

CARACTERIZACION DE PROBETAS SOLIDIFICADAS EN UN MOLDE METÁLICO

J. S. Pacheco ⁽¹⁾, P. Garnica ⁽¹⁾, L. Béjar ⁽²⁾, y E. Hurtado ⁽¹⁾

(1) Posgrado en Metalurgia, Instituto Tecnológico de Morelia, MEXICO

(2) Facultad de Ing. Mecánica, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, MEXICO.
spacheco_isa@hotmail.com

RESUMEN

La distribución microestructural juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas de los aceros, ya que esta determina su resistencia a la tensión, torsión, flexión y dureza. Dos muestras pueden tener la misma composición química, pero la forma en que estén distribuidas sus fases marcara la diferencia en sus propiedades. Para esto, puede influir la forma en que ha sido solidificado o la forma del llenado de las mismas en moldes metálicos empleados principalmente en la solidificación de aceros. El presente trabajo analiza el comportamiento microestructural y propiedades mecánicas de probetas de aceros vaciadas en un molde metálico. Donde el molde produce probetas cuadradas, las cuales se comunican en su parte inferior, esto con la intención de llenar una de las cavidades por la parte inferior y la segunda cavidad por la parte superior y de esta forma comparar el tipo de llenado, así como el comportamiento microestructural de las mismas. El llenado del molde se hizo con un acero base AISI-1018, el cual se fundió en un horno de inducción, al cual se le agrego 0.8% Si y 0.9% Mn (% en peso), para posteriormente ser vaciado en un molde metálico y se monitorearon las temperaturas en diferentes regiones del molde durante la solidificación, las cuales nos han servido para determinar el coeficiente de transferencia de calor "HTC" entre la superficie de la pieza y el molde metálico y posteriormente analizar la distribución de las fases presentes en cada una de las regiones, tanto superior como la inferior en el molde. El análisis microestructural se realizo con la ayuda del analizador de imágenes y durómetro para observar tanto la distribución de fases como la dureza en cada una de las probetas.

La determinación del HTC en 2 dimensiones es uno de los puntos clave de este trabajo, ya que se ha podido comprobar la dependencia de la geometría con este parámetro, el cual repercute directamente sobre la solidificación del acero y a su vez sobre la microestructura del mismo. Así mismo se ha determinado que las mejores probetas experimentales se obtienen cuando la cavidad es llenada por la parte inferior, ya que muestra una mejor distribución de fases y homogeneidad en la dureza.

Tópico 2: Materiales Metálicos.

Palabras claves: Solidificación, análisis microestructural, cálculo del HTC, flujo de calor.

1. INTRODUCCION

Los metales, han tomado gran importancia gracias a sus propiedades mecánicas y de proceso (resistencia y maleabilidad), de aquí que muchos trabajos se han concentrado en el estudio del comportamiento de las fases presentes en los metales antes y después del procesamiento.

Dentro de los estudios que se han realizado, se encuentran los que modifican la cantidad de alguno de los elementos de aleación (C, Mn, Cu, Cr, Ni, B, Zn, Si y Al), con la finalidad de estabilizar las fases típicas del material. Los trabajos realizados al material después de procesado, consisten en evaluar las fases existentes antes y después de realizar algún proceso termomecánico. Dejando de lado el estudio del material al momento de su solidificación y más aun la influencia del medio de enfriamiento sobre las fases presentes, que sin duda alguna este es un camino importante por explorar.

El hablar de medio de enfriamiento nos hace voltear la atención hacia los elementos que lo componen, metal en estudio, medio ambiente y molde. Siendo este ultimo el punto de interés del presente trabajo. Para lo cual es importante comprender los fenómenos que se presentan entre el metal, molde y medio ambiente durante el proceso de solidificación en moldes metálicos [1].

Cuando un metal fundido es vaciado en un molde, la cantidad de calor que pierde está controlado por el número de condiciones térmicas que se presentan en el sistema, la figura 1 muestra la solidificación de un metal para una geometría simple. En la cual se observa como en diferentes partes del sistema metal-molde, se presentan los fenómenos de conducción **K**, convección **C**, **N** y radiación **R**.

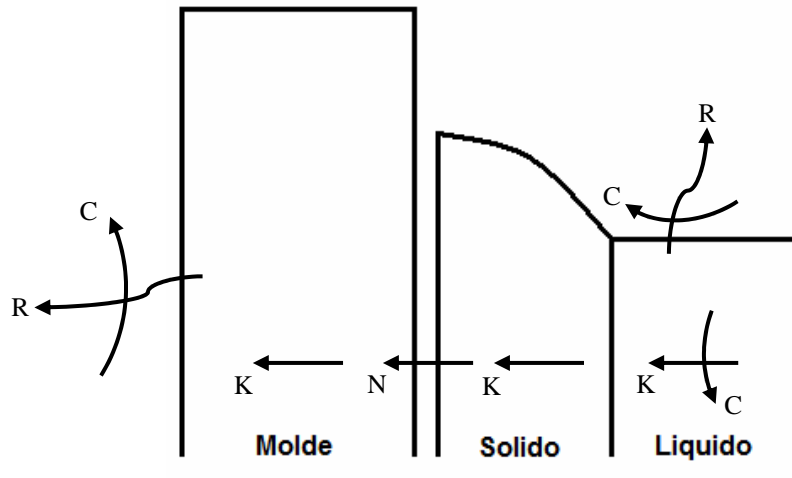


Figura 1. Condiciones térmicas para la solidificación de un metal.

El tratar este problema resulta bastante complejo debido a varias razones, a la generación continua de calor latente en la interface solido-liquido la cual se va moviendo durante la solidificación, a la geometría que se forma en la interface solido-liquido que puede ser plana o dendrítica, y así como de las propiedades físicas del sistema metal-molde con la temperatura. Debido a que las mayores restricciones para remover el calor latente son la solidificación misma del metal, la interface metal-molde y el molde mismo, el proceso de solidificación es principalmente regulado por la difusión y la transferencia de calor en la interface del metal y el molde.

El proceso de convección interna del metal fundido es muy importante ya que puede influir sobre la solidificación a nivel micro y macroscópico. A nivel macroscópico puede cambiar la forma de la isoterma y con esto reducir el gradiente térmico al interior de la región líquida y también las condiciones de solidificación local, así como la macrosegregación y por ende la microestructura. De aquí la importancia de conocer la forma en que se da la transferencia de calor al momento de la solidificación, para esto es de suma importancia el conocer la distribución de temperaturas en el molde al momento de la solidificación [1].

La calidad de los productos moldeados se ha mejorado en gran medida con la ayuda de la simulación de procesos. Y para obtener resultados eficaces y confiables, es indispensable que la distribución de temperaturas dentro del metal y el molde se conozca con precisión en cada punto. Esto requiere una gran claridad en la determinación de las condiciones de frontera, y una muy importante es el coeficiente de transferencia de calor (**HTC**) entre el molde y el medio de enfriamiento [2]. Dicho coeficiente puede ser determinado por la siguiente relación:

$$q'' = h * (T_c - T_m) \quad (1)$$

Donde q'' es el flujo de calor a través de la interface del molde, T_c y T_m son las temperaturas en la superficie de la pieza y del molde respectivamente. Para la determinación del HTC, es indispensable conocer el valor de q'' , el cual puede estimarse por distintos medios, uno puede ser utilizando un sensor de flujo de calor [3], otra forma es calculándolo en la interface del molde y el metal por medio de la expresión:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

O determinar el valor de HTC por métodos indirectos donde se estima el valor del flujo de calor. En los cuales se aplica el método inverso para transferencia de calor para lo cual es necesario la instrumentación y medición de temperaturas cerca de la interface entre el molde y el metal [4-6].

Es importante tener en cuenta que para obtener buenos resultados en las simulaciones de transferencia de calor entre el metal y el molde, se depende en gran medida de los parámetros del proceso experimental y sobre todo la

conducción de calor entre metal y molde [7]. Existen muchos factores que pueden afectar la conducción de calor entre metal y molde, como: la geometría del molde y la probeta, la rugosidad de las superficies del molde en contacto con el metal, la presión de contacto, la temperatura del metal así como la temperatura inicial del molde.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental del proyecto se ha desarrollado en 4 etapas:

- 1^{er} Etapa: Fabricación e instrumentación del molde metálico.
- 2^a Etapa: Fusión del metal y adquisición de datos térmicos.
- 3^{er} Etapa: Caracterización metalográfica de probetas.
- 4^a Etapa: Simulación matemática con el software DEFORM.

El molde ha sido fabricado con un acero AISI-1010, es tipo bipartido y consta de 2 cavidades figura 2. Ya ensamblado, produce probetas cuadradas de 25.4mm con las esquinas redondeadas con un radio de 6.35mm y una longitud de 240mm figura 3.

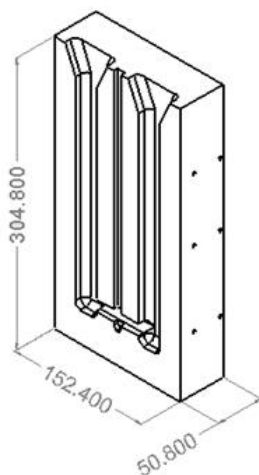


Figura 2. Molde Metálico

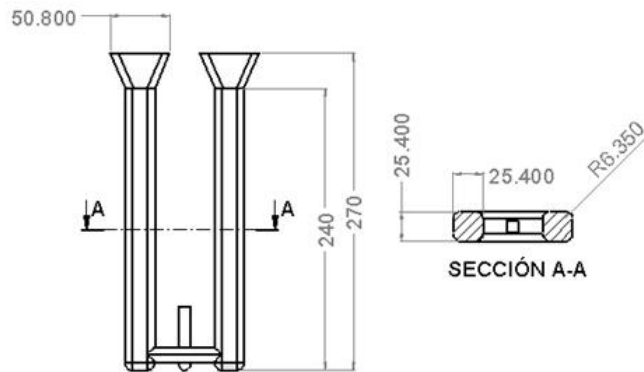


Figura 3. Probetas producidas en el molde.

El molde ha sido instrumentado con 16 termopares tipo k, los cuales registran la temperatura del mismo, en la superficie entre el molde y el acero fundido, así como en el centro de la probeta que se genera figura 4.

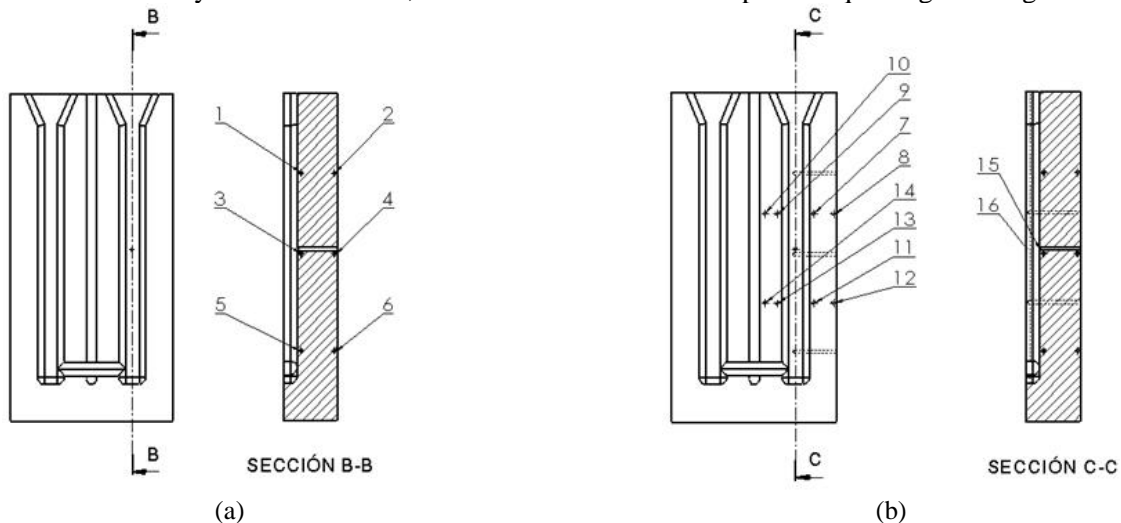


Figura 4. Posición de los termopares a) cara lateral. b) cara frontal y probeta.

El metal utilizado en este trabajo fue un Acero AISI-1018, al cual se le agrego 0.8% Si y 0.9% Mn (% en peso), una vez líquido fue vaciado en el molde instrumentado. El registro de las temperaturas dentro del molde y en la probeta se llevó a cabo cada 1 segundos, tales valores son utilizados para determinar el HTC con la ayuda del software DEFORM.

Una vez obtenidas las probetas se cortaron, pulieron y atacaron químicamente para ser observadas en el analizador de imágenes, en el cual se obtuvieron fotografías a diferentes posiciones de las zonas más importantes en cada probeta figura 5. Después de adquirir las imágenes se hicieron pruebas de dureza para ver la homogeneidad en las mismas.

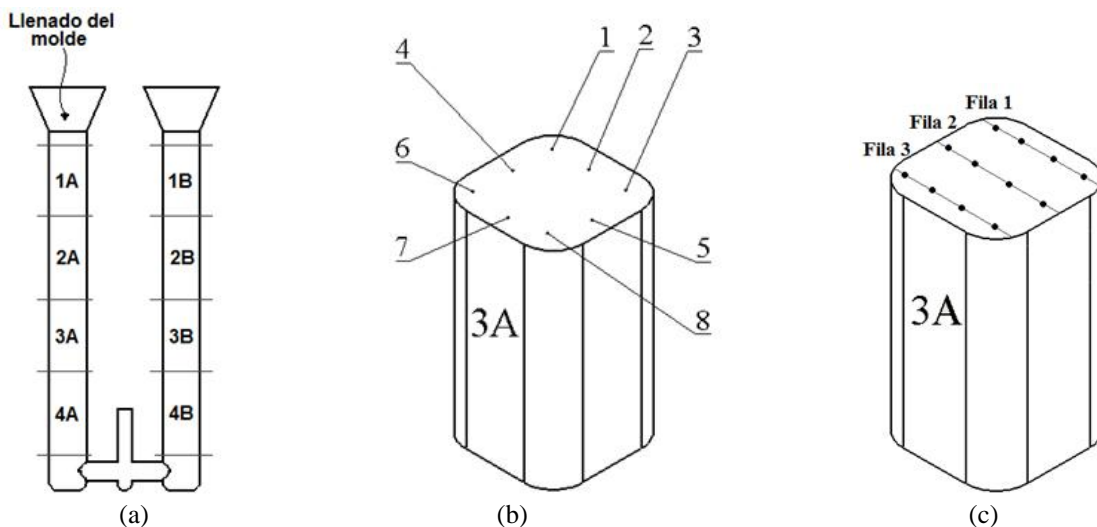


Figura 5. Muestras para análisis metalográfico. a) Identificación de probetas. b) Zonas de análisis microestructural. c) zonas de análisis de dureza.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 6 se muestran las distribuciones de temperatura experimental tanto en el molde como en la probeta, en las cuales podemos notar el incremento y decremento rápido de la temperatura en los termopares más cercanos a la probeta que corresponden a los puntos 1, 3, 5, 7, 9, 11, y 13 figura 6 (a) y (b). Así mismo se puede notar como la temperatura del centro de la probeta es mayor que en la superficie figura 7.

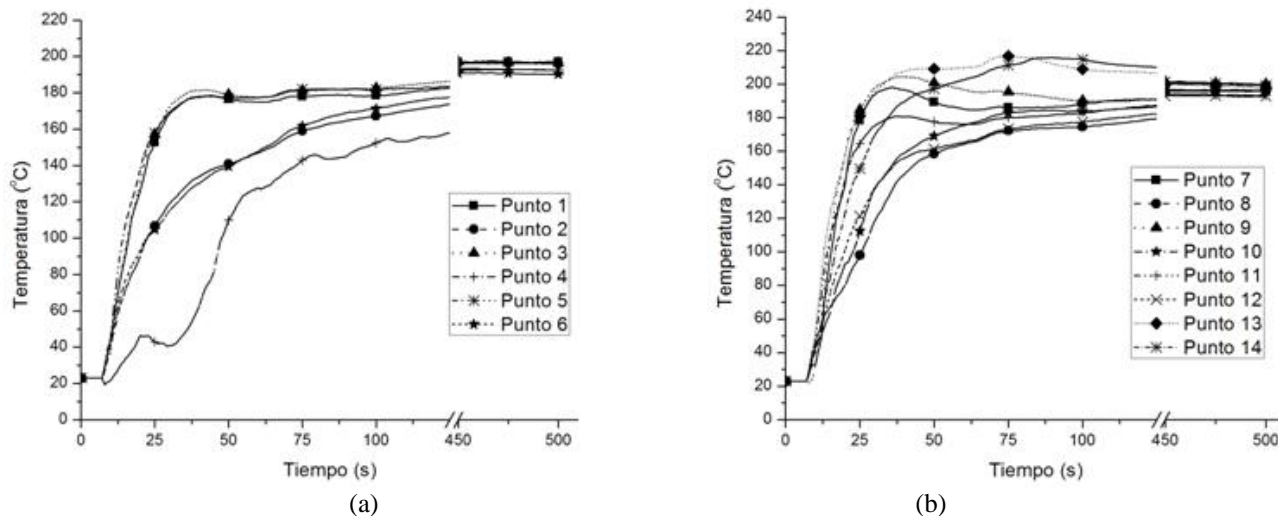


Figura 6. Distribución de temperaturas. a) Cara lateral. b) Cara frontal.

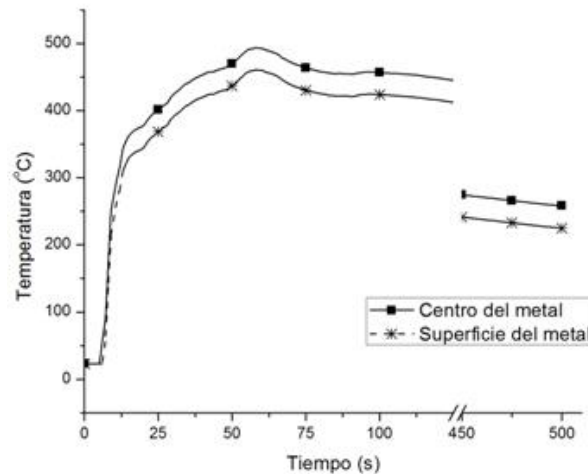


Figura 7. Distribución de temperaturas en la superficie y centro de la probeta.

En la figura 7 como se observa el valor máximo de temperatura registrado en la probeta vaciada es de 494 °C, lo cual difiere en mucho de los valores promedio de temperatura de fusión de un acero (1550 °C), lo cual nos indica que el tipo de tarjeta de adquisición de datos no es la adecuada para la aplicación, ya que el proceso de solidificación se lleva a cabo en un periodo de tiempo muy corto y los mayores índices de transferencia de calor se realizan en los primeros segundos (0-5). La tarjeta utilizada solo tiene capacidad para adquirir 1 dato por segundo.

Aun así, con estos datos térmicos, se realizó el cálculo del HTC en función del tiempo en cada una de las caras expuestas figura 8 (a) con la ayuda del DEFORM-2D, los valores obtenidos se muestran en la figura 8 (b). En la cual se observa que la cara lateral tiene un HTC menor, el cual corresponde a la cara de menor espesor, mostrando la dependencia del HTC con la geometría del molde.

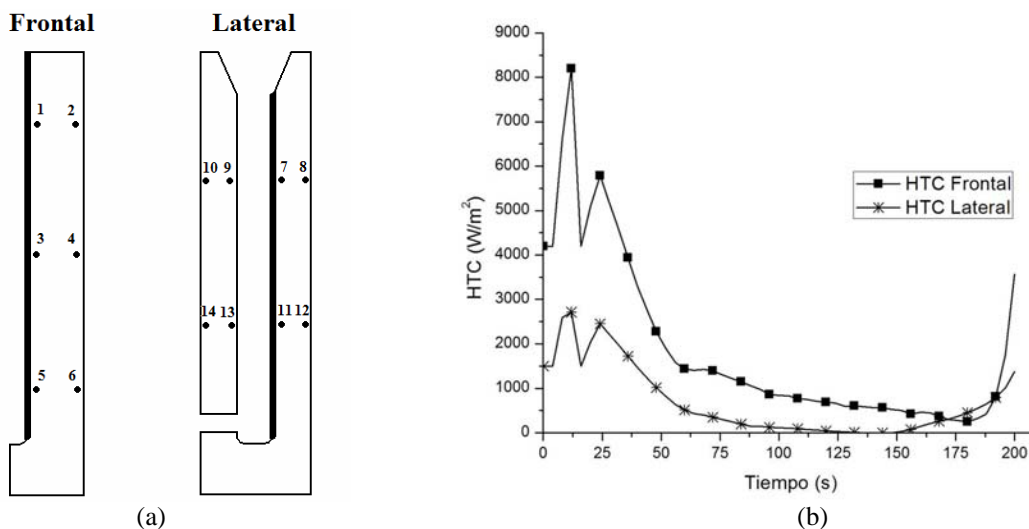


Figura 8. Coeficientes de transferencia. a) Zonas de transferencia. b) HTC's.

Con estos valores de HTC, se realizó la simulación de transferencia de calor en modelo en 3-D para observar la forma como se distribuye la temperatura en el molde y determinar las zonas donde hay mayor flujo de calor y por ende mayor extracción del mismo, lo cual tiene influencia directa en la velocidad de solidificación. La validación de esta simulación se realizó comparando las temperaturas experimentales con las simuladas en el modelo 3-D en los mismos puntos. Algunos de los resultados se muestran en la figura 9, los cuales fueron obtenidos mediante la utilización de los dos HTC en las zonas señaladas.

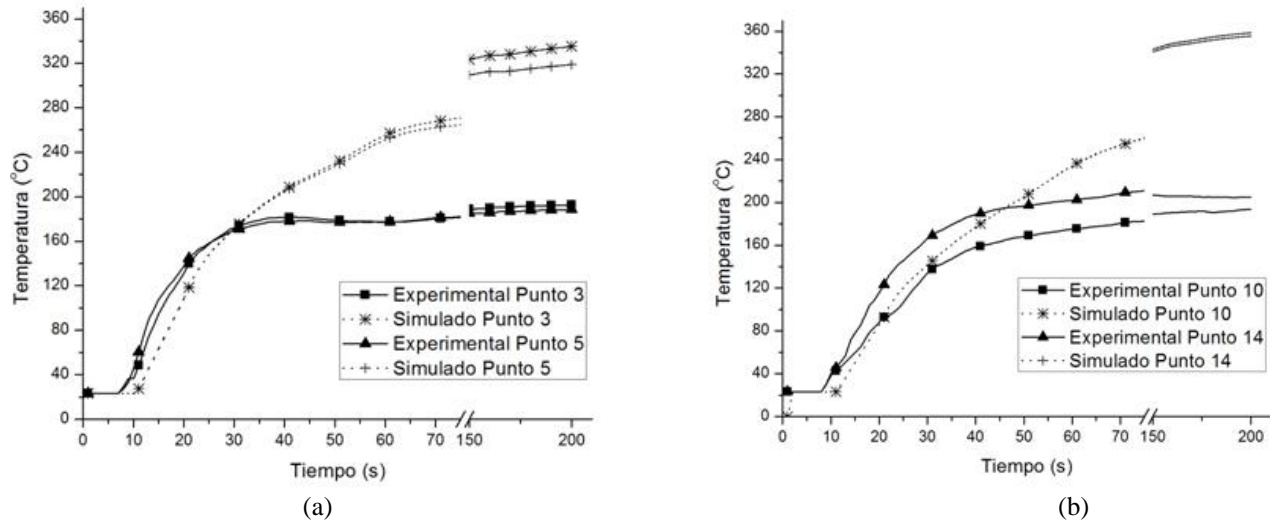


Figura 9. Temperaturas simulada y experimental a) Punto 3 y 5. b) Punto 10 y 14.

Como se puede observar en la figura 9 (a) y (b) las temperaturas experimentales y simuladas tienen una buena aproximación durante los primeros 30 segundos y posteriormente se separan, lo cual es un punto importante de análisis.

Muchos investigadores han analizado el comportamiento del HTC con geometrías simples, en las cuales solo se tiene una superficie de contacto, con espesor constante y por lo tanto un solo coeficiente de transferencia, de aquí la importancia del trabajo que se ha realizado, ya que se presenta espesores variables con varias superficies de contacto.

El análisis microestructural y de dureza se llevó a cabo en 8 probetas figura 5 (a). Los resultados que se muestran en las figuras 10, 11, 12 y 13 corresponden a las probetas 3A, 4A, 3B y 4B respectivamente, se analizaron estas muestras en especial, ya que de acuerdo al modelo simulado y a las temperaturas simuladas son las zonas donde hay mayor y menor concentración de calor.

Las figuras 10 y 11 corresponden a las muestras de la probeta que fue llenada por la parte superior y las figuras 12 y 13 a las de la probeta llenada por la parte inferior. De donde se puede observar que la probeta llenada por la parte inferior muestra una mejor distribución de fases lo cual puede ser resultado de una menor generación de turbulencia del acero líquido al momento del llenado. De igual forma podemos observar como los valores de dureza son más consistentes en la probeta llenado por la parte inferior.

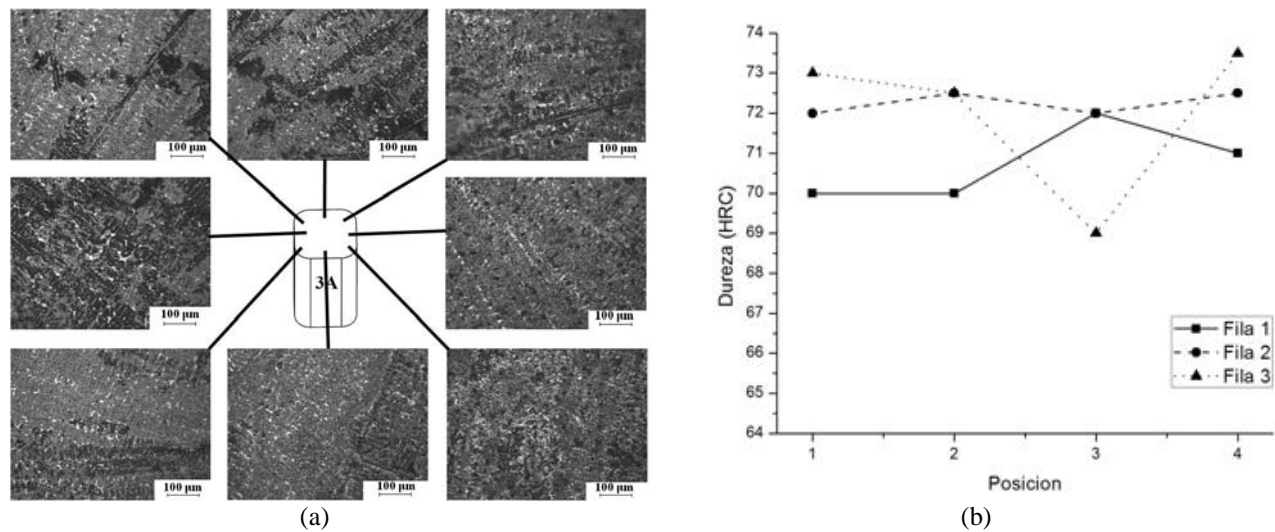


Figura 10. Análisis microestructural y dureza en probeta 3A a) distribución de fases b) pruebas de dureza.

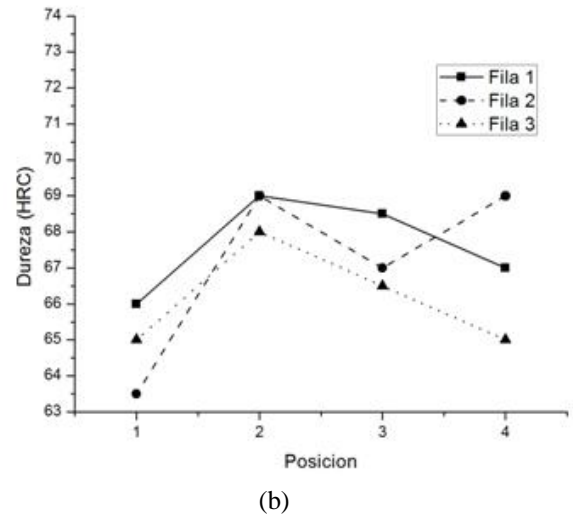
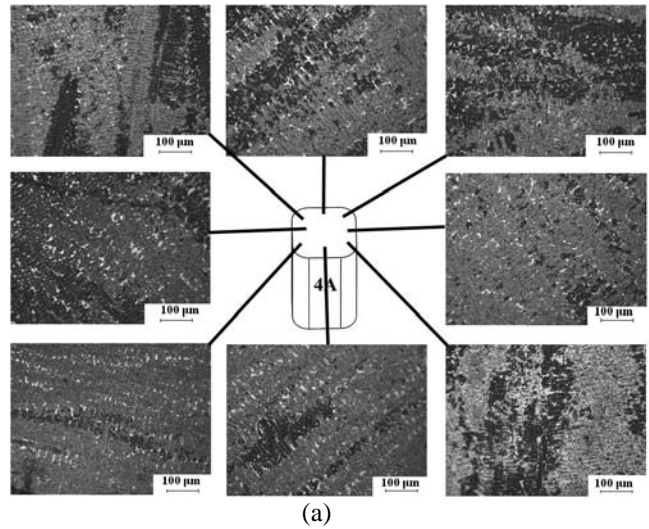


Figura 11. Análisis microestructural y dureza en probeta 4A a) distribución de fases b) pruebas de dureza.

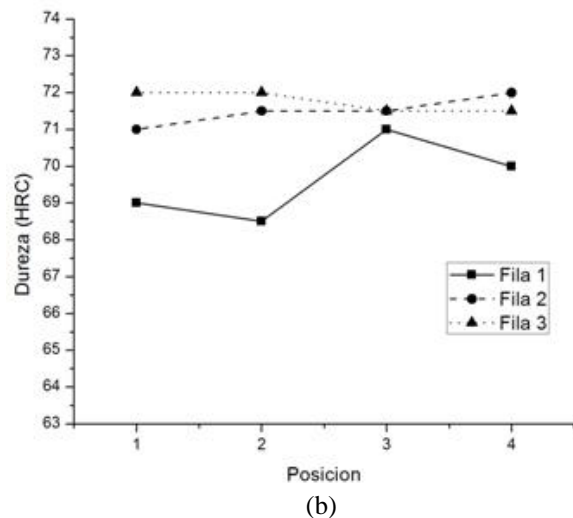
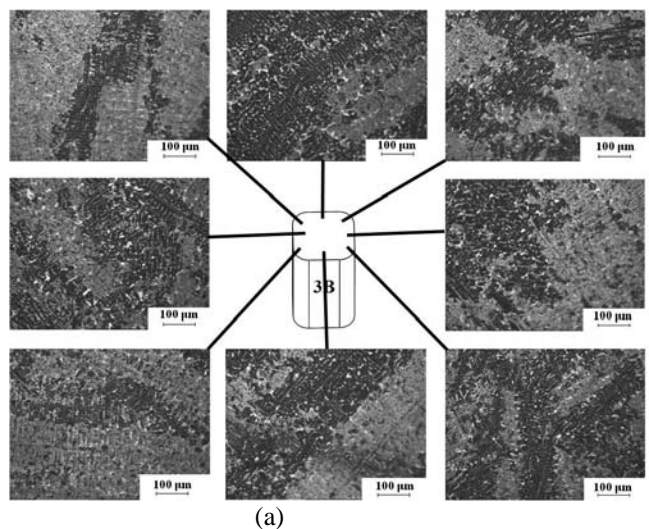


Figura 12. Análisis microestructural y dureza en probeta 3B a) distribución de fases b) pruebas de dureza.

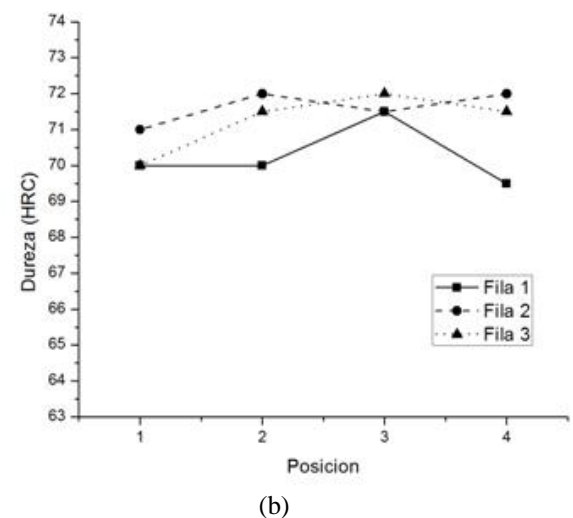
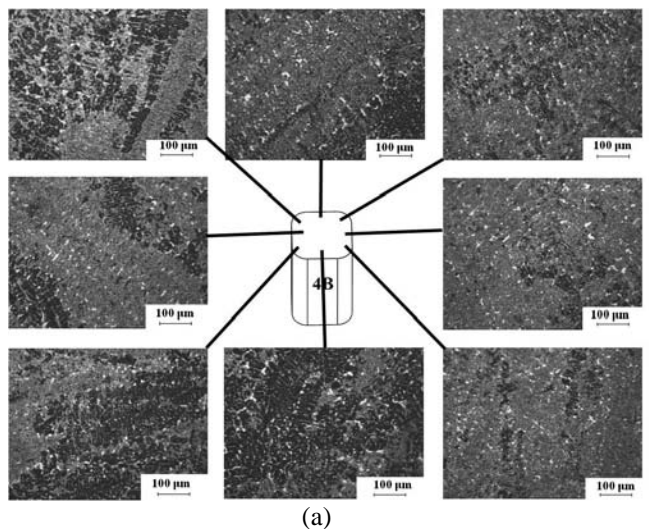


Figura 13. Análisis microestructural y dureza en probeta 4B a) distribución de fases b) pruebas de dureza.

El tamaño de grano puede indicar que tan rápido ha sido su solidificación, entre más grande sea este, su solidificación ha sido lenta. En la figura 12 se puede observar como el tamaño de grano es mayor que el de la figura 13, lo cual indica que la solidificación ha sido más rápida en la parte inferior. Esto corresponde con la acumulación de calor, ya que la zona de mayor concentración de calor es en la parte central de la probeta.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la parte experimental, se tienen las siguientes conclusiones:

- 1.- El molde funciona correctamente y se puede utilizar para futuros experimentos en el diseño de nuevas aleaciones, de donde las mejores probetas experimentales se obtienen cuando la cavidad es llenada por la parte inferior.
- 2.- Se requiere de un equipo de adquisición de datos de mayor capacidad, ya que 1 dato/s, no es suficiente para realizar un buen cálculo del coeficiente de transferencia de calor (HTC), ya que las temperaturas simuladas contra las experimentales solo tienen una buena aproximación durante los primeros 30 segundos.
- 3.- El coeficiente de transferencia de calor (HTC) muestra una gran dependencia de la geometría del molde y la pieza.
- 4.- Para la obtención de una probeta más homogénea en su distribución de fases es necesario controlar la extracción de calor en la parte central de la probeta.

5. REFERENCIAS

- [1] Robert W. Cahn, Peter Haasen. "Physical Metallurgy Vol. 1", 4ª Edición (1996), Netherlands, pp. 670-680.
- [2] A. Meneghini, G. Sangiorgi Cellini and L. Tomesani: "Modeling heat transfer coefficient at cast/chill interface to account for effects of metal head". International Journal of Cast Metals Research Vol. 20 (2007) pp 159-162.
- [3] A. S. Sabau: "Measurement of heat flux at metal/mould interface during casting solidification". International Journal of Cast Metals Research Vol. 19 (2006) pp 188-194.
- [4] M. Krishnan and D.G. R. Sharma: "Heat Mass Transf.". Int. Commun. Vol. 23 (1996) pp 203.
- [5] Z. H. Lee, T. G. Kim and Y. S. Choi: "Trans. B". Metal Mater. Vol. 29B (1998) pp 1051-1056.
- [6] E. N. Souza, N. Cheung, C.A. Santos and A. Garcia: "Inverse Problems: design and optimization symposium". Materials Science and Engineering A. 397(2005) pp 239-248.
- [7] K. Ho and R. D. Pehlke: "AFS Trans." 91(1983) pp 689-698.