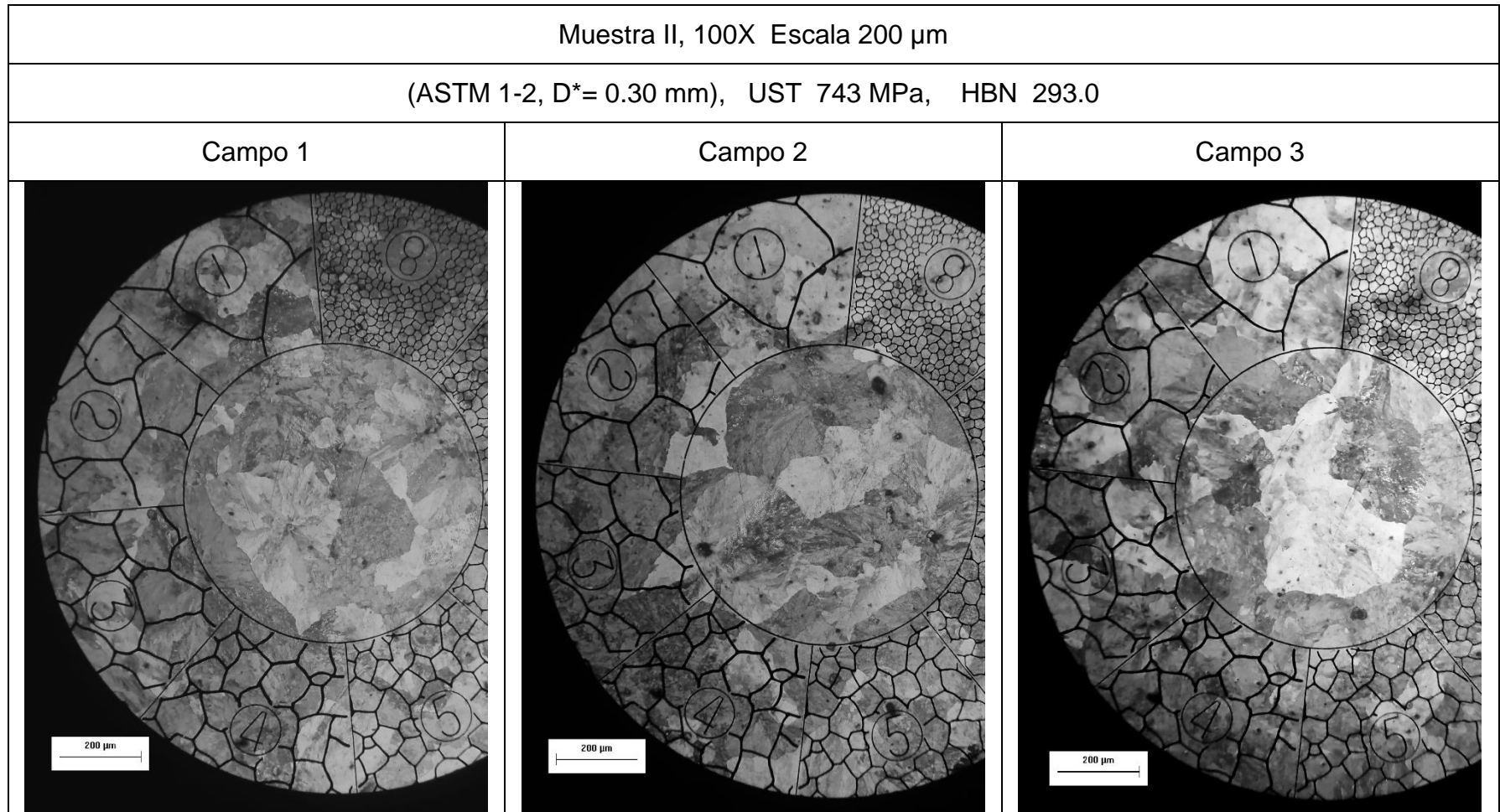
A continuación, en las tablas de la 7 a la 15 se muestran las microestructuras de las piezas en diferentes condiciones, en estas se evaluó el tamaño de grano bajo la norma ASTM E112 y se corroboró midiendo el diámetro de los granos mediante el uso de la escala, la cual se obtuvo al trabajar las imágenes con el software Image - Pro Plus.

Tabla 7 Metalografía y propiedades de la muestra Condición de colada, muestra I



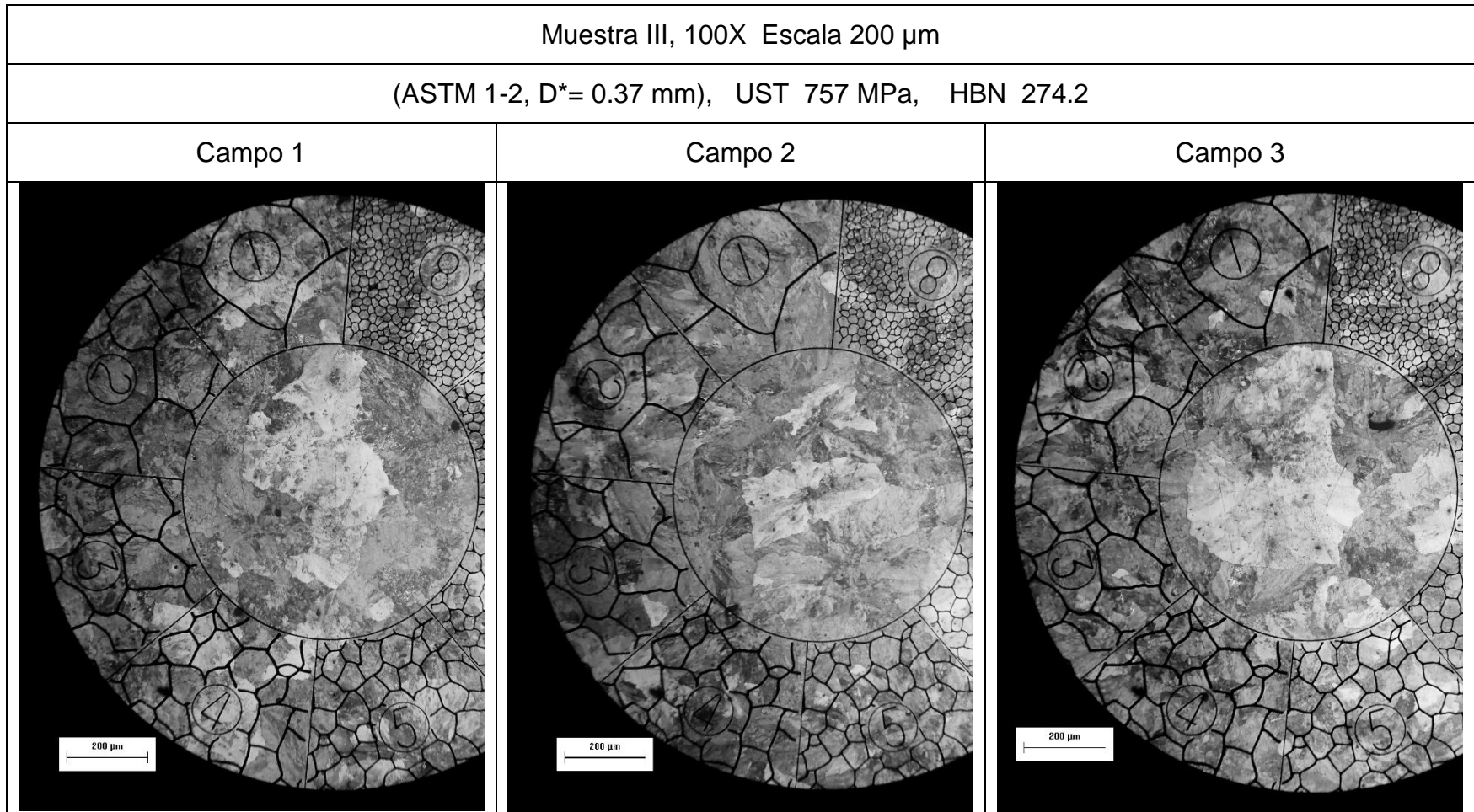
* Diámetro promedio medido

Tabla 8 Metalografía y propiedades de la muestra Condición de colada, muestra II



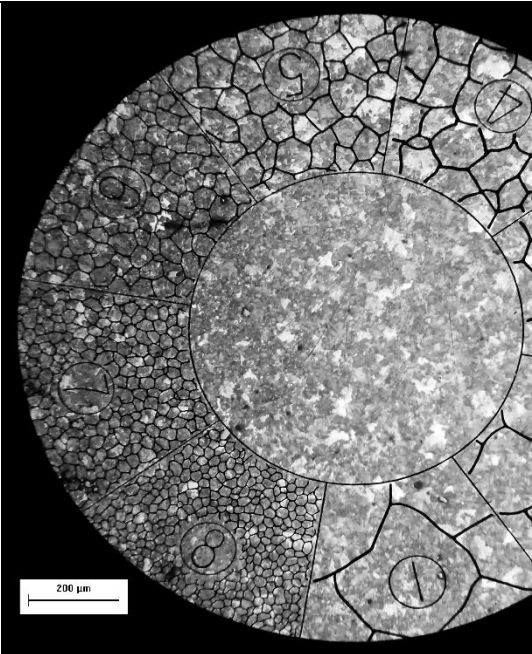
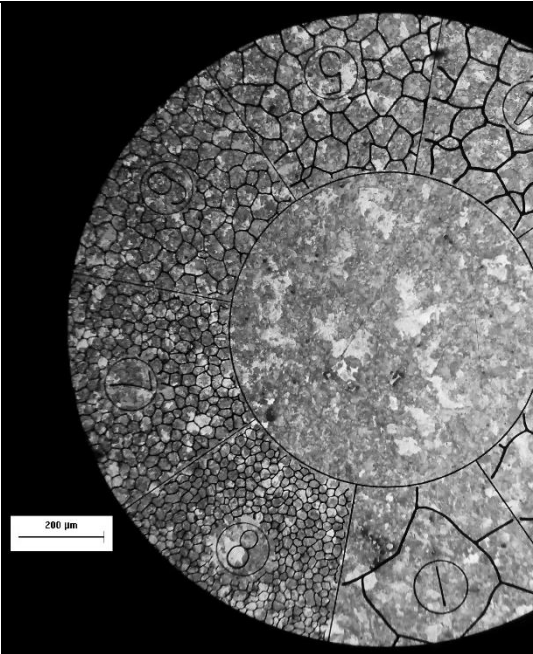
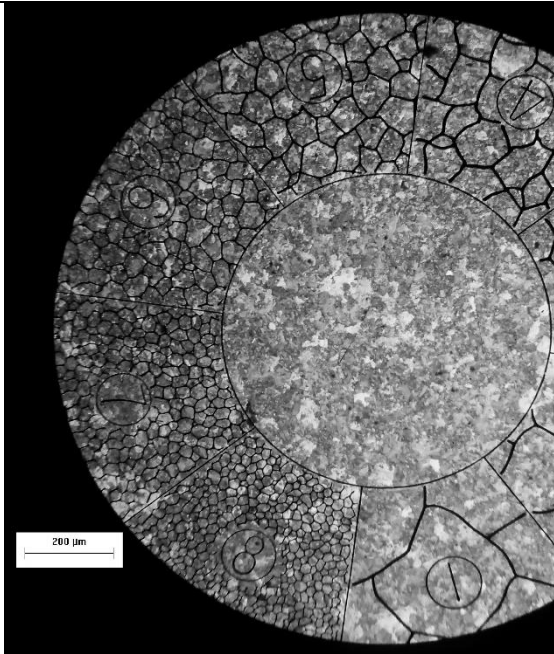
* Diámetro promedio medido

Tabla 9 Metalografía y propiedades de la muestra Condición de colada, muestra III



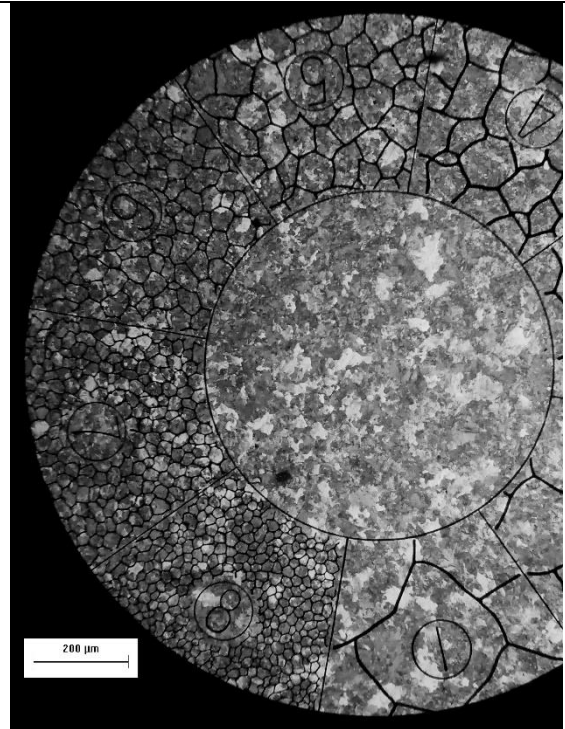
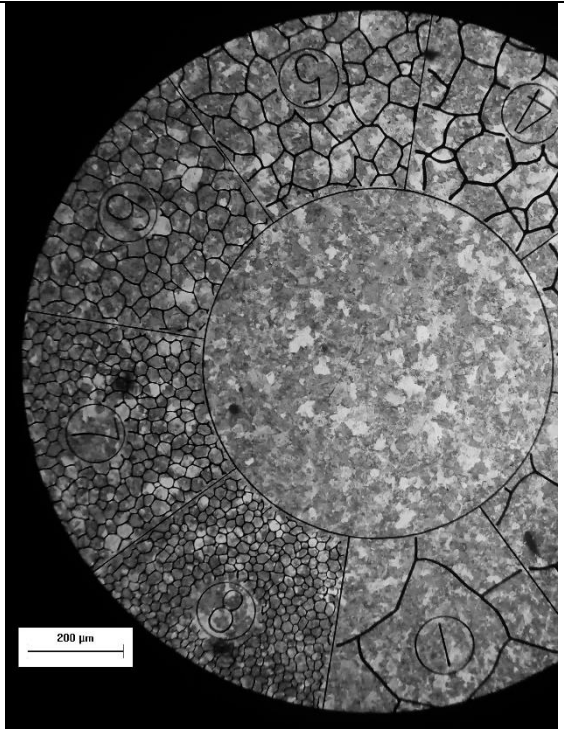
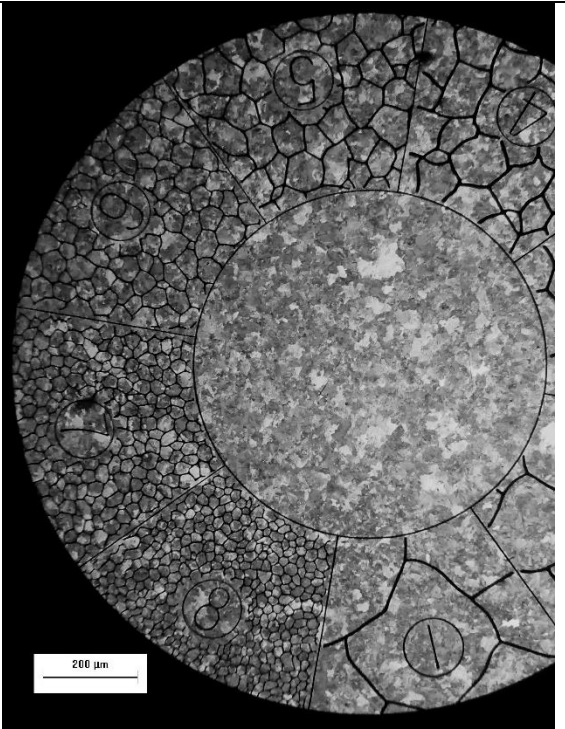
* Diámetro promedio medido

Tabla 10 Metalografía y propiedades de la muestra con 16 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra I

Muestra I, 100X Escala 200 μm		
(ASTM 6-7, $D^*= 0.06 \text{ mm}$), UST 776 MPa, HBN 338.5		
Campo 1	Campo 2	Campo 3
		

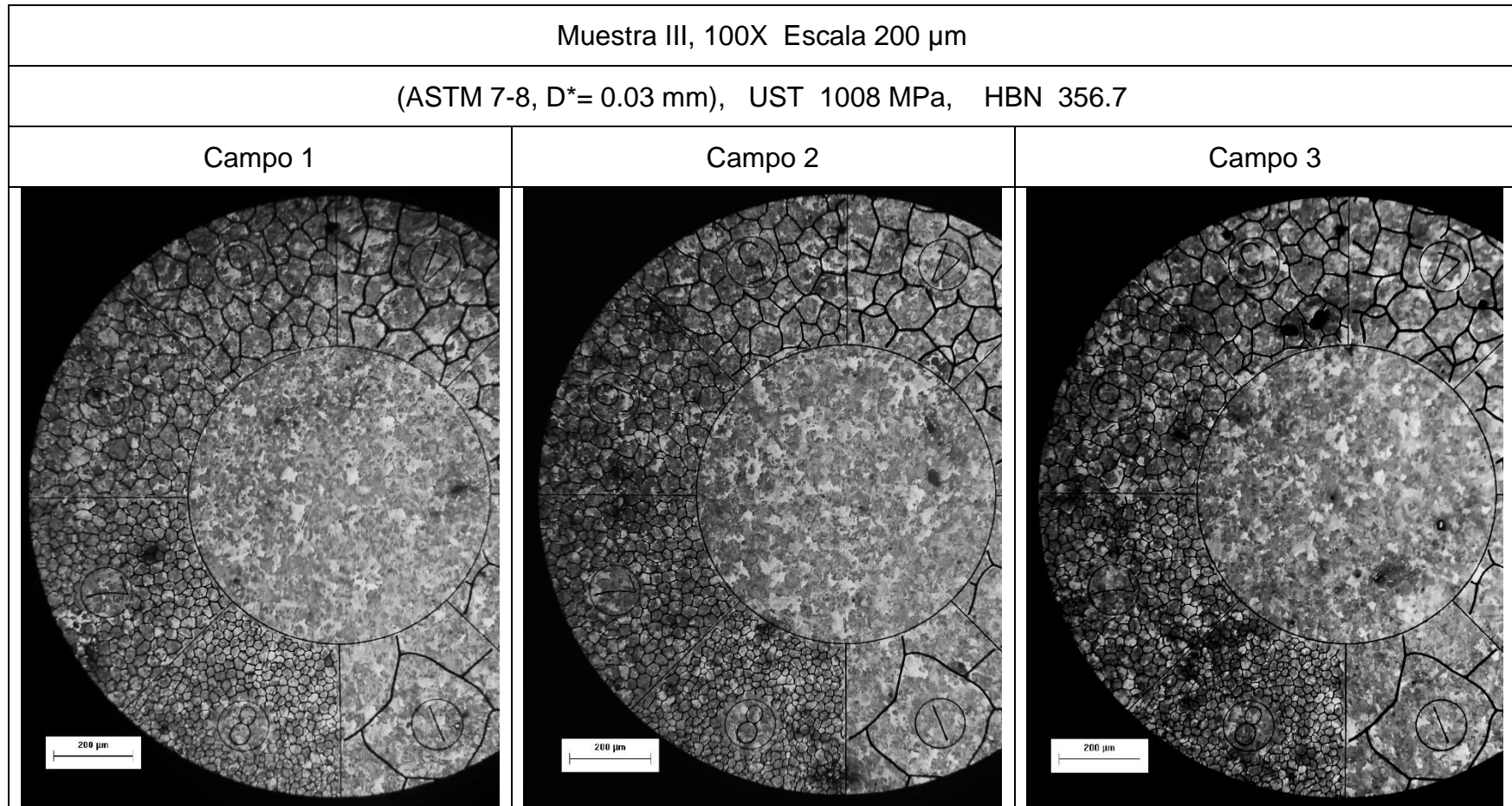
* Diámetro promedio medido

Tabla 11 Metalografía y propiedades de la muestra con 16 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra II

Muestra II, 100X Escala 200 μm		
(ASTM 6-7, $D^*= 0.04 \text{ mm}$), UST 687 MPa, HBN 348.9		
Campo 1	Campo 2	Campo 3
		

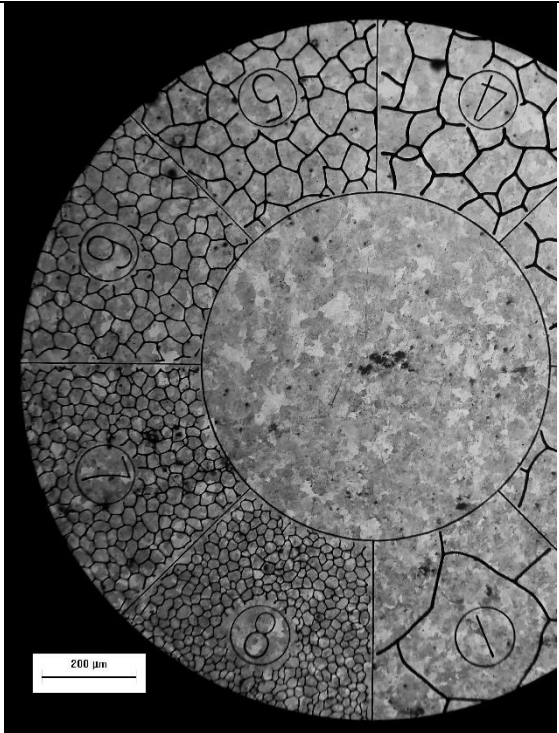
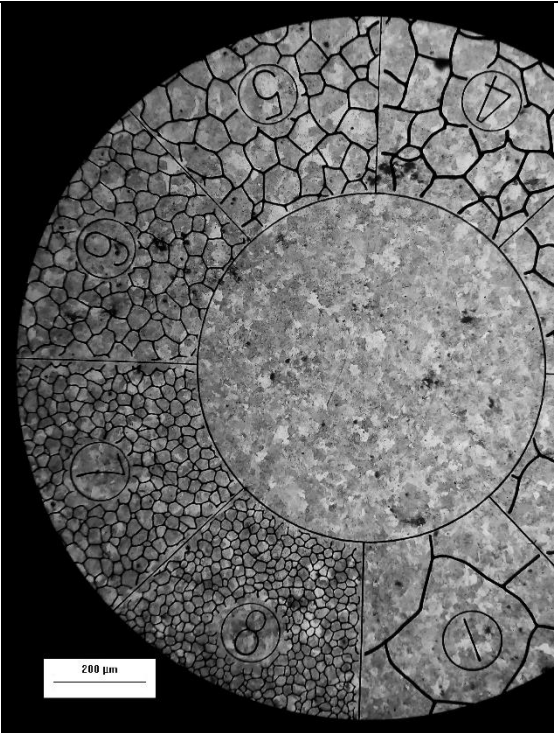
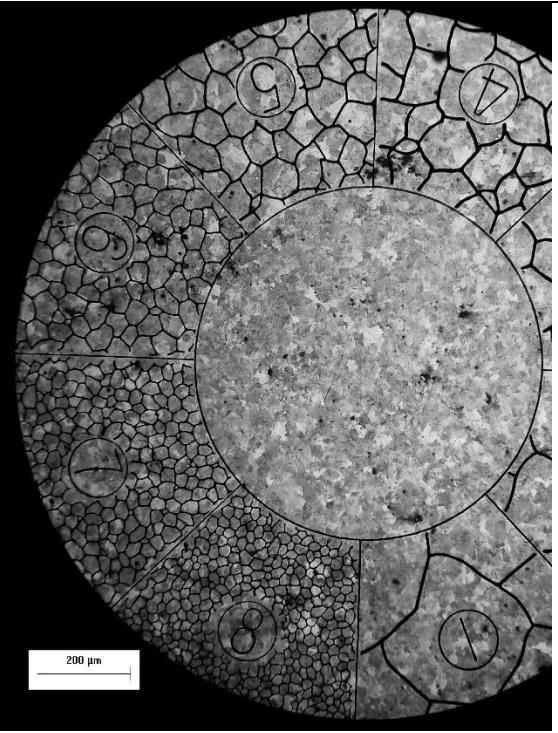
* Diámetro promedio medido

Tabla 12 Metalografía y propiedades de la muestra con 16 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra III



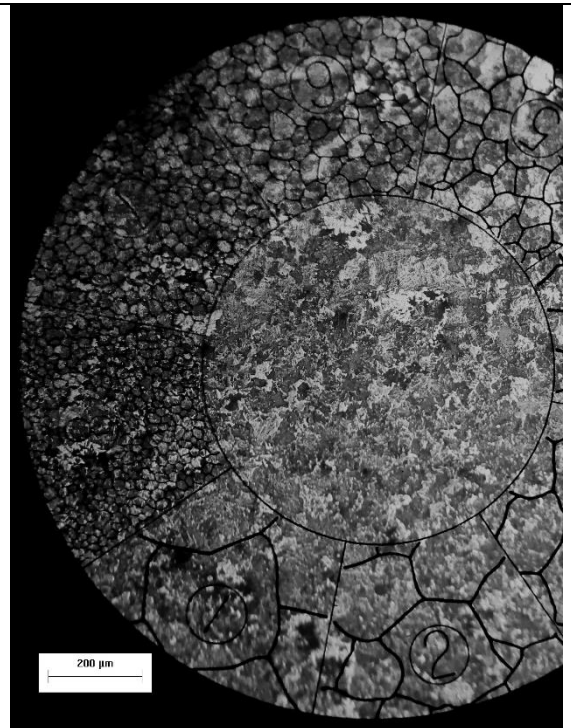
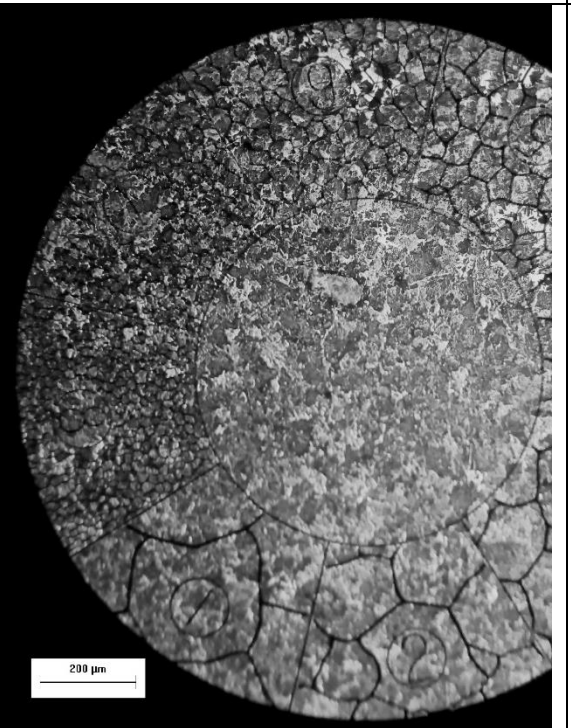
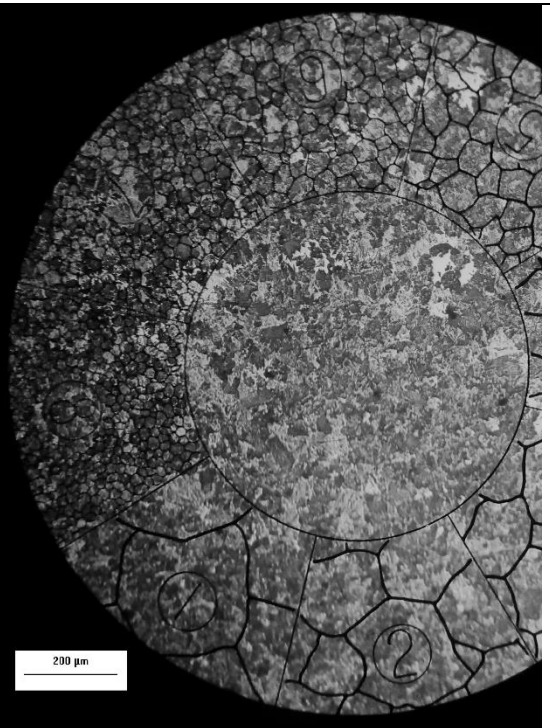
* Diámetro promedio medido

Tabla 13 Metalografía y propiedades de la muestra con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra I

Muestra I, 100X Escala 200 μm		
(ASTM 7-8, $D^* = 0.04 \text{ mm}$), UST 1191 MPa, HBN 357.0		
Campo 1	Campo 2	Campo 3
		

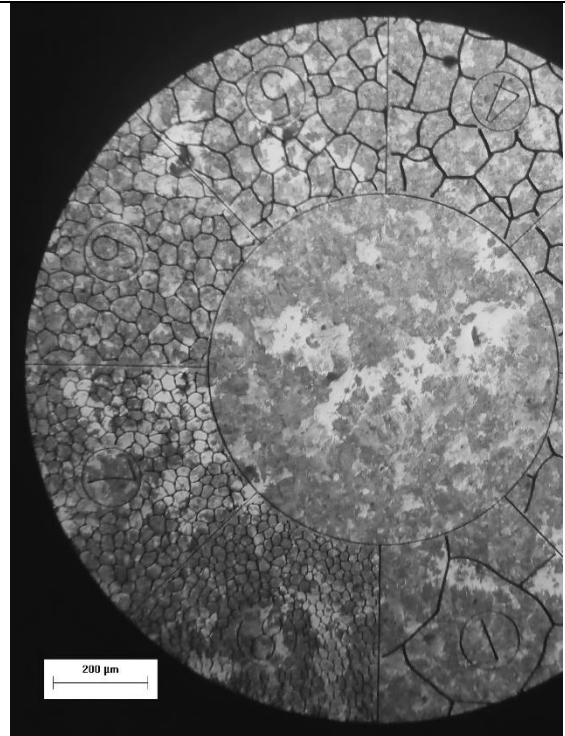
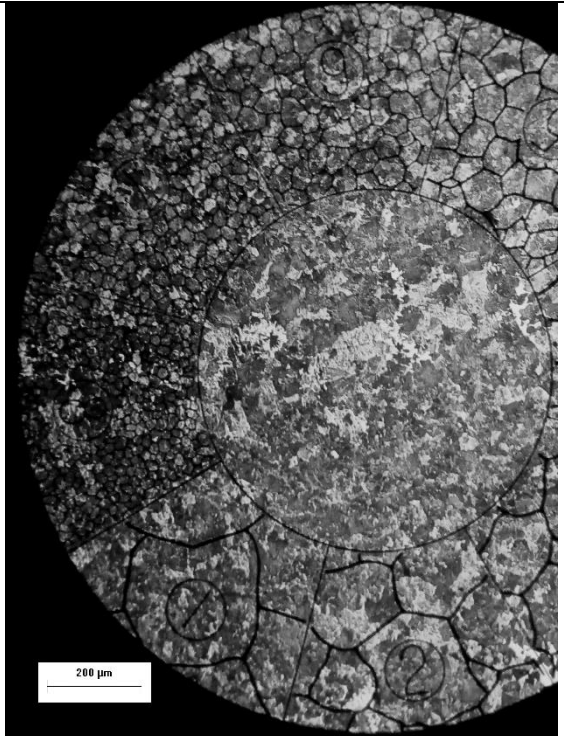
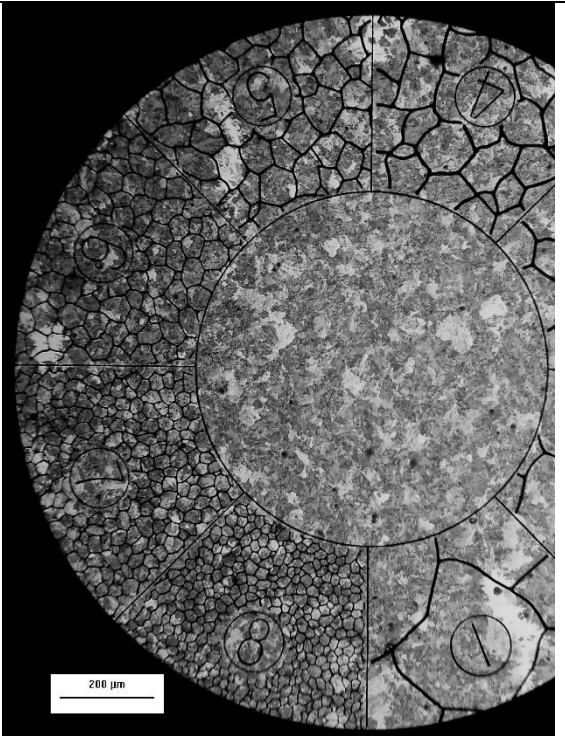
* Diámetro promedio medido

Tabla 14 Metalografía y propiedades de la muestra con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra II

Muestra II, 100X Escala 200 μm		
(ASTM 6-7, $D^*= 0.04 \text{ mm}$), UST 1140 MPa, HBN 389.4		
Campo 1	Campo 2	Campo 3
		

* Diámetro promedio medido

Tabla 15 Metalografía y propiedades de la muestra con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico, muestra III

Muestra III, 100X Escala 200 μm		
(ASTM 7-8, $D^*= 0.03 \text{ mm}$), UST 1142 MPa, HBN 399.5		
Campo 1	Campo 2	Campo 3
		

* Diámetro promedio medido

4.2.2 Tamaños de grano ASTM [14]

La tabla 16 presenta el tamaño de grano ASTM E112, el equivalente de granos por pulgada cuadrada y el diámetro promedio de los granos de las piezas bajo estudio.

Tabla 16 Tamaños de grano ASTM.

Pieza	# de grano ASTM	# de granos por pulgada cuadrada	Diámetro de los 'granos (mm)
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)			
I	1-2	1-2	0.254-0.179
II	1-2	1-2	0.254-0.179
III	1	1	0.254
Promedio			0.2136
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico			
I	7-8	64-128	0.0318-0.0225
II	6-7	32-64	0.0449-0.0318
III	7-8	64-128	0.0318-0.0225
Promedio			0.0318
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico			
I	7-8	64-128	0.0318-0.0225
II	6-7	32-64	0.0449-0.0318
III	7-8	64-128	0.0318-0.0225
Promedio			0.0318

La tabla 17 muestra los resultados de las mediciones de los diámetros de los granos de las piezas bajo estudio, se realizó para corroborar la correspondencia con lo que establece la norma ASTM.

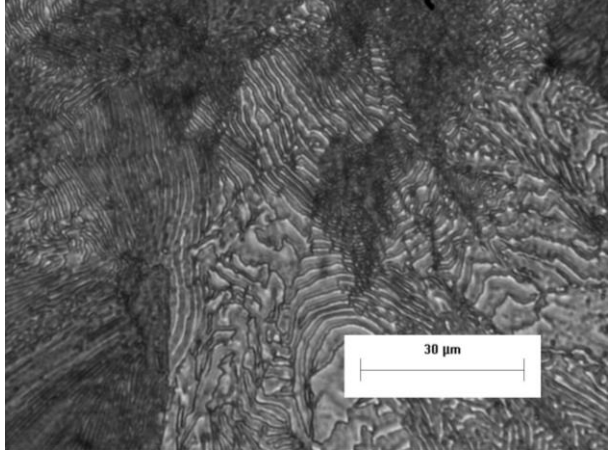
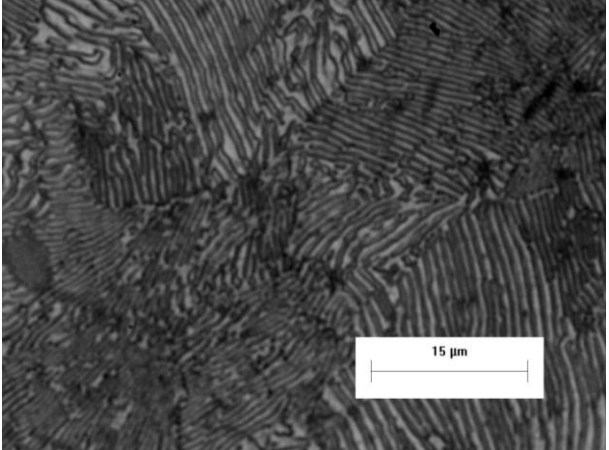
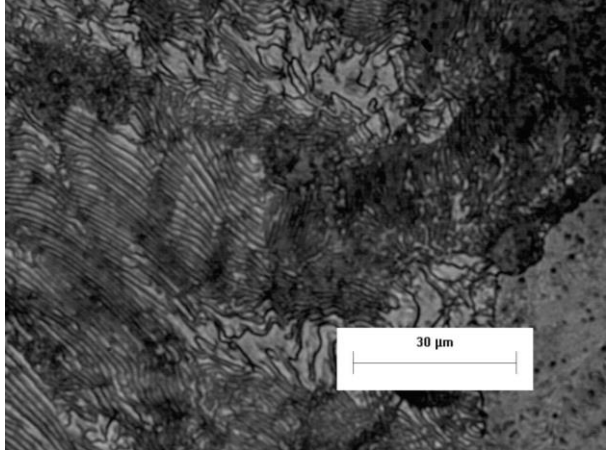
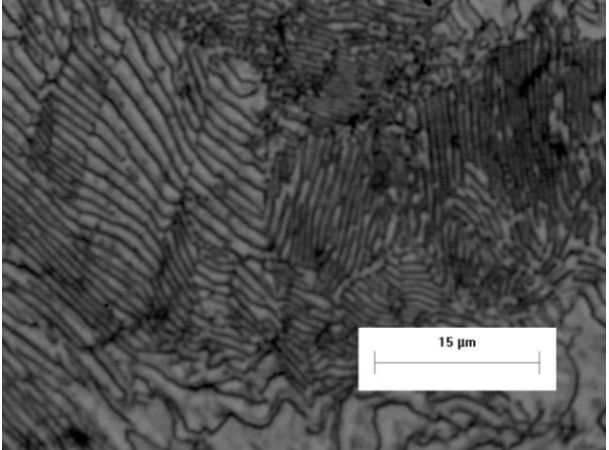
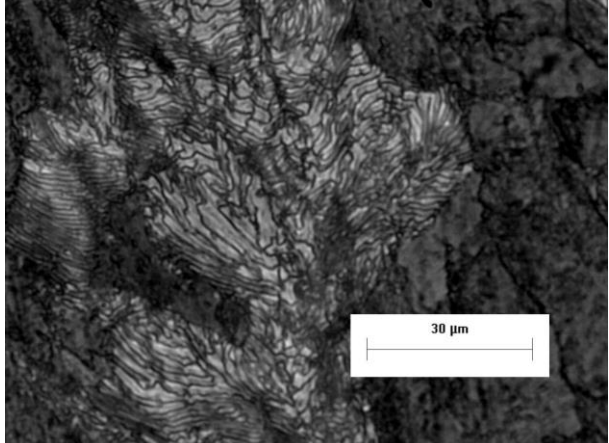
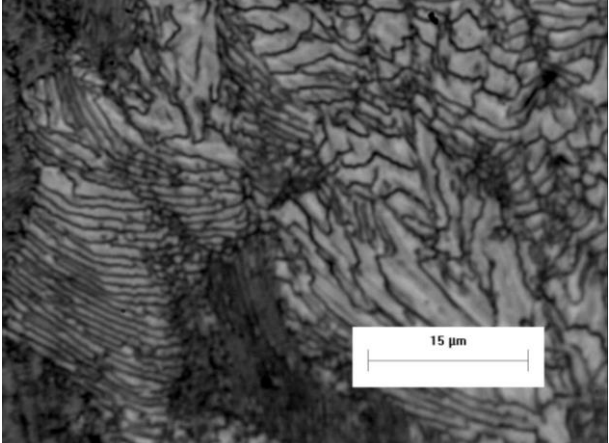
Tabla 17 Diámetros medidos de los granos de las piezas analizadas.

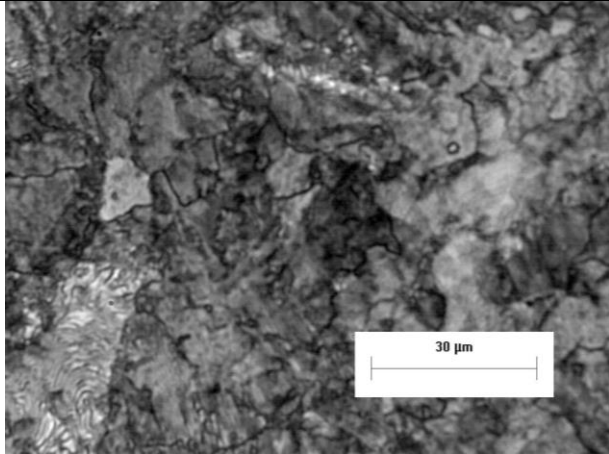
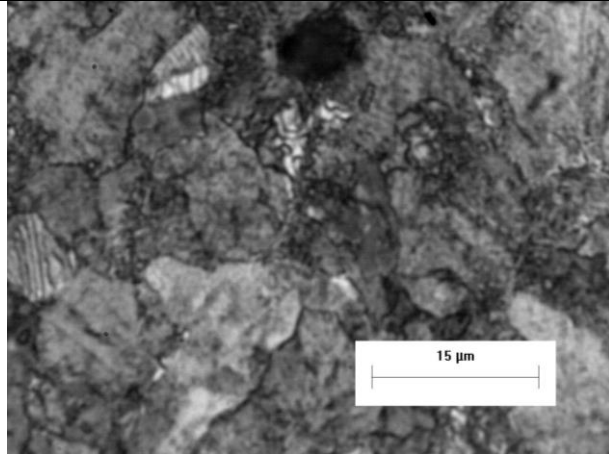
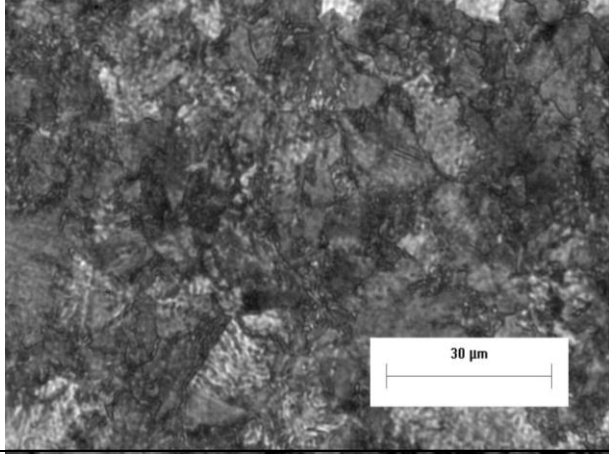
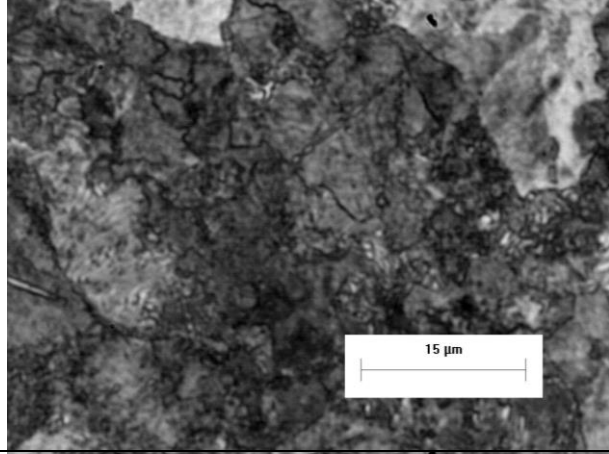
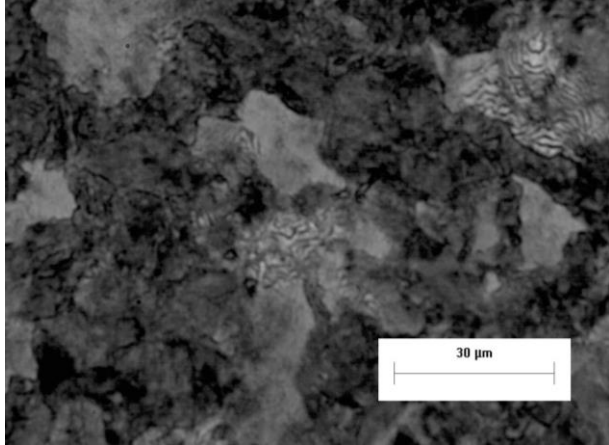
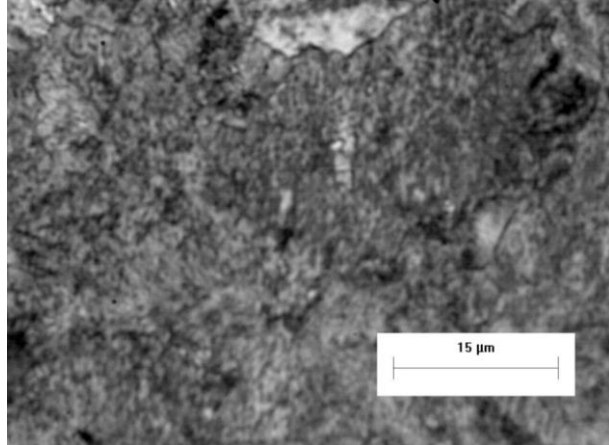
Diámetro de los granos (mm) a 100X										
Muestra	Campo 1			Campo 2			Campo 3			Diámetro promedio (mm)
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)										
I	0.23	0.25	0.35	0.51	0.25	0.30	0.25	0.30	0.20	0.29
II	0.31	0.32	0.35	0.35	0.35	0.25	0.20	0.30	0.30	0.30
III	0.47	0.39	0.35	0.26	0.38	0.35	0.40	0.45	0.32	0.37
Promedio										0.32
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico										
I	0.07	0.04	0.09	0.10	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06
II	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04
III	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03
Promedio										0.043
Piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico										
I	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
II	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
III	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
Promedio										0.036

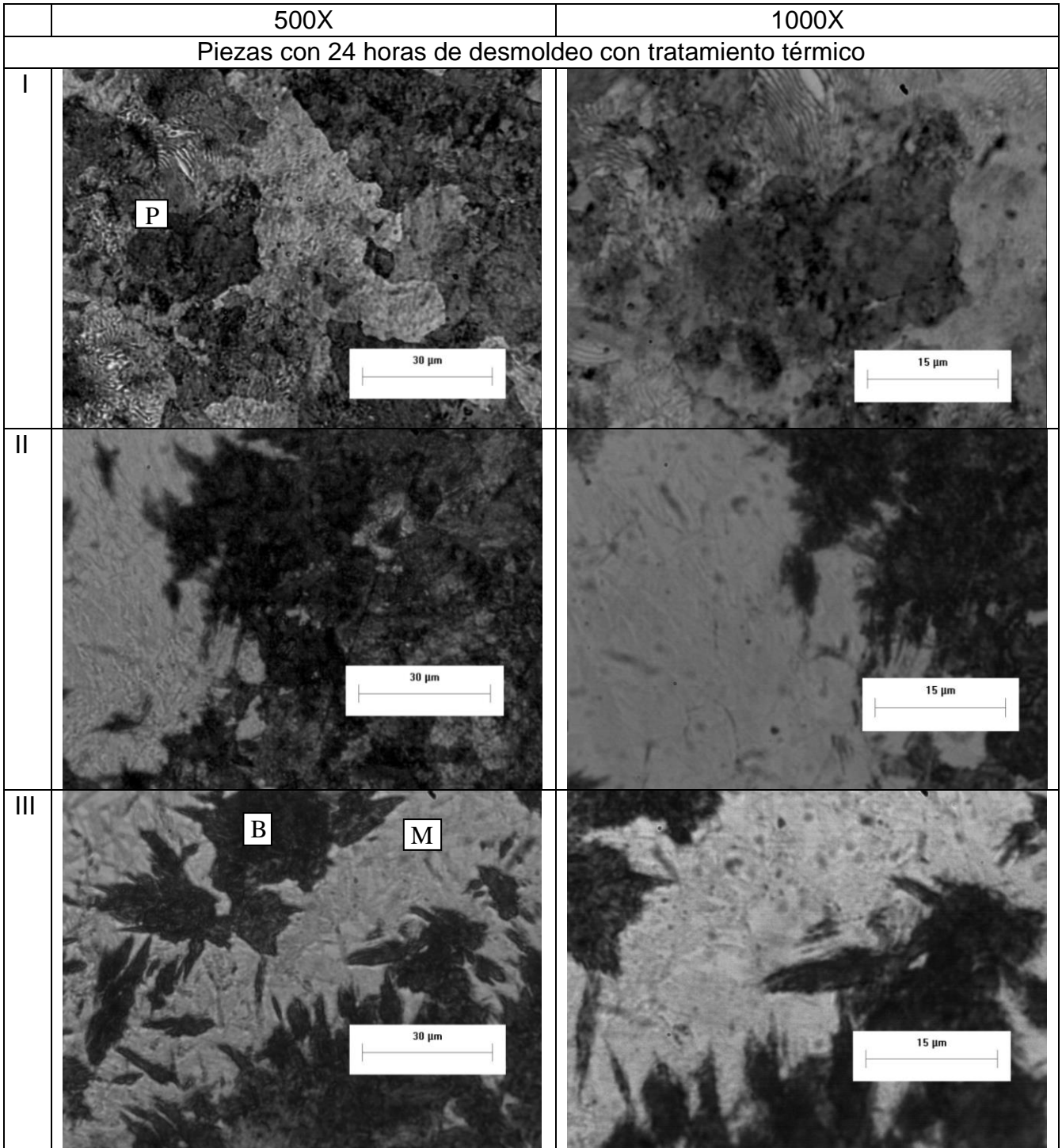
4.2.3 Metalografías a altos aumentos

La tabla 18 muestra las metalografías de las piezas bajo estudio a altos aumentos (500X y 1000X), con el propósito de observar con mayor detalle la perlita y la posible presencia de carburos.

Tabla 18 Metalografías de las muestras a altos aumentos (500X y 1000X),
probetas I, II y III.

	500X	1000X
Piezas con 30 horas de desmoldeo (condición de colada)		
I		
II		
III		

	500X	1000X
Piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico		
I		
II		
III		



*Las muestras con 24 horas de desmoldeo y con tratamiento térmico presentan colonias de bainita y zonas de martensita.

P = Perlita B = Bainita M = Martensita

4.2.4 Estudios por microscopía Electrónica de Barrido

A continuación, se muestra en las figuras 17 a 22 en estas se observan los resultados de la microscopía electrónica de barrido con el propósito de observar con mayor detalle la perlita para determinar el espaciamento interlaminar de la perlita (EIP) y la posible presencia de carburos.

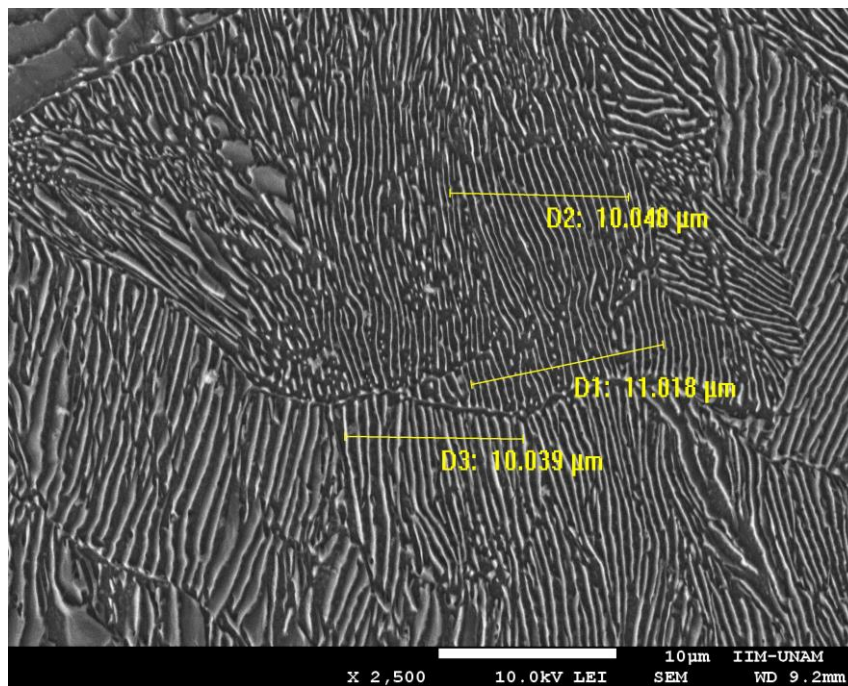


Figura 17 Microscopia electrónica de barrido de la pieza en condición de colada (30 hrs de desmoldeo) a 2500X zona 1, con la escala para medir el (EIP).

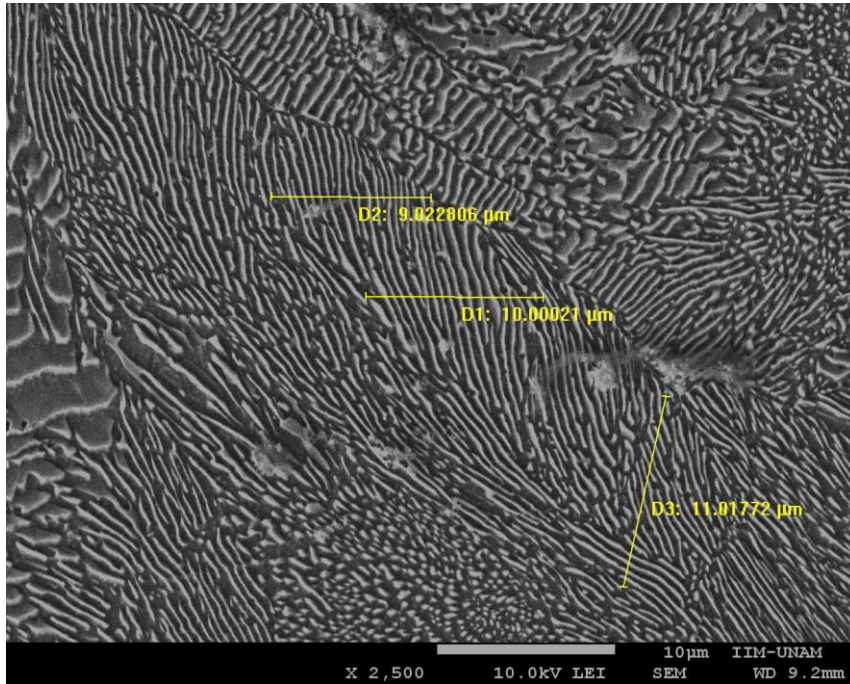


Figura 18 Microscopia electrónica de barrido de la pieza en condición de colada (30 hrs de desmoldeo) a 2500X zona 2, con la escala para medir el (EIP).

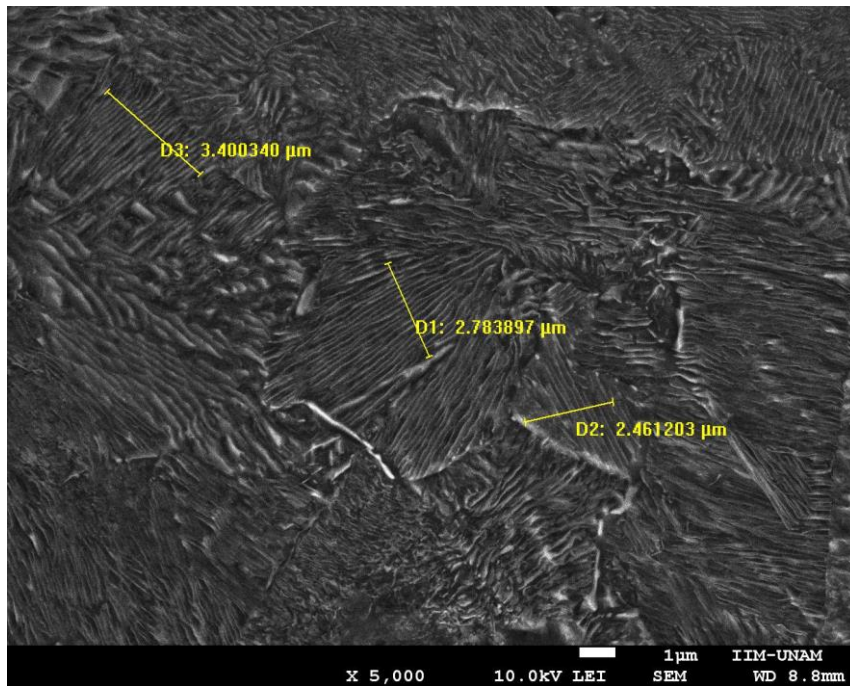


Figura 19 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 24 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico a 5000X zona 1, con la escala para medir el (EIP).

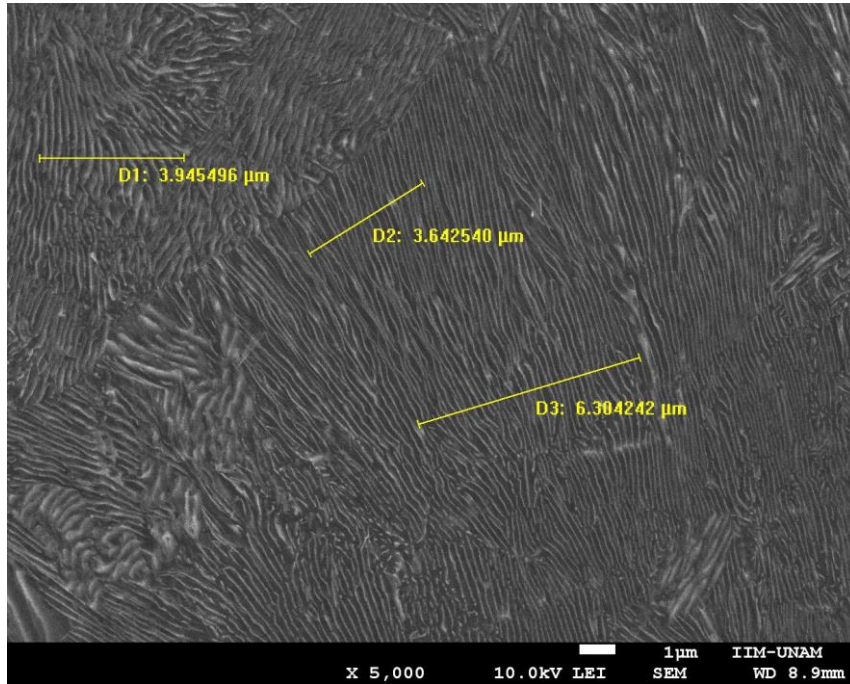


Figura 20 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 24 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico a 5000X zona 2, con la escala para medir el (EIP).

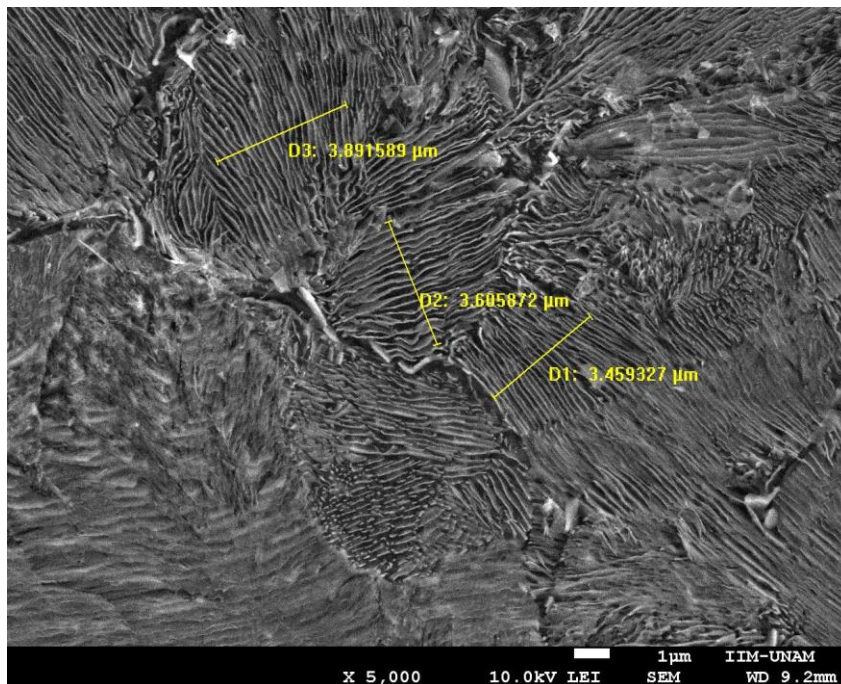


Figura 21 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 16 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico a 5000X zona 1, con la escala para medir el (EIP).

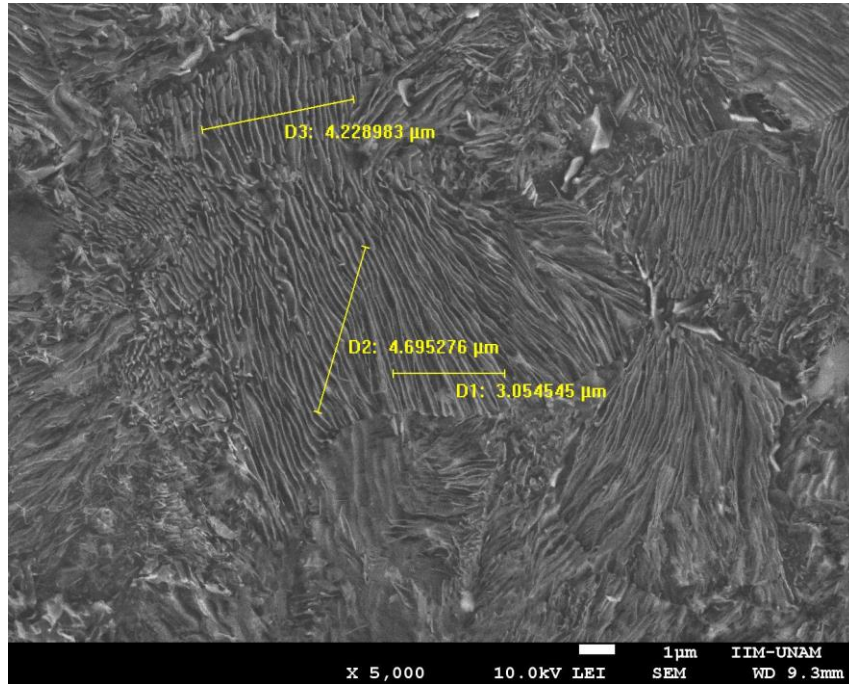


Figura 22 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 16 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico a 5000X zona 2, con la escala para medir el (EIP).

En la tabla 19 se aprecia el valor del espaciamiento interlaminar de la perlita (EIP) de las piezas bajo estudio.

Tabla 19 Magnitud del espaciamiento interlaminar de la perlita (EIP).

Probeta	Medición 1 (μm)	Medición 2 (μm)	Promedio (μm)
30 hrs de desmoldeo (condición de colada)	0.376	0.436	0.406
24 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico	0.129	0.138	0.133
16 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico	0.138	0.159	0.148

Análisis puntuales elementales

A continuación, en las figuras 23 y 24 se presenta una zona en las piezas con 16 y 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico en las que se encontró presunta evidencia de carburos de cromo por lo que se les realizó un análisis químico puntual.

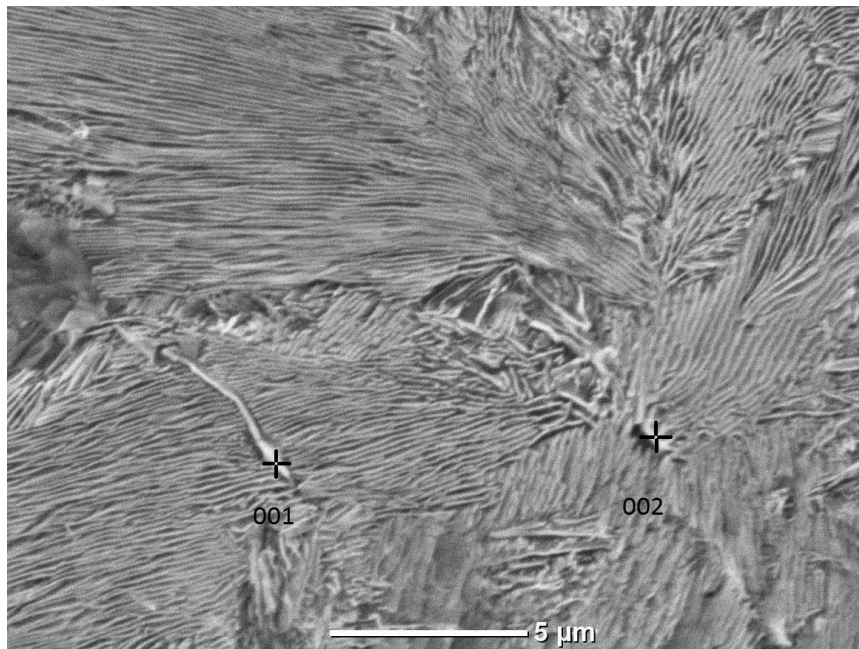


Figura 23 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 24 hrs de desmoldeo con tratamiento térmico en la que se observan finos precipitados de carburos de cromo.

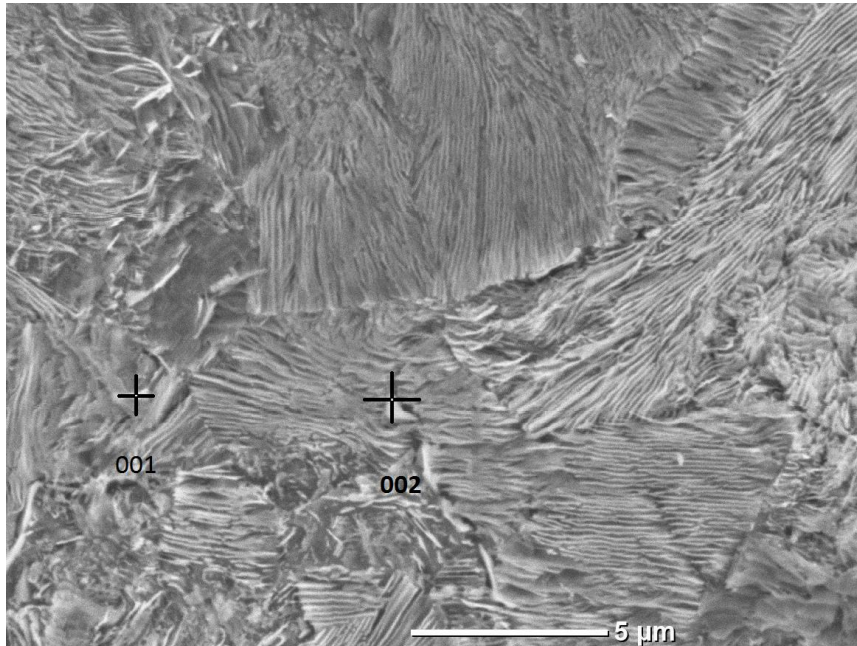


Figura 24 Microscopia electrónica de barrido de la pieza con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico en la que se observan carburos de cromo muy finos.

En la tabla 20 se presentan los resultados de la composición química de los precipitados analizados en la muestra de 16 y 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico, en el Anexo II se muestran los análisis puntuales elementales.

Tabla 20 Composición Química de los precipitados.

Pieza con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico			
Elemento	Precipitado 1	Precipitado 2	Promedio
%C	4.93	5.94	5.435
%Cr	2.43	2.52	2.475
%Mn	0.84	0.81	0.825
Pieza con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico			
Elemento	Precipitado 1	Precipitado 2	Promedio
%C	4.66	4.36	4.51
%Cr	2.21	2.75	2.48
%Mn	0.68	0.82	0.75

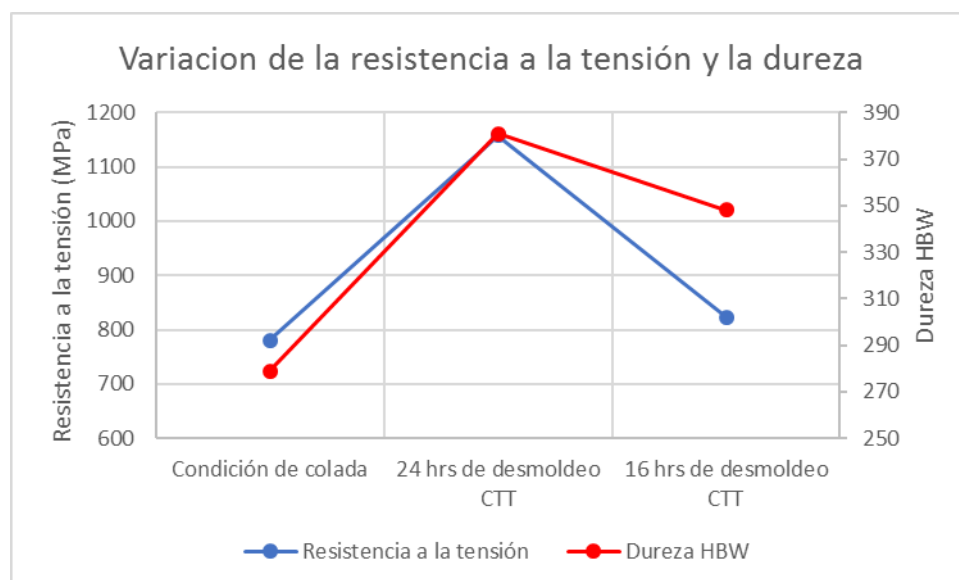
En la tabla 21 se muestra un resumen de todos los datos obtenidos a lo largo de la parte experimental.

Tabla 21 Resumen de propiedades mecánicas.

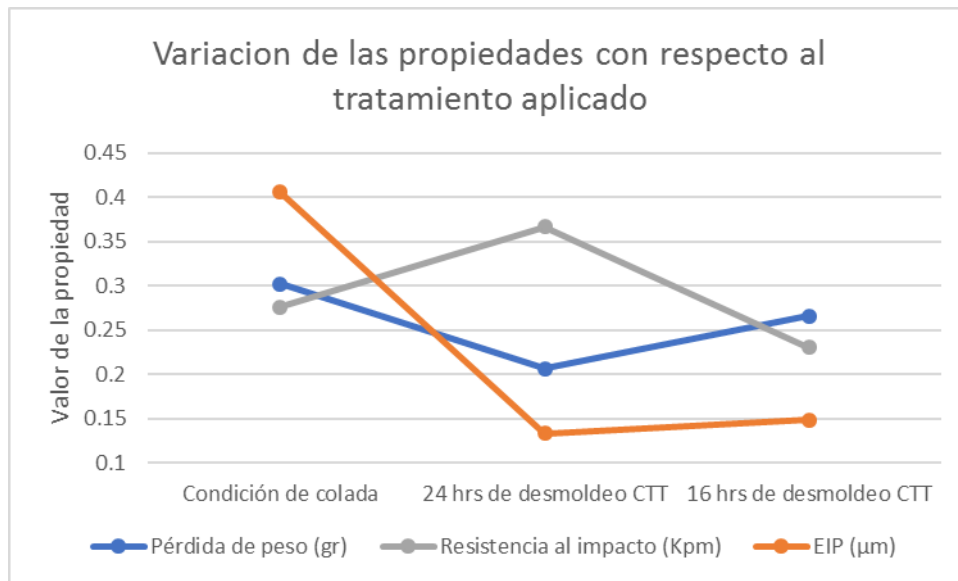
Probeta	Resistencia a la tensión (MPa)	% de elongación	Resistencia al impacto ftblf (Kpm)	Resistencia al desgaste pérdida de peso (gr)	Dureza Brinell** (HBW)	Tamaño de grano	EIP*** (µm)
Condición de colada	780	3.21	2 (0.276)	0.302	279.01	1-2	0.406
24 hrs de desmoldeo CTT*	1157.67	3.89	2.66 (0.367)	0.206	380.97	7-8	0.133
16 hrs de desmoldeo CTT*	823.6	2.00	1.67 (0.230)	0.266	348	6-8	0.148

* Con Tratamiento Térmico ** Carga 750 Kg; 30 segundos; indentador de 5 mm de carburo de tungsteno *** Espaciamiento Interlaminar de la Perlita
La norma indica una dureza entre 350 y 400 HBW

En las figuras 25 y 26 se observa la variación en las propiedades mecánicas con respecto al método de procesamiento de las piezas fabricadas.



Figuras 25 Variación de la resistencia a la tensión y la dureza con respecto al método de procesamiento de las piezas fabricadas.



Figuras 26 Variación de la resistencia al desgaste (Pérdida de peso), la resistencia al impacto y el espaciado interlaminar de la perlita con respecto al método de procesamiento de las piezas fabricadas.

Capítulo 5

Discusión de resultados

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de resultados de los diversos estudios realizados a las piezas bajo estudio

5.1 Ensayo de Tensión

Se puede observar en la tabla 3 que la resistencia a la tensión de las piezas son diferentes en cada caso, siendo las piezas denominadas condición de colada las que tienen el menor promedio, esto se debe a que al ser una pieza realizada por colada en un molde de arena la pieza tarda en solidificar por lo que se facilita el crecimiento de los granos, se aprecia que la pieza condición de colada I tiene un valor de resistencia a la tensión superior a las otras dos piezas que relativamente son iguales, esto se puede deber a la posición de las muestras, es decir, que la pieza condición de colada I fue tomada de una posición más superficial que el resto de las piezas por lo que la solidificación fue más rápida lo que reduce el tamaño de los granos e incrementa las propiedades mecánicas (en este caso la resistencia a la tensión), como comentario adicional se desconoce de cual de los tres escalones de la pieza completa fueron obtenidas las muestras I, II y III (superficie, medio y centro respectivamente).

A continuación, se encuentran las piezas con 24 horas de desmoldeo y con tratamiento térmico, que son las que reportan la mayor resistencia a la tensión en promedio, igual que en el caso anterior la pieza con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico I es la que posee el mayor valor, esto se debe a que el tratamiento térmico solo es efectivo hasta una cierta profundidad en las piezas y cuanto más cerca de la superficie mayor será el efecto del tratamiento.

Al comparar los resultados de estas dos piezas se observa que el tratamiento térmico es correcto ya que se incrementó la resistencia a la tensión promedio y la desviación estándar se redujo casi a la mitad.

Por otro lado, los resultados de las piezas con 16 horas de desmoldeo que se esperaba que tuviese un comportamiento parecido a las piezas con 24 horas de desmoldeo con TT ya que se les realizó el mismo tratamiento térmico son poco consistentes, es decir, que tienen una gran variación en los resultados obtenidos de muestra a muestra, además de que la dureza obtenida en estas muestras no cumple con lo que establece la norma ASM Hi C.

5.1.2 Gráficas Esfuerzo-Deformación

Como se puede apreciar en las figuras 5 a 7 las curvas esfuerzo-deformación de las piezas en condición de colada el material se comporta de manera dúctil hasta cierto punto, en la zona plástica de las gráficas poco esfuerzo genera una gran deformación, se observa también que la pieza en condición de colada I se deforma un poco más que las otras dos piezas esto se puede deber a su posición en la pieza completa, esta al estar más superficial solidificó de una manera sutilmente más rápida por lo que genera un tamaño de grano ligeramente más pequeño y por esto incrementa sus propiedades.

En las figuras 8 a 10 se observa el comportamiento de las piezas con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico "TT" se nota que existe una variación importante en el comportamiento de las piezas, pasando de una pieza frágil a una dúctil, que es lo que se espera de una pieza con tratamiento térmico, la

probeta "TT" I es claramente la que se vio más afectada por el ciclo térmico se requiere mucho esfuerzo para lograr deformar la pieza. Como se dijo anteriormente el tratamiento térmico afecta de la superficie hacia el centro de las piezas, como se puede apreciar las dos primeras piezas comparten hasta cierto punto su comportamiento frágil pero la pieza "TT" II tiene una zona plástica ligeramente superior a la pieza "TT" I lo que indica que su carácter frágil ha disminuido y por otro lado la pieza "TT" III presenta un comportamiento completamente dúctil muy parecido al presentado por la pieza en condición de colada I seguramente debido a que a la profundidad a la que fue tomada la pieza el tratamiento térmico no tuvo ningún efecto.

Las figuras 11 a 13 muestran en comportamiento de las piezas con 16 horas de desmoldeo y tratadas térmicamente que presentan un comportamiento irregular, tienen un carácter claramente dúctil, las primeras dos graficas se parecen, aunque la segunda tiene una deformación más corta y al parecer por la forma de las curvas el tratamiento térmico no tuvo ningún efecto en las piezas. Debido a esto se realizaron metalografías a las piezas para observar la microestructura y explicar el porqué de este comportamiento. El comportamiento de la pieza con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico III es muy parecido al de las piezas en condición de colada.

5.2 Ensayo Charpy (Resistencia al impacto)

En la tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos de impacto realizados a las diferentes piezas, en esta se aprecia que los valores son muy parecidos entre sí y solamente las piezas con 24 horas de desmoldeo y tratamiento

térmico son las que absorbieron más energía pero aun así los valores de todas las piezas son muy bajos lo que indicaría que el material es muy frágil lo que contradice lo que muestran las gráficas esfuerzo-deformación, entonces otra posible explicación del porque los resultados son tan parecidos es que la energía suministrada por el péndulo hacia las piezas era demasiada y éstas no fueron obstáculo para el péndulo por lo que el indicador casi no se movió.

5.3 Ensayo de Desgaste

La tabla 5 muestra los resultados de los ensayos de desgaste, en ella se observa la pérdida de peso de las piezas después de cada intervalo de la prueba (30 min), se observa que las piezas en condición de colada son las que se desgastan más rápido, en cambio las piezas con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico son las que menos se desgastaron y las piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico quedaron en medio. Las figuras de la 14 a la 16 muestran el comportamiento de las piezas a lo largo del ensayo.

La figura 14 muestra el comportamiento de las piezas en condición de colada, en donde se ve que la pieza en condición de colada I es la que se desgasta más rápido hasta que llega a una especie de equilibrio, las piezas II y III tienen un comportamiento muy parecido hasta el minuto 90 de la prueba en donde la condición de colada III se empieza a desgastar más que las otras dos lo cual se puede deber a la microestructura de la probeta de desgaste.

La figura 15 indica el comportamiento de las piezas con 24 horas de desmoldeo y tratamiento térmico en la que se aprecia que la pieza muestra III se desgasta

mucho más rápido que las otras dos, esto muestra que el tratamiento si afecto a las piezas I y II mientras que la pieza III permaneció sin cambios, estos resultados son parecidos a los obtenidos en las curvas esfuerzo-deformación en donde la pieza III tiene un carácter dúctil en comparación con las otras dos piezas que son más frágiles.

La figura 16 indica el comportamiento de las piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico en la que se aprecia que la pieza muestra III se desgasta más rápido que las otras dos, el comportamiento de estas piezas sigue siendo irregular.

5.4 Ensayo de Dureza Brinell

En la tabla 6 se observan los diámetros de las impresiones de las huellas del ensayo Brinell y las durezas de las piezas, en ésta se aprecia que las durezas las piezas en condición de colada son las que tienen los valores más bajos, las piezas en condición de colada I y III tiene un valor muy parecido y la pieza en condición de colada II tiene un valor ligeramente más elevado.

Los resultados de las durezas de las piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico son más consistentes que los resultados de las pruebas anteriores, aquí si se aprecia que se realizó un tratamiento térmico por lo que las durezas varían con respecto a la posición, pero hay que notar que de acuerdo con los resultados ya a la posición de las piezas estos indican que la pieza se enfrió del centro hacia afuera.

Al notar los resultados de las piezas con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico se observa que hay un incremento en la dureza de la pieza con respecto de la posición, por lo que se puede decir que el tratamiento térmico funciono, pero al igual que en el caso de las piezas con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico los resultados indicarían que las piezas no fueron correctamente identificadas para esta prueba, en base a la posición en la pieza completa, por lo que las metalografías de estas piezas sirven para determinar el orden correcto.

5.5 Metalografías a las piezas

Se aprecia en las tablas 7 a 15 las microestructuras obtenidas de las diferentes piezas, en donde se observa que la microestructura si se ha visto afectada por los tratamientos que se les realizo.

En las tablas 7 a 9 se observa que los granos de las piezas en condición de colada son mucho más grandes que la de las demás piezas, esto se debe a la forma en que solidificó la pieza, al haber sido colada en un molde de arena el enfriamiento es muy lento lo que le da oportunidad a los granos de crecer. Las muestras a las que se les realizó el tratamiento térmico muestran en comparación un tamaño de grano más fino debido a la velocidad de enfriamiento.

Al comparar las microestructuras de las piezas en condición de colada entre sí se aprecia que el tamaño de los granos entre las primeras dos muestras es muy parecido y en la tercera estos son ligeramente más grandes, también se

observan inclusiones en las tres piezas siendo la muestra 2 la que presenta una mayor cantidad de estos defectos.

Las muestras desmoldeadas después de 16 horas de haber sido coladas y con tratamiento térmico presenta una microestructura diferente, se nota que el tamaño de grano ha disminuido considerablemente pasando de un ASTM 1-2 para las piezas en condición de colada a un tamaño ASTM 7-8, también se observan pequeñas zonas blancas que podrían ser bainita en una proporción muy parecida en todas las muestras con 16 horas de desmoldeo y con tratamiento térmico.

Las piezas con 24 horas de desmoldeo y con tratamiento térmico presentan una microestructura parecida a las piezas anteriores, al igual que a estas el tamaño de grano disminuyó gracias al tratamiento térmico, pero en estas piezas se observan zonas blancas de martensita rodeadas de una estructura en forma de plumas que se trataría de bainita, también se observa que el orden de las piezas ha sido invertido esto se puede explicar ya que la cantidad de bainita es casi nula en la primera muestra y va aumentando en las demás muestras.

5.6 Microscopia Electrónica de Barrido

En las figuras 17 a 22 se aprecian los resultados de la microscopia electrónica de barrido realizada a las piezas bajo estudio, en estas se observa que las tres piezas poseen una microestructura perlítica pero con una variación muy importante en el espaciamiento interlaminar, la muestra con 30 horas de desmoldeo (condición de colada) presenta el valor más grande, mientras que

las muestras con tratamiento térmico poseen un espaciamiento interlaminar de la perlita muy parecidos, como se aprecia en la tabla 18, esta variación se debe a la velocidad de solidificación en el caso de la muestra en condiciones de colada (30 horas de desmoldeo).

En el caso de las muestras tratadas térmicamente el tiempo de desmoldeo si impactó en la respuesta al tratamiento ya que a ambas muestras se les aplicó la misma velocidad de enfriamiento durante la solidificación, pero en la pieza con 16 horas de desmoldeo la estructura se engrosó en comparación con la de 24 horas de desmoldeo.

Para determinar si existe la presencia de segregación elemental y formación de carburos de cromo se realizaron mapeos elementales de Carbono, Cromo y el Manganeso.

Debido a que los detectores del equipo que se empleó para realizar los estudios son pequeños los resultados de los mapeos elementales no fueron conclusivos además de que tomaron demasiado tiempo, por lo que se decidió realizar análisis elementales puntuales de los posibles carburos de cromo precipitados.

En las figuras 23 y 24 se presentan los análisis químicos puntuales en las muestras con 16 y 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico en las que se encontró presunta evidencia de carburos de cromo, las imágenes que se presentan están tomadas mediante electrones retro dispersados por lo que los elementos más pesados son más brillantes, debido a esto se realizaron los análisis a las partículas más brillantes.

5.7 Discusión

En base a las metalografías a altos aumentos (tabla 18) y a los resultados de los análisis por microscopía electrónica de barrido (Figuras 17 a 22 y tabla 19) es posible explicar el comportamiento de las piezas en relación con las propiedades mecánicas evaluadas.

Las muestras en Condición de colada como se puede apreciar en las metalografías presentan un tamaño de grano grande (ASTM 1-2) con una matriz predominantemente perlítica con un espaciamiento interlaminar grande ($0.406 \mu\text{m}$), como se observa en la tabla 21 esto provoca que las propiedades mecánicas de estas piezas sean menores en comparación con las tratadas térmicamente.

El tamaño de grano y el espaciamiento interlaminar de la perlita influyen en las propiedades mecánicas debido a que la resistencia y rigidez de la cementita restringe la deformación de la fase ferrítica, este tipo de refuerzo es mayor en la perlita fina debido a la mayor área de contacto, esta restricción del movimiento de las dislocaciones se traduce en un incremento de las propiedades mecánicas en comparación a las piezas con perlita gruesa.

En el caso de las piezas en condición de colada las propiedades mecánicas son bajas debido a que el tamaño de grano y el espaciamiento interlaminar permiten que ocurra la deformación y fractura de la perlita gruesa.

Las muestras con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico presentan una microestructura muy diferente a la de las muestras en condición de colada, estas presentan un tamaño de grano muy fino con el menor espaciamiento interlaminar de la perlita ($0.133 \mu\text{m}$), he incluso zonas en las que se encuentra una transformación de fase (bainita y martensita) debido al rápido enfriamiento que sufrió en el ciclo térmico, todo esto impacta en las propiedades mecánicas de los materiales como se observa en la tabla 21, en ésta se aprecia que la resistencia a la tensión, la resistencia al impacto y la dureza ha aumentado considerablemente.

Otra explicación del aumento en las propiedades mecánicas es la posible presencia de carburos de cromo precipitados en la matriz.

Los análisis puntuales fueron de ayuda para determinar la composición química de los precipitados encontrados en las dos piezas con tratamiento térmico, los cuales son muy parecidos en composición.

Los resultados de las muestras con 16 horas de desmoldeo y tratadas térmicamente presentan un valor intermedio en todas las pruebas, esto se puede deber a que su microestructura es completamente perlítica con un espaciamiento interlaminar de la perlita de $0.148 \mu\text{m}$ que es mayor a la de 24 horas de desmoldeo, también a diferencia de las piezas con 24 horas de desmoldeo estas no presentan las zonas de bainita, esto implica que el tiempo de desmoldeo influyó en la capacidad de respuesta del material al tratamiento térmico.

Cabe mencionar que al comparar los resultados de las durezas de las piezas tratadas térmicamente se observa que las probetas con 24 horas de desmoldeo poseen en promedio una dureza de 382 HBW con una variación de ± 22 unidades lo que indica que esta pieza cumple con lo que establece la norma para este material, por otro lado, las probetas con 16 horas de desmoldeo presentan una dureza de 348 HBW con una variación de ± 15 unidades, por lo tanto en esta pieza existen zonas que no cumplen con lo que establece la norma, por lo que esta pieza debería ser rechazada.

Recomendaciones

Debido a que el tiempo de desmoldeo si influye en la respuesta al tratamiento térmico se debería de realizar un estudio para determinar el tiempo más adecuado de desmoldeo de las piezas, en el cual se alcancen las propiedades mecánicas que marca la norma (350-400 HBW), en el menor tiempo de producción.

También se deberían de realizar estudios por microscopía electrónica de barrido como: mapeos elementales para determinar la distribución del cromo y la presencia de carburos de cromo, análisis elementales puntuales más precisos que ayudarían a determinar la composición química de los precipitados presentes en las piezas

Conclusiones

CONCLUSIONES

Con base en la información generada a partir de todos los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Las propiedades promedio de la pieza en condiciones de colada (30 horas de desmoldeo) son: Resistencia a la tensión (UTS) 780 MPa, tamaño de grano ASTM (1-2), dureza de 280 HBW y una matriz de perlita gruesa.
- Las propiedades promedio de la pieza con un tiempo de desmoldeo de 24 horas con tratamiento térmico son: Resistencia a la tensión (UTS) 1157 MPa, tamaño de grano ASTM (7-8), una dureza de 382 HBW y una matriz de perlita fina con pequeñas cantidades de bainita y martensita asociada al tratamiento térmico con lo que se alcanza la dureza que marca la norma ASM para este material, por lo que esta condición de trabajo es la mejor para este proceso.
- Las propiedades promedio de la pieza con un tiempo de desmoldeo de 16 horas con tratamiento térmico son: Resistencia a la tensión (UTS) 823 MPa, tamaño de grano ASTM (7-8), una dureza de 348 HBW y una matriz predominantemente de perlita fina.
- El tiempo de desmoldeo si afecta a la respuesta al tratamiento térmico y las propiedades mecánicas del acero bajo estudio. Entre mayor sea el tiempo de desmoldeo mejor será la respuesta del material al tratamiento térmico, que se asocia a la fineza de la perlita y al tamaño de grano
- El espaciamiento interlaminar de la perlita está íntimamente relacionado con las propiedades mecánicas de las piezas, a medida en que éste se vuelve más fino las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión, resistencia al desgaste y dureza), aumentan debido a que las placas de cementita se van reforzando unas a otras.

REFERENCIAS

- [1] Montes, J.M. y Cuevas F. G. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. España: Ediciones Paraninfo, 1ª edición, páginas 309-313
- [2] Avner, Sydney H. (1981). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill 2ª Edición. páginas 348-351
- [3] Shmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Prentice Hall. 4ª Edición. páginas 169- 173
- [4] Blair, M. y Stevens, T. (1995). *Steel Castings Handbook*. USA:ASM International 6ª edition. Capítulo 19 Wear Resistant Steels.
- [5] American Society for Testing and materials (2019). *Elementos químicos y efectos sobre las propiedades mecánicas del acero*, 25-07-2019. <<http://www.astmsteel.com/steel-knowledge/chemical-elements-and-effects-mechanical-properties/>>
- [6] Zapata Orozco, D. A. (2011) *Efecto de la microestructura sobre la resistencia al desgaste por rodadura-deslizamiento de aceros ferroviarios*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- [7] Gutiérrez, J.C. y Toro, A. (2004). *Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera*. Revista ciencia Universidad tecnológica de Pereira Vol. 2 Núm. 25
- [8] Chandler,H. (1995). *Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels*. USA ASM International 2ª edition.
- [9] American Society for Metals (1977). *Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams*. USA ASM International.
- [10] American Society for Testing and materials. ASTM-E8M *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Vol. 03.01
- [11] American Society for Testing and materials. ASTM-E23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Vol. 03.01
- [12] American Society for Testing and materials. ASTM G99-95 *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. Vol. 03.02
- [13] American Society for Testing and materials. ASTM E10- *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. Vol. 03.01
- [14] American Society for Testing and materials. ASTM E112. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. Vol. 03.01

Anexos

ANEXOS

Anexo I

A continuación, en las figuras 5 a 13 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las muestras estudiadas

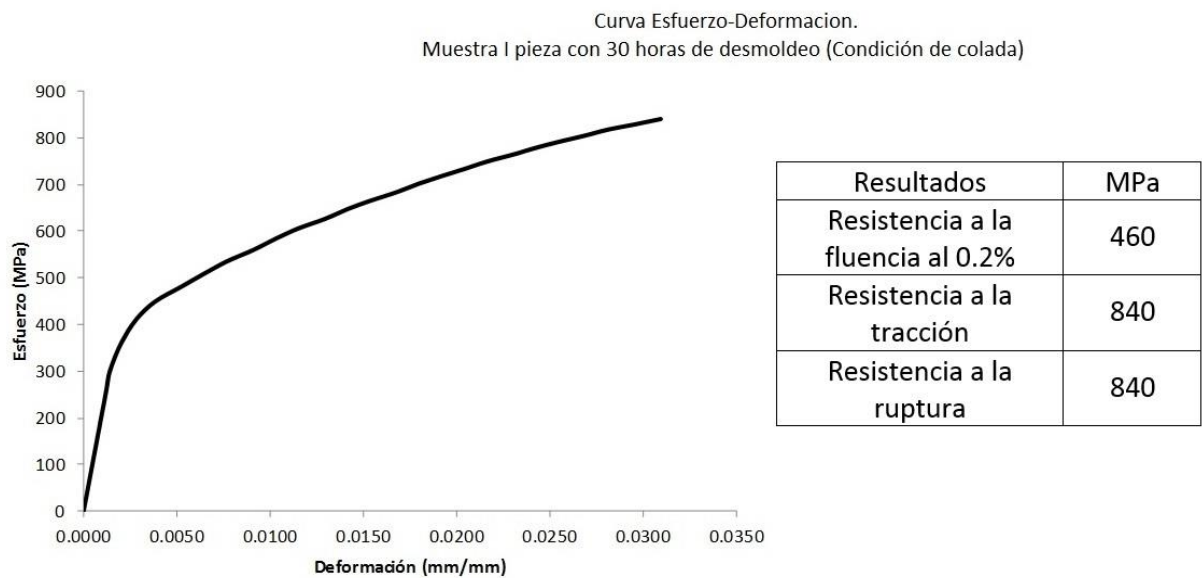


Figura 5 Condición de colada (30 hrs de desmoldeo) I

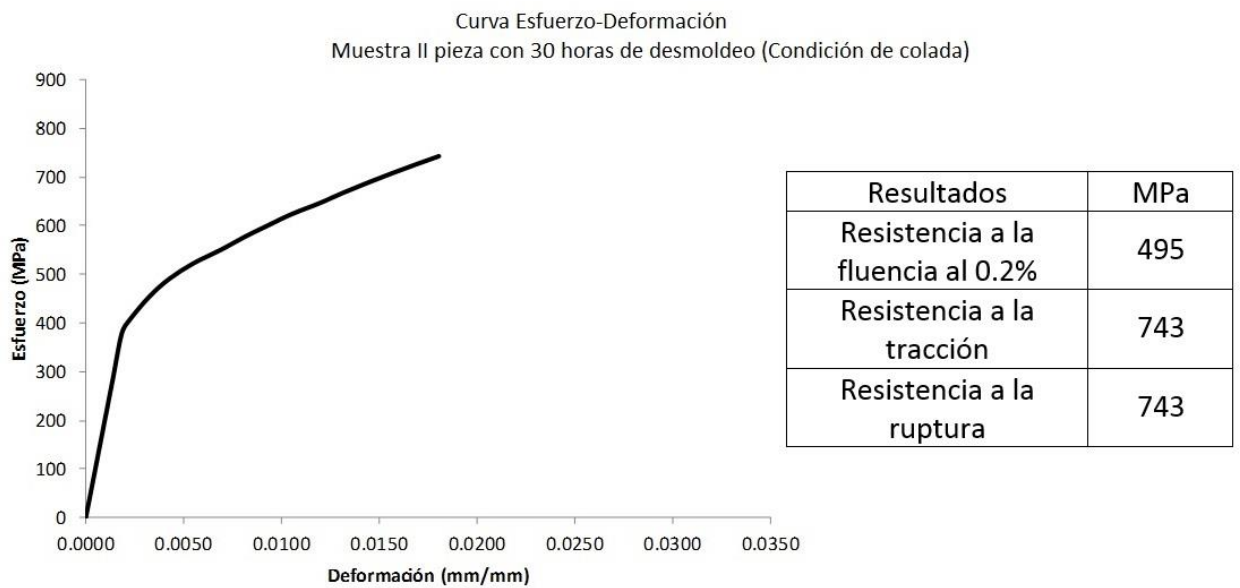


Figura 6 Condición de colada (30 hrs de desmoldeo) II

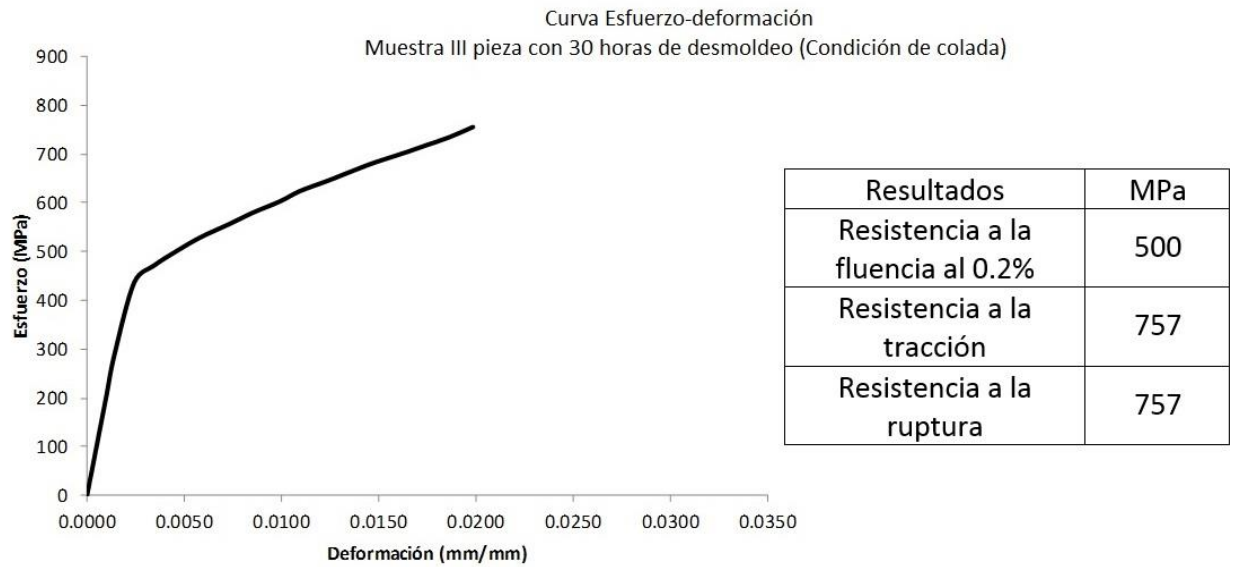


Figura 7 Condición de colada (30 hrs de desmoldeo) III

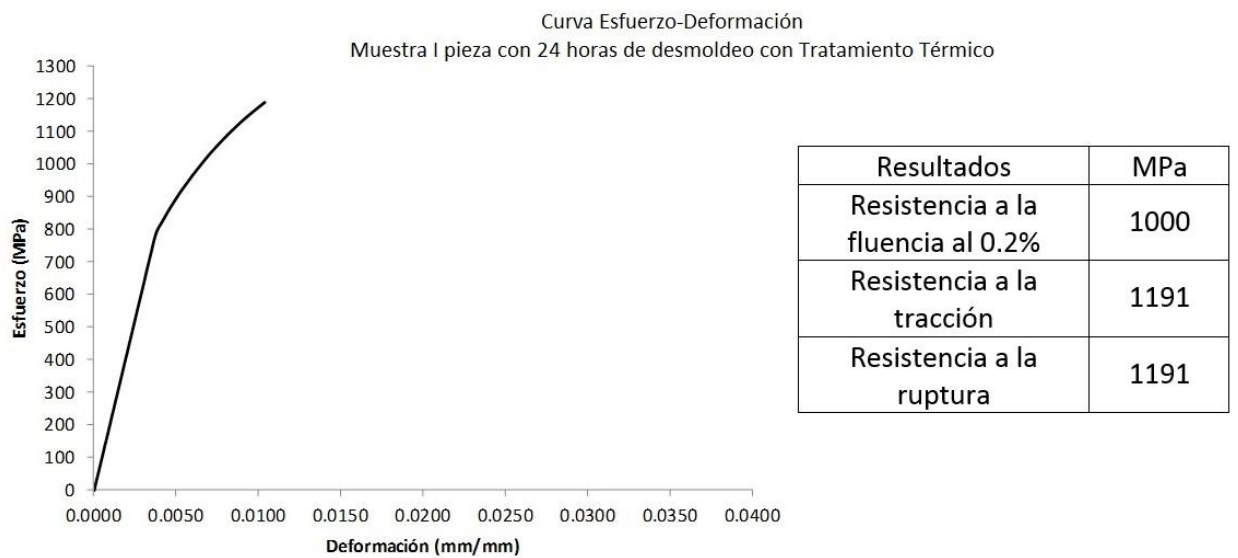


Figura 8 Muestra con 24 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico I

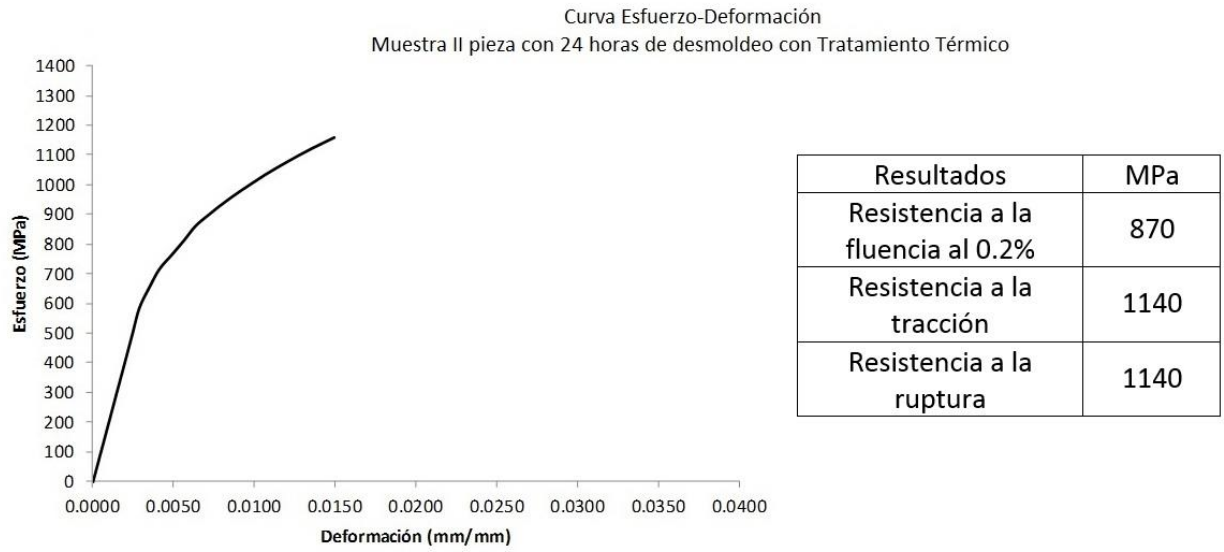


Figura 9 Muestra con 24 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico II

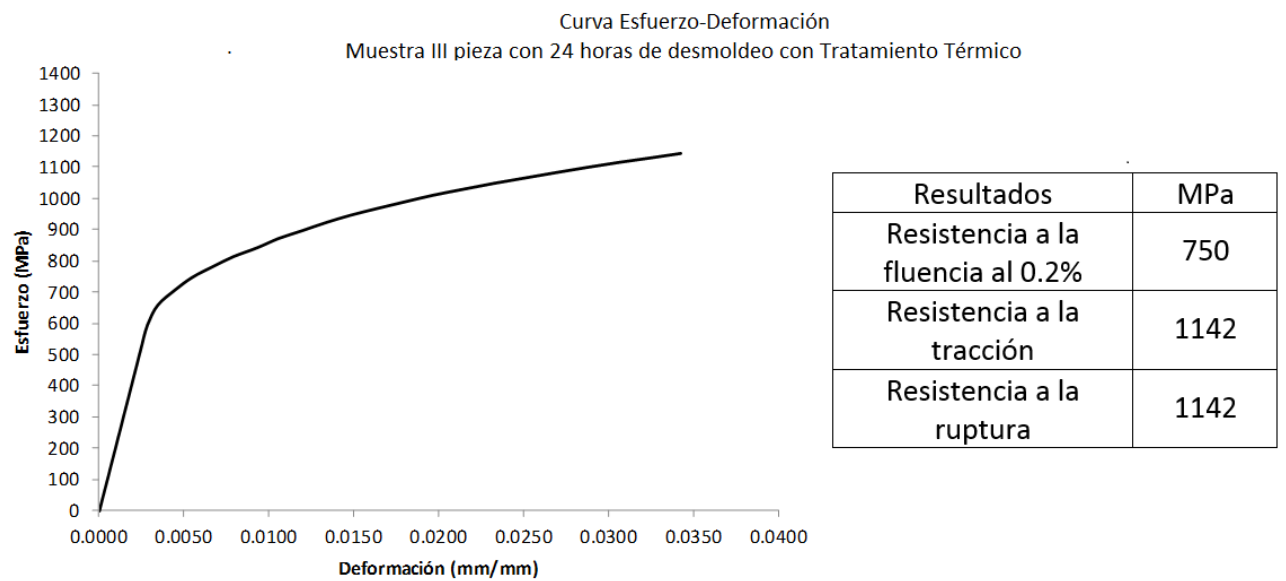


Figura 10 Muestra con 24 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico III

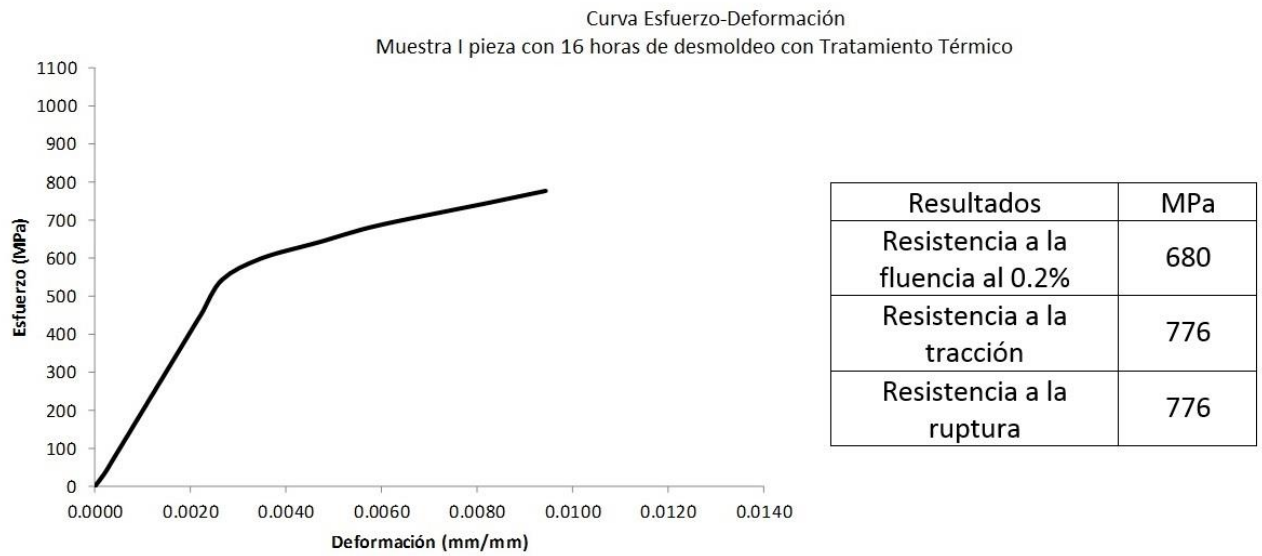


Figura 11 Muestra con 16 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico I

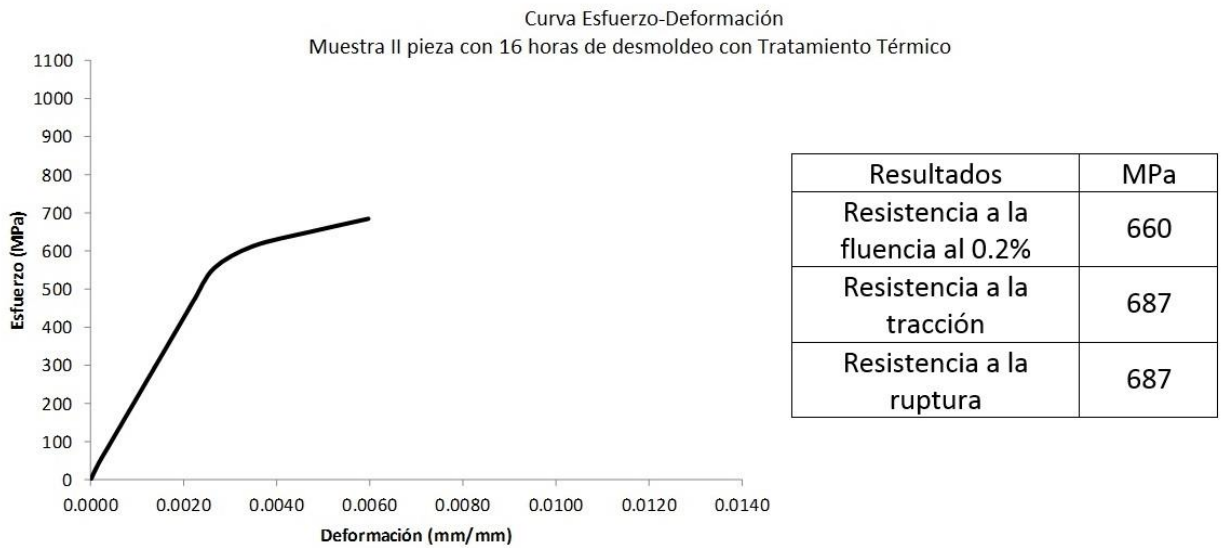


Figura 12 Muestra con 16 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico II

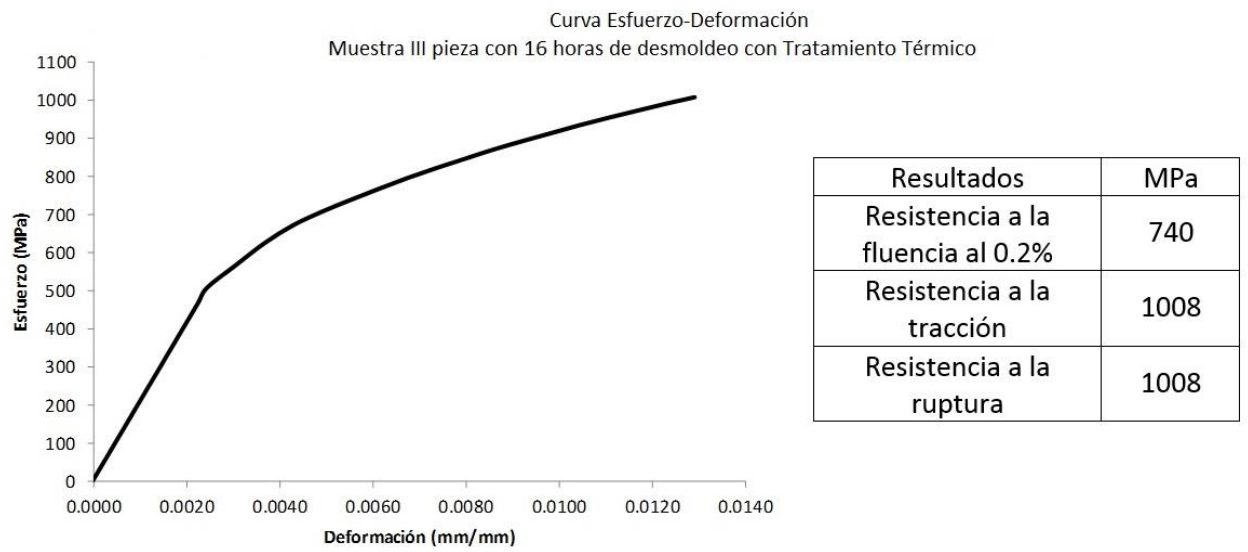
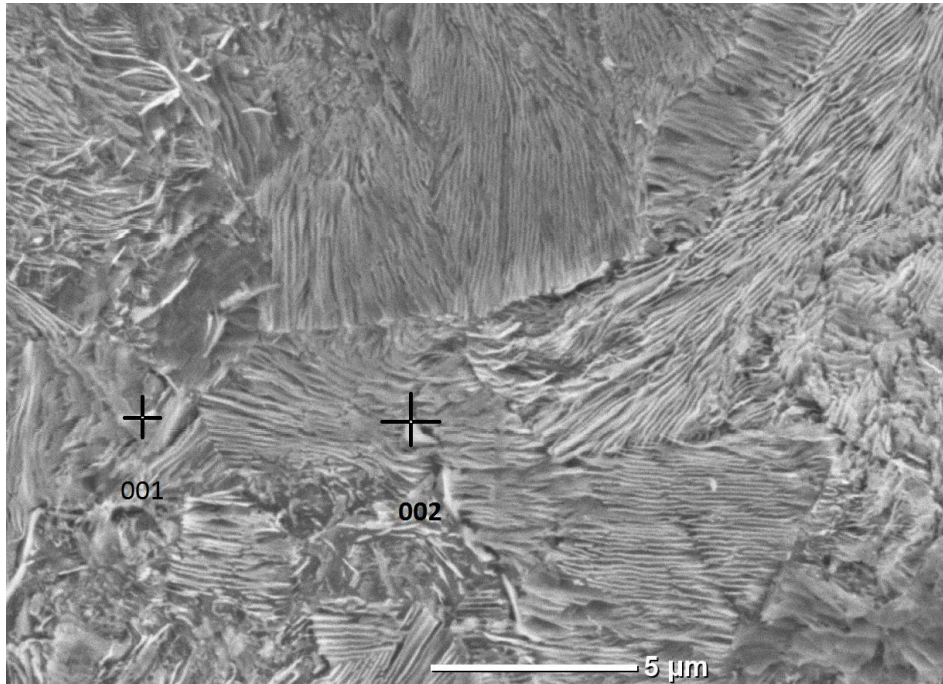


Figura 13 Muestra con 16 hrs de desmoldeo con Tratamiento Térmico III

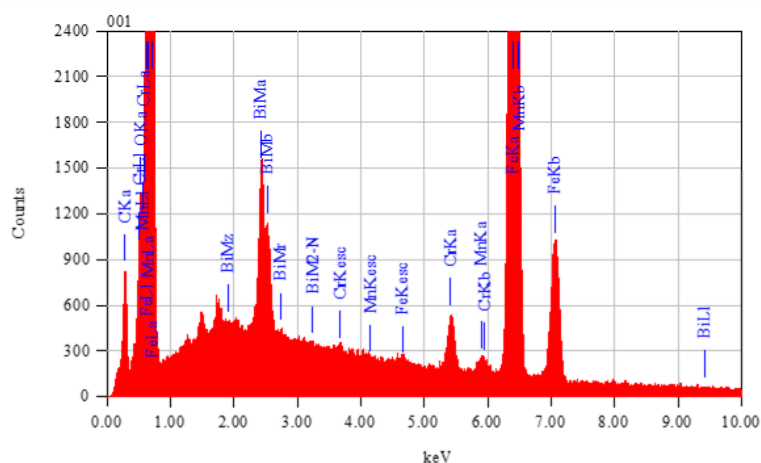
Anexo II

Análisis químico elemental puntual de los precipitados encontrados en las piezas con 16 y 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico

Análisis químico elemental puntual de la pieza con 16 horas de desmoldeo con tratamiento térmico



Precipitado 1



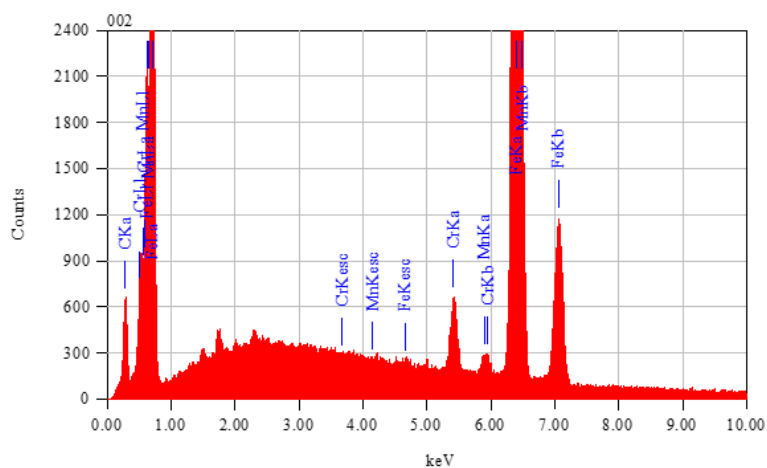
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current: 7.47500 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 34.42 sec
 Live Time : 30.00 sec

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient: 0.0108

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K*	0.277	4.66	0.04	18.75				1.7066
O K	0.525	1.73	0.03	5.24				2.3445
Cr K	5.411	2.21	0.04	2.06				2.6550
Mn K	5.894	0.68	0.04	0.59				0.6958
Fe K	6.398	82.57	0.27	71.47				86.6648
Bi M	2.419	8.15	0.10	1.89				5.9333
Total		100.00		100.00				

Precipitado 2



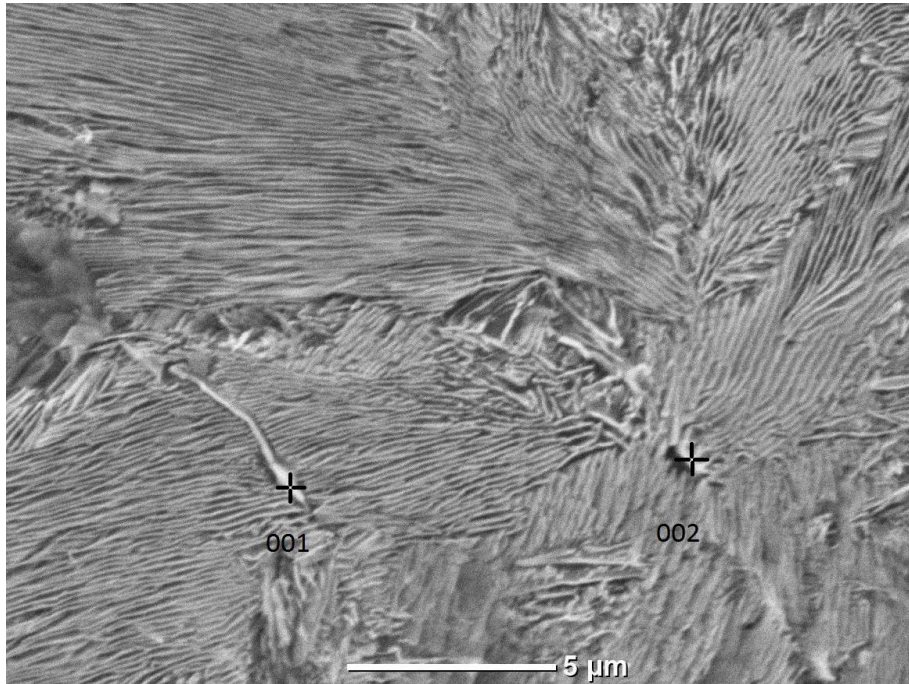
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current: 7.47500 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 33.88 sec
 Live Time : 30.00 sec

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

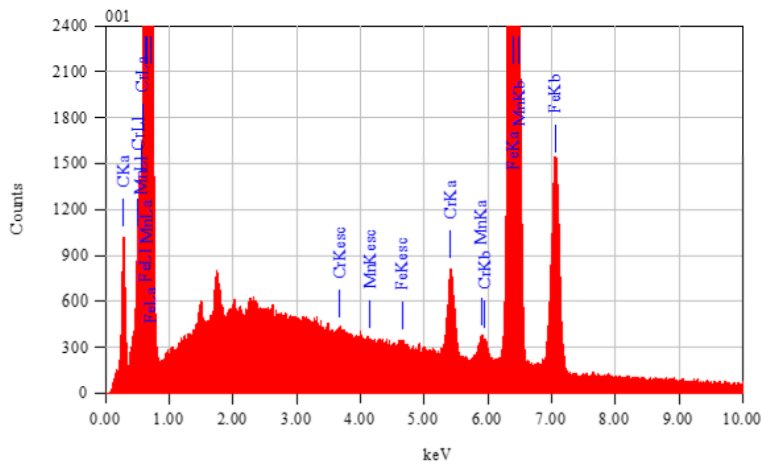
Fitting Coefficient : 0.0111

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	4.36	0.03	17.46				1.4869
Cr K	5.411	2.75	0.05	2.54				3.4392
Mn K	5.894	0.82	0.04	0.72				0.8274
Fe K	6.398	92.07	0.29	79.28				94.2465
Total		100.00		100.00				

Análisis químico elemental puntual de la pieza con 24 horas de desmoldeo con tratamiento térmico



Precipitado 1



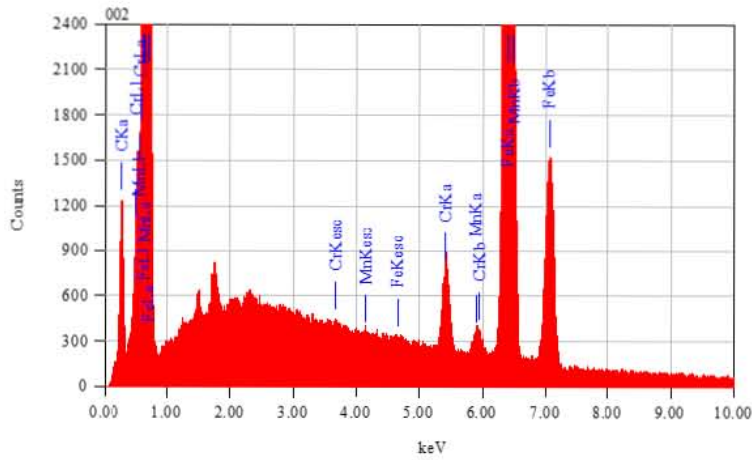
Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current: 7.47500 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 35.64 sec
 Live Time : 30.00 sec

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.0098

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K*	0.277	4.93	0.03	19.38				1.6867
Cr K	5.411	2.43	0.04	2.21				3.0573
Mn K	5.894	0.84	0.04	0.73				0.8550
Fe K	6.398	91.80	0.25	77.69				94.4010
Total		100.00		100.00				

Precipitado 2



Acquisition Parameter
 Instrument : JCM-6000PLUS
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current: 7.47500 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 35.72 sec
 Live Time : 30.00 sec

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.0105

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C K ^α	0.277	5.94	0.03	22.65				2.0499
Cr K	5.411	2.52	0.04	2.22				3.1941
Mn K	5.894	0.81	0.04	0.67				0.8233
Fe K	6.398	90.74	0.24	74.46				93.9327
Total		100.00		100.00				