



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE FILTROS DE ESPUMA CERÁMICA EN UNA COLADA MEDIANTE
LA TÉCNICA DE MOLDEO EN VERDE EN ALEACIÓN 535**

TESIS

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

PRESENTA

RAFAEL VÁZQUEZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

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: EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: Profesor: ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

SECRETARIO: Profesor: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

1er. SUPLENTE: Profesor: JOSÉ ALFREDO DELGADO ÁLVAREZ

2° SUPLENTE: Profesor: HÉCTOR ISRAEL QUIROGA HERRERA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CONJUNTO D, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, LABORATORIO DE FUNDICIÓN.

ASESOR DEL TEMA:

DR. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SUSTENTANTE (S):

RAFAEL VÁZQUEZ RAMÍREZ

Índice

Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Hipótesis.....	3
Capítulo I: Antecedentes.....	4
Capítulo II: Marco teórico.....	15
2.1 Descripción de la aleación aluminio magnesio 535.....	16
2.1.1 Clasificación.....	16
2.1.2 Cualidades del sistema 5xx.x.....	16
2.1.3 Propiedades de la aleación 535.....	17
2.2 Fundición en arena.....	18
2.2.1 Moldeo en verde.....	18
2.2.2 Control de la arena para moldeo en verde.....	18
2.2.3 Pruebas para el control de la arena.....	18
2.3 Diseño del sistema de colada.....	21
2.3.1 Sistema de colada.....	21
2.3.2 Bases teóricas en el diseño del sistema de colada.....	23
2.3.3 Filtros de espuma cerámica.....	24
2.3.4 Consideraciones en la implementación de filtros.....	24
Capítulo III: Metodología.....	26
3.1 Elaboración de la placa modelo.....	27
3.1.1 Consideraciones para el sistema de colada.....	28
3.1.2 Piezas y accesorios para la placa modelo.....	28
3.1.3 Ensamble de la placa modelo.....	31

3.2 Mezcla de arena para moldeo en verde.....	33
3.2.1 Técnica para la preparación de la mezcla de arena.....	33
3.2.2 Pruebas de moldeo.....	34
3.2.3 Control de la humedad en la mezcla de arena.....	36
3.3 Dispositivo para la evaluación de la velocidad del metal en el sistema de colada.....	37
3.4 Diseño experimental.....	38
3.5 Desarrollo experimental.....	40
3.5.1 Moldeo en los experimentos.....	40
3.5.2 Técnica de fusión.....	41
3.5.3 Instrumentación del molde en pruebas de velocidad.....	43
3.5.4 Ensayo de tracción.....	45
3.5.5 Inspección micrográfica.....	46
Capítulo IV: Resultados y discusión.....	48
4.1 Pruebas de tensión.....	49
4.2 Muestras metalográficas.....	59
4.3 Experimentos de velocidad.....	61
Capítulo V: Conclusiones.....	67
Bibliografía.....	69
Anexo A: Sistema Al-Mg.....	72
Anexo B: Cálculos en el diseño de colada.....	75
Anexo C: Datos de las fusiones.....	80

Introducción

Las aleaciones de aluminio fabricadas en los procesos de fundición tienden a generar una película de óxido, como resultado de la reacción entre el metal en estado líquido y el ambiente, especialmente en aleaciones con alta tendencia a la oxidación como lo es la aleación 535.

Los metales ya sea en estado líquido o sólido tienden termodinámicamente a regresar a su estado natural es decir en forma de óxido, en el caso de una fusión en donde el metal está en estado líquido, la formación de una capa de óxido tiende a provocar un defecto conocido como doble capa de óxido o “bifilm”. El bifilm es un defecto que es inherente al proceso de fundición, este defecto se puede presentar de múltiples formas:

Por la acción de una ola de ruptura, es decir un movimiento en la superficie del metal líquido que ocasiona un plegamiento de la capa de óxido generada en la superficie expuesta que ha reaccionado con el ambiente.

Durante las acciones de tratamiento al metal líquido en donde una porción del líquido es extraída por los instrumentales generando una capa de óxido en dicha porción, cuando el metal es reincorporado es probable que exista una unión entre ambas capas de óxido por ejemplo en las gotas que caen al extraer metal líquido para análisis químico.

Durante el vertido del metal líquido se presentan dos casos, uno debido a las láminas de flujo exterior que son oxidadas por el ambiente y que posteriormente se mezclan hacia el interior del fluido. Por otra parte se presenta un atrapamiento de gases que se debe nuevamente a un dobles de una parte del líquido que circula por el sistema de colada.

El problema con estos defectos es que entre las dos capas de óxido hay una ineficiente unión generando cavidades, si estos defectos son arrastrados durante todo el proceso y continúan en el sistema de colada hasta llegar a las piezas y su posterior solidificación, el defecto pasa a formar una grieta.

Un problema que han tenido las aleaciones base aluminio fabricadas mediante la técnica de moldeo en verde es una ineficiente reproducibilidad de las propiedades mecánicas, cabe

aclarar que no se está refiriendo a que las propiedades obtenidas por esta técnica sean deplorables, la cuestionan es que industrias con altos estándares de calidad tales como la automotriz, aeroespacial y aeronáutica exigen alta calidad y la disminución del porcentaje de rechazos por este tipo de defectos.

Uno de los aspectos de mayor importancia en estas aleaciones es la formación de los defectos bifilm que posteriormente pasan a formar grietas, generando zonas de concentración de esfuerzos y por tanto la caída en las propiedades mecánicas que se refleja en la calidad de las piezas.

Una forma de eliminar el defecto de la doble capa de óxido es mediante la implementación de filtros de espuma cerámica, estos presentan una serie de canales que asemejan laberintos y no conductos lineales a través del filtro, este sistema de laberintos ayuda a atrapar la doble capa y disminuye la velocidad del fluido a la salida del filtro evitando la formación de nuevas capas de óxido al reducir la turbulencia del fluido.

En este trabajo se analiza un sistema inicialmente no presurizado y la implementación de tres filtros con diferentes tamaños de poro o poros por pulgada lineal (ppi), haciendo un total de cuatro sistemas, sistema sin filtro (SF), sistema con filtro de 10 ppi (F10), sistema con filtro de 20 ppi (F20) y sistema con filtro de 30ppi (F30).

Para tal estudio se fabricó una placa modelo para moldeo en arena que contenía dos probetas de tensión, la placa y accesorios se fabricaron bajo las consideraciones y recomendaciones encontradas en la literatura.

Las probetas de tensión obtenidas de las coladas fueron ensayadas para obtener la resistencia a la tracción, para los diferentes grupos de probetas. Además de los ensayos de tensión para los cuatros sistemas se realizaron experimentos para determinar la velocidad de flujo del metal, tanto del corredor así como para las entradas que alimentan las piezas. Para determinar la velocidad se empleó un sistema de cables conectados a una placa de control con focos led y cronómetro, estos experimentos fueron filmados mediante una cámara de vídeo para su posterior análisis.

Objetivos:

Demostrar la importancia de los filtros en la calidad de las piezas coladas mediante la técnica de moldeo en verde en una aleación con alta tendencia a la oxidación.

Observar y analizar los cambios al implementar filtros de espuma cerámica a un sistema no presurizado.

Determinar el cambio en la velocidad de flujo en los corredores y entradas al implementar los filtros de espuma cerámica.

Obtener una correlación entre la implementación de los diferentes filtros y la calidad de las piezas coladas.

Hipótesis:

Los filtros de espuma cerámica aumentan la calidad de las piezas coladas mediante la acción de retención de la doble capa de óxido y la disminución de la velocidad por debajo de 0.5m/s, en el diseño del sistema de colada propuesto.

Capítulo I

Antecedentes

En esta sección se hace una revisión sobre los trabajos que se han desarrollado en los últimos años, en la implementación de los filtros de espuma cerámica, así como el efecto de los filtros sobre la doble capa de óxido y las propiedades mecánicas en las piezas de fundición. Esta revisión permitió establecer la metodología, diseño experimental y las consideraciones con el fin de realizar un trabajo actualizado sobre el empleo de los filtros.

Hashemi, H., & Raiszadeh, R emplearon una aleación A356, moldearon barras de tensión con un sistema de corredor naturalmente presurizado, con velocidad de vaciado de 1kg/s. Colocaron un filtro de espuma cerámica de 20ppi con dimensiones de 50x50x22mm, la capacidad máxima y flujo máximo son de 30Kg y 1.5Kg/s respectivamente. Para observar el comportamiento del flujo colocaron vidrio refractario en la posición filtro-corredor, esto fue registrado mediante una cámara de vídeo de 30fps. [1]

Fijaron un sistema general “sistema anterior al filtro” además realizaron 2 cambios de sección transversal posterior al filtro, para observar el efecto del filtro también realizaron experimentos en un sistema sin filtro. Para cada sistema obtuvieron 22 probetas de tensión, para realizar un análisis estadístico de Weibull.

Notaron que en el sistema la altura entre la salida del filtro y la superficie de arena era mayor a la recomendada por Campbell y realizaron el cambio de 44mm a 12.5mm, en las pruebas con 44mm estimaron que el llenado de esa cavidad tarda 1.76s un tiempo relativamente alto al compararlo con el tiempo total de la colada de 4.3s.

Observaron en la ventana creada por el vidrio que en el caso del sistema sin filtro el flujo que impacta con las paredes tiende a doblarse generando contra flujo, mediante imágenes obtenidas del vídeo determinaron que el mejor llenado del corredor posterior al filtro, se da en el sistema con dos veces el área de la sección anterior al filtro, obteniendo un 80% en el llenado del corredor y una reducción de la velocidad de 50%, el tiempo de llenado de la cavidad para una altura de 12.5mm cambio de 1.76 a 0.73s.

Para las barras de tensión presentan un histograma de frecuencias Figura 1, de donde se puede desprender lo siguiente:

En el sistema sin filtro se puede ver en el histograma en la Figura 1 (a) que la dispersión de la resistencia a la tracción es mayor para este sistema y va de 110 a 140MPa, presentando 9 probetas con 130 y 5 con 135MPa.

Para el sistema con sección x2, se presentó la menor dispersión con un rango de 125 a 140MPa, 9 probetas con 135MPa y 7 con 130MPa mostrados en la Figura 1 (b).

Finalmente el sistema con sección x4 Figura 1 (c), presenta una mayor dispersión que en la sección x2, sin embargo, presenta mayores valores de resistencia a la tracción, 12 probetas con 135MPa y 6 con 140MPa.

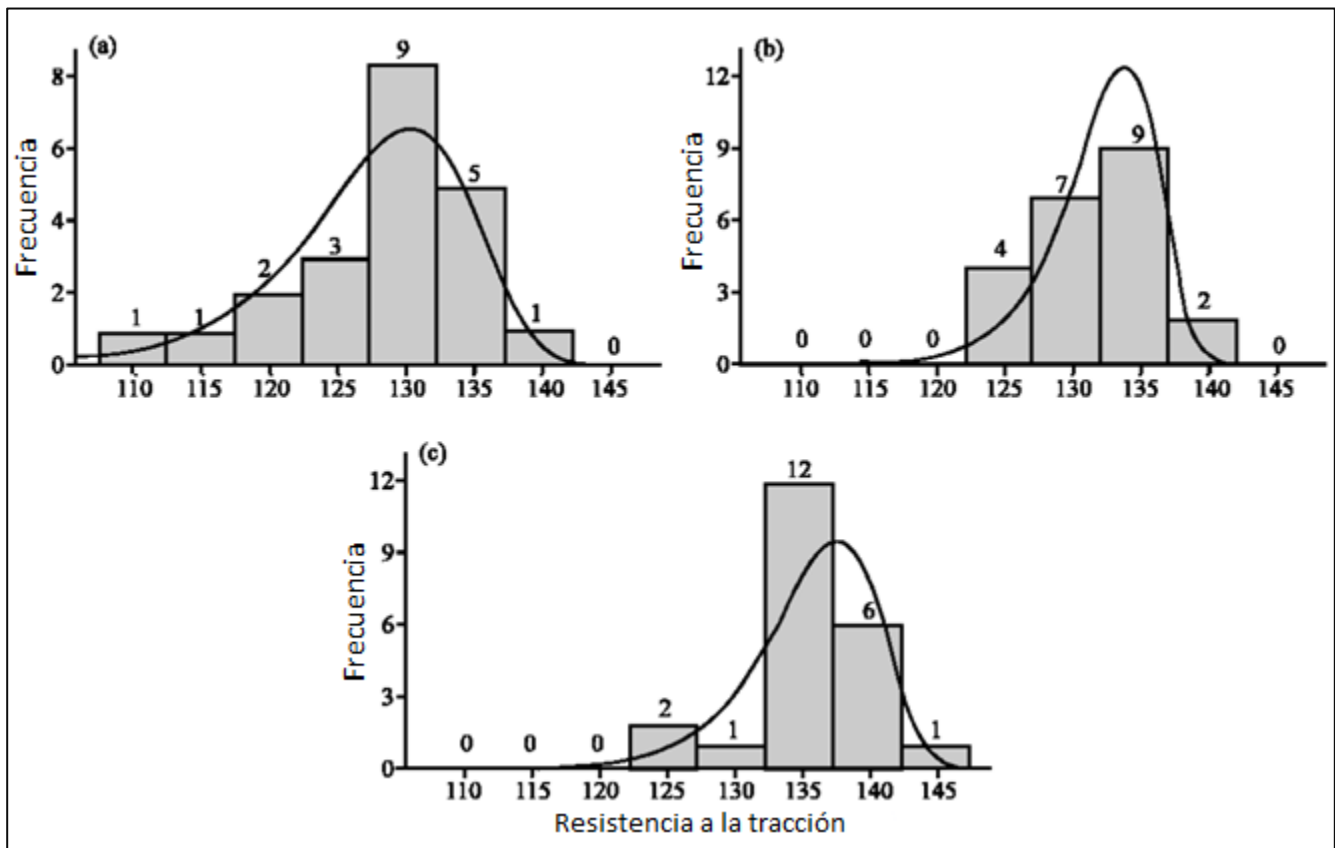


Figura 1. Histogramas para los sistemas empleados a) sistema sin filtro, b) sistema con filtro y 2 veces la sección anterior al filtro y c) sistema con filtro con 4 veces la sección anterior al filtro.

En este sentido resulta interesante determinar cuál es la mejor opción ya sea cerrar el rango de dispersión de las propiedades o la búsqueda de los valores más altos en las propiedades.

Por otra parte Hsu, F. Y., Li, C. L., & Campbell, J realizaron dos tipos de experimentos, modelo físico y colada en molde de arena, el primero para observar el comportamiento del fluido, el segundo para determinar la calidad de las piezas al variar las condiciones. [2]

Para el modelo físico, emplearon agua que bajo criterios de similitud es parecida al aluminio líquido, para observar el flujo, trabajaron con paredes transparentes y agregaron un trazador para mejorar la visualización, además emplearon dos sistemas de condiciones similares, la diferencia está en la forma del corredor que antecede a la posición del filtro como se puede ver en la Figura 2, también realizaron experimentos sin filtro para ambos sistemas. Los experimentos fueron grabados mediante cámara de vídeo de 25fps.

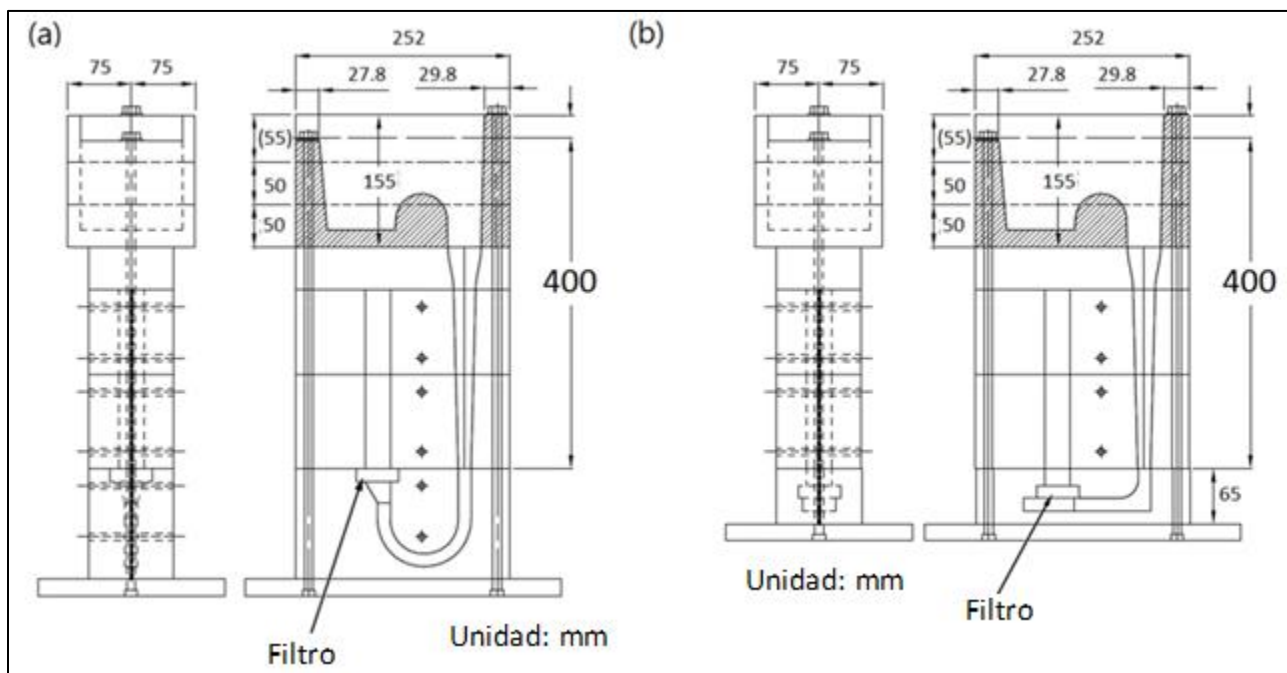


Figura 2. Sistemas empleados en el artículo. a) Forma U y b) Forma L.

Para los experimentos de moldeo se trabajó con aleación A356 fundida a 680°C y desgasificación con argón por 2 horas, la bajada fue de 400mm al igual que en los experimentos de modelado físico. El metal fue vertido a 700°C, de la masa fundida se tomó

una muestra para test a presión reducida (RPT) y una vez que se vertió y solidificó se tomaron muestras en la salida del filtro que fueron refundidas y sometidas a ensayo RPT.

Con los experimentos de modelado físico determinaron el comportamiento del fluido y el mejor sistema.

En el sistema U sin filtro se observó que el flujo se elevó aproximadamente 90mm de la cavidad del filtro atrapando burbujas en cambio en el sistema U con filtro el metal emergió con relativa pasividad sin embargo se observó contraflujo al impactar con el filtro y algunos incidentes de atrapamiento de aire.

Por otra parte en los sistemas L se observó un mejor control del flujo debido al decremento de la energía cinética antes de impactar con el filtro. Para el sistema L sin filtro no hay burbujas sin embargo la velocidad es relativamente elevada. Finalmente en el sistema L con filtro no hay atrapamiento de aire en ningún momento y el metal emerge del filtro de una manera más controlada.

Con la prueba RPT obtuvieron resultados de porcentaje de porosidad, Para el sistema U sin filtro y U con filtro se obtuvo 13.5 y 16.5 respectivamente, de la misma forma para el sistema L sin filtro y L con filtro se obtuvo 8.6 y 5.9 claramente el sistema L es el mejor sistema sin embargo hay ciertos detalles a considerar.

El flujo en el sistema U con filtro presentó un contra flujo lo que podría explicar el aumento de la porosidad si es que existió un plegamiento al impactar el filtro.

Finalmente concluyen advirtiendo sobre la mayor causa del problema, que es consecuencia de la altura de la bajada que de acuerdo a alturas empleadas es modesta. Este hecho fue comprobado al comparar la calidad de la muestra tomada del horno, la cual presentó alta calidad por lo que la calidad del material en el horno se perdió durante el vertido al molde, por otra parte la implementación del filtro de 10ppi más que actuar como filtro solo logró reducir el tamaño de los defectos.

Hsu, F. Y., & Lin, H. J realizaron dos tipos de experimentos para estimar la velocidad en el corredor, por un lado emplearon modelado computacional 3-D, por otro y con la finalidad de validar el modelo computacional realizaron experimentos de colada en moldes de arena. En los dos tipos de experimentos se evaluaron cuatro sistemas de colada con un filtro desconocido, estos se muestran en la Figura 3. [3]

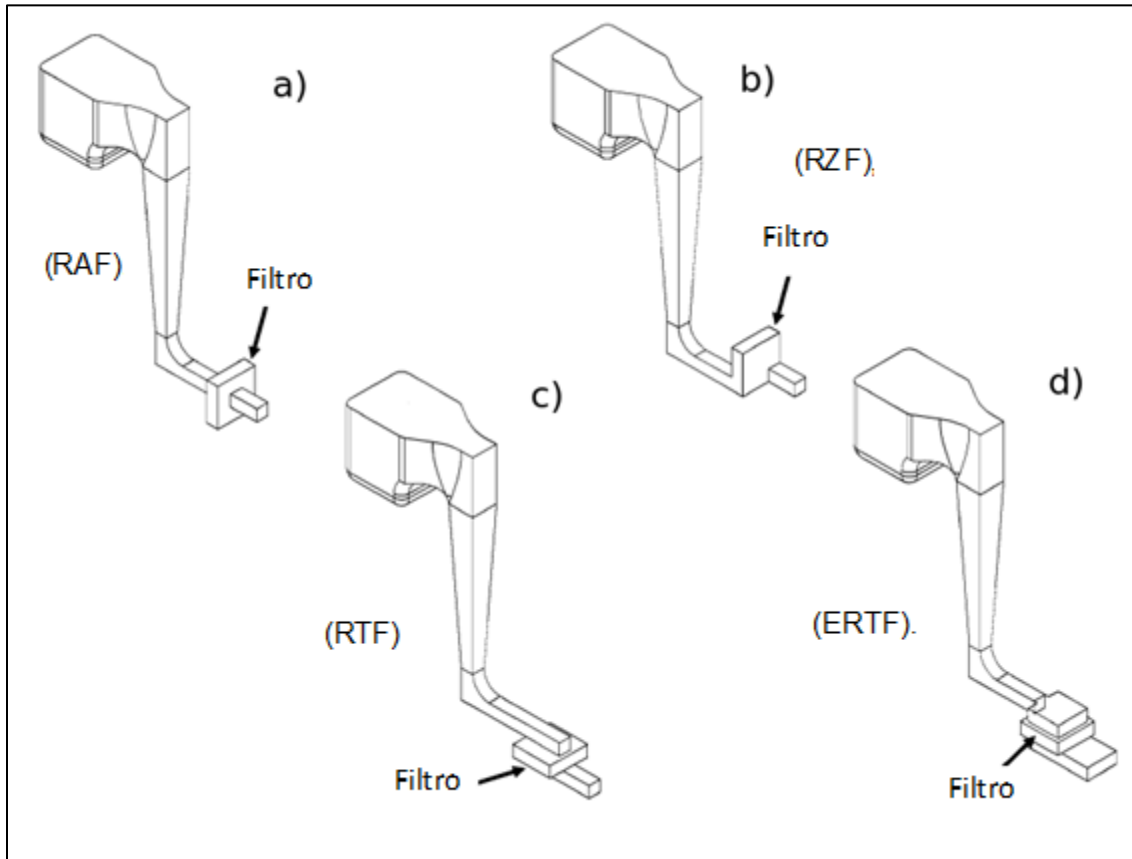


Figura 3. Diseños empleados con sus siglas en ingles. a) Corredor a través del filtro (RAF), b) corredor zig zag con el filtro (RZF), c) corredor tangencial al filtro (RTF) y d) corredor expandido tangencial al filtro (ERTF).

Para el modelado computacional 3-D partieron de datos de otros autores para obtener los coeficientes darcianos para incorporarlos a la “Ecuación de Forchheimer's” que es una ecuación cuadrática de la caída de presión normalizada por el espesor del filtro en función de la velocidad de flujo. Primero probaron con diferentes tamaños de poro 10, 20 y 30ppi para obtener una correlación del comportamiento del filtro en función de su tamaño.

Para los experimentos en molde de arena se trabajó con una aleación A356 a 720°C con una altura en la bajada de 300mm y cambios en la zona del filtro como se mostró en la Figura 3. Para estimar la velocidad del fluido el molde no tiene cavidad de llenado, es decir hay un corredor a la salida del filtro el cual está abierto a la atmósfera, en esa posición se colocó una cámara y un sistema de cuadrícula para estimar las distancias recorridas por el fluido en caída libre al salir del corredor.

Para estimar la velocidad se emplearon las ecuaciones de velocidad horizontal y caída libre en ambas ecuaciones se iguala el tiempo en el que se ha alcanzado la máxima distancia horizontal, para obtener la siguiente ecuación

Ecuación 1
$$V_o = D_x \sqrt{\frac{g}{2D_y}}$$

En donde V_o es la velocidad en la salida del corredor, g es la gravedad, D_x y D_y son las distancias horizontal y vertical respectivamente. Además se puede estimar la velocidad de flujo midiendo el peso de metal que ha pasado en un tiempo dado.

Los datos obtenidos por estos experimentos fueron comparados con los del modelo computacional, la extrapolación determina un tamaño de poro de 28.6ppi, nuevamente se realizó el modelado computacional con el nuevo tamaño de poro para los cuatro sistemas.

En la Tabla 1 se pueden observar los valores que obtuvieron en su trabajo y posteriormente los puntos relevantes de su discusión y conclusiones.

Tabla 1. Datos obtenidos por los autores para ambos tipos de experimentos.

Sistema de corredores	RAF	RZF	RTF	ERTF
Velocidad promedio de salida V_o (m/s)				
Colada	1.14	1.03	1.58	0.86
Modelo	1.15	1.02	1.45	0.88
Velocidad promedio de flujo volumétrico ($\times 10^{-4}$ m³/s)	1.47	1.66	1.73	2.70
Velocidad de flujo normalizado por el sistema RAF	1.0	1.13	1.18	1.84
Área transversal a la salida del filtro (mm²)	129	161	109	314
Área transversal del corredor anterior al filtro (mm²)	225	225	225	225
Relación entre área a la salida y área original.	0.57	0.72	0.49	1.4

De donde podemos extraer que el sistema ERTF es el que presenta la menor velocidad debido a que hay una expansión tanto en la salida como en la entrada del filtro seguido del sistema RZF en el cual los corredores se colocan en extremos opuestos del filtro con lo que el fluido recorre una mayor distancia del filtro en comparación con la de el espesor como se puede ver en la Figura 3b.

En la discusión de resultados presentan valiosas observaciones por una parte el tiempo de llenado al incorporar filtro aumenta al menos al doble el tiempo de colada, lo que podría ocasionar problemas de llenado en piezas con secciones delgadas.

Las observaciones directas mostraron que el tamaño de poro no corresponde con la extrapolación de los datos, la observación directa estima tamaño entre 10-15ppi, contemplan dos posibles explicaciones por una parte el metal tiende a solidificar al contacto con el filtro posteriormente se recalienta y empieza a fluir, por el otro si hay una gran población de defectos estos podrían actuar como una barrera disminuyendo el área de paso del fluido.

En el trabajo de Ardekhani, A., & Raiszadeh, R realizaron experimentos de colada en moldes de arena para determinar la eficiencia de los filtros y las dimensiones de los defectos. Emplearon un sistema naturalmente presurizado con velocidad de vertido de 1Kg/s, llevaron a cabo 4 experimentos uno de los cuales fue sin filtro los restantes con filtros de 10, 20 y 30ppi, el sistema fue tipo L con altura de bajada de 245mm y el filtro fue colocado por debajo y paralelamente al flujo del metal, con una altura de 16mm entre la salida del filtro y la superficie de la arena. [4]

Para los experimento se fundió aluminio puro comercial y se vertió a 750°C la cavidad a colar fue un cilindro de 180 y 200mm correspondientes al diámetro y altura, este cilindro fue cortado para obtener 25 muestras para tracción y 10 muestras metalográficas.

Las superficies de fractura de las barras fueron examinadas utilizando un microscopio electrónico en busca de la presencia de los defectos de doble capa de óxido, los valores de resistencia a la tracción fueron examinados mediante un análisis estadístico de Weibull.

Las muestras para metalografía fueron examinadas utilizando un microscopio óptico a 950 aumentos después de pulirse a 1µm, para obtener los parámetros de porosidad (densidad de poros, porcentaje de porosidad superficial y redondez media), con ayuda de un software de análisis de imagen.

La eficiencia del filtro fue calculada con la Ecuación 2 en donde C_{out} y C_{in} son las densidades medias de poros en los cilindros colados con y sin filtros respectivamente, también colocaron vidrio resistente al calor para comprobar la velocidad y observar el comportamiento del fluido para sistemas con 16 y 32mm de altura en la salida del filtro, para el doble de la altura solo se experimentó con 10 y 30ppi.

Ecuación 2
$$E = 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}$$

En la Tabla 2 se muestran los valores que obtuvieron del análisis estadístico de Weibull en donde el módulo de Weibull es una medida de la dispersión de los valores y que a mayor magnitud menor dispersión. El menor valor en el módulo de Weibull se presenta para el sistema sin filtro, es decir en la que hay mayor dispersión entre las probetas, posteriormente y en orden creciente sigue los sistemas con altura de 32mm primero 10ppi seguido de 30ppi, posteriormente los sistemas con alturas de 16mm, el sistema con 10ppi con esta altura tiene un valor similar al sistema con 30ppi y altura de 32mm sin embargo la magnitud para los siguientes sistemas se eleva considerablemente pasando de 19 en el valor del módulo a 24.17 y 28.33 para el sistema de 20 y 30ppi respectivamente.

Tabla 2. Valores obtenidos a partir del análisis estadístico de Weibull.

Altura (mm) a la salida del filtro	Experimento	Número de muestras	Módulo de Weibull	Coficiente de regresión
16	Sin filtro	25	12.07	0.858
16	10ppi	25	19.01	0.928
16	20ppi	25	24.17	0.935
16	30ppi	25	28.33	0.864
32	10ppi	24	13.81	0.984
32	30ppi	25	18.33	0.983

Al analizar las imágenes en SEM se observó la presencia de defectos de doble capa de óxido, se presentaron algunas redes de películas de óxido y pequeños fragmentos de óxido en la muestra de la colada con altura de 16mm y 10ppi, para el sistema con la misma altura pero 20ppi se presenta menor cantidad de defectos de capas de óxido sin embargo se presentan ocasionalmente redes de capas de óxido. En el caso del sistema de la misma altura y filtro de 30ppi no se percibieron defectos de doble capa de óxido mostrando una fractura de tipo dúctil. En el caso de los sistemas con altura de 32mm se observaron múltiples redes de películas de óxido y fragmentos de óxido alrededor de los poros.

A continuación se muestran imágenes obtenidas mediante la técnica: microscopía óptica de barrido por sus siglas en ingles SEM, Figura 4 en donde fácilmente se percibe el defecto de la doble capa de óxido.

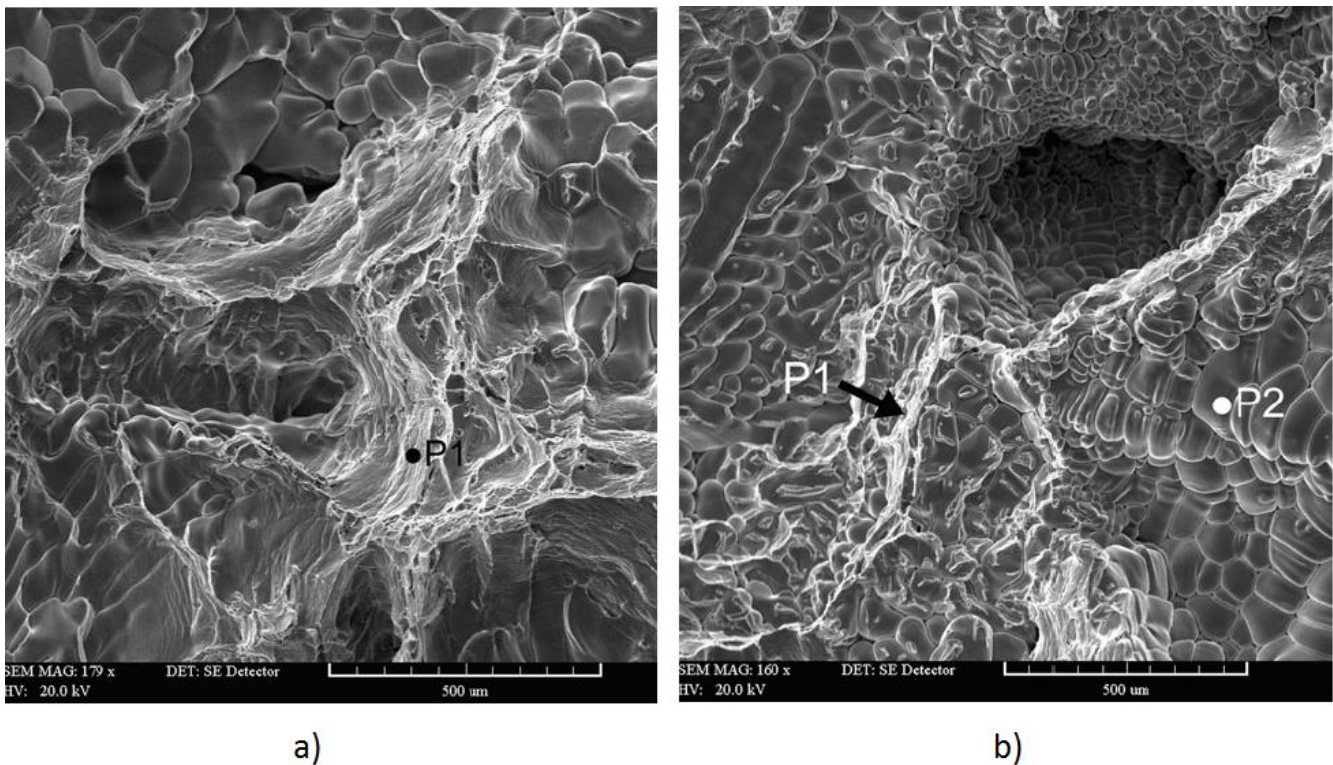


Figura 4 Imágenes tomadas mediante SEM en el área de fractura. a) Sistema sin filtro y altura de 16mm, P1 señala la presencia de una capa de óxido extendida sobre la microestructura. b) Sistema de 16mm de y filtro de 10ppi, P1 muestra una red de capas de óxido alrededor de un poro.

A continuación se muestra la Tabla 3 con el concentrado de los datos obtenidos en el estudio, para los parámetros de porosidad encontraron tendencia tanto en la densidad de poros así como en el porcentaje de porosidad, estos dos parámetros disminuyen al incrementar el número de poros por pulgada lineal (ppi), por lo tanto la eficiencia aumenta al incrementar el número ppi del filtro.

Tabla 3. Valores obtenidos a partir de las muestras metalográficas.

Altura a la salida del filtro (mm)	Experimento	Densidad de poros. (número/mm ²)	Porcentaje de porosidad	Redondez promedio.	Área promedio de poros (mm ²)	Porcentaje de eficiencia de filtración	Módulo de Weibull
16	Sin filtro	0.294	33.3	26.82	0.012	0	12.07
16	10ppi	0.080	11.9	25.55	0.003	72.6	19.01
16	20ppi	0.015	0.93	21.55	0.005	94.8	24.17
16	30ppi	0.0004	0.02	28.77	0.008	99.9	28.33
32	10ppi	0.100	13.6	20.73	0.016	65.7	13.81
32	30ppi	0.068	4.3	23.61	0.039	76.9	18.33

De acuerdo a sus resultados destacan que incluso al tener una altura mayor a la recomendada por Campbell, esta no fue influyente en la formación de defectos en la salida del filtro, aseveración hecha de acuerdo a la eficiencia de 99.9% en este caso el filtro es capaz de limpiar los defectos generados durante las acciones previas, como en el tratamiento en el horno y el vaciado.

Por otra parte explican que en las aleaciones con rango bajo de solidificación se puede evaluar la densidad de defectos de películas dobles de óxido con los parámetros: densidad de poros y porcentaje de porosidad.

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Descripción de la aleación aluminio-magnesio (535)

2.1.1 Clasificación

La nomenclatura propuesta por “The Aluminium Association” (AA), es la mayormente empleada en Estados Unidos. Esta designación para aleaciones base aluminio de fundición emplea cuatro dígitos para describir los sistemas de aleación, el primero indica los principales componentes de la aleación, el segundo y tercero es una combinación de números que no tiene sentido real pero asignan identidad única a cada aleación, el cuarto dígito separado de los anteriores por un punto denota la forma del producto en donde 0, 1 y 2 corresponden respectivamente a colada, lingote estándar y lingote con rangos de composición química más estrecha.

En la Tabla 4 se puede observar los diferentes sistemas de aleación para el aluminio, además de los números se emplea un sistema de letras (A, B, C, etc.) para indicar una pequeña variación en la composición sin llegar a entrar al campo de otra designación como se puede observar en la Tabla 5. [5]

Tabla 4. Nomenclatura de las aleaciones base aluminio para procesos de fundición.

Aluminio puro al menos con 99.00%	1xx.x
Aleaciones aluminio-cobre	2xx.x
Aleaciones aluminio-silicio más cobre o magnesio	3xx.x
Aleaciones aluminio-silicio	4xx.x
Aleaciones aluminio-magnesio	5xx.x
Serie en desuso	6xx.x
Aleaciones aluminio-zinc	7xx.x
Aleaciones aluminio-titanio	8xx.x
Aleaciones de aluminio y otros elementos	9xx.x

2.1.2 Cualidades del sistema 5xx.x.

Principalmente aleaciones binarias monofásicas que presentan resistencia y dureza que va de moderadas a altas, estas aleaciones presentan considerable resistencia a la corrosión, por lo

que son ampliamente empleadas en industrias tales como alimenticia y bebida, además de aplicaciones marítimas.

Presentan excelente maquinabilidad y soldabilidad, además una buena apariencia al ser mecanizadas, pulidas y anodizadas.

Durante el proceso de fundición y colada estas aleaciones requieren mayor cuidado especialmente durante el vertido y en el control de los gradientes de temperatura. Debido a que el magnesio en el aluminio incrementa la velocidad de oxidación, en estado líquido la pérdida de magnesio puede ser importante y los óxidos de aluminio y magnesio pueden impactar en la calidad de la colada. [5]

2.1.3 Propiedades de la aleación 535

Se ha hablado acerca de los sistemas de aleación para el aluminio y la nomenclatura para las aleaciones de aluminio de fundición ahora es importante conocer las propiedades y composición de la aleación 535 perteneciente al sistema aluminio-magnesio, en la Tabla 5 se presentan los rangos de composición química para las variantes de dicha aleación.

Tabla 5. Rangos de los elementos de aleación en por ciento en peso para las variantes de la aleación 535. [6]

Elemento (%W)	535.0	535.2	A535.0	A535.1	B535.0	B535.2
Si	0.15	0.10	0.20	0.20	0.15	0.10
Fe	0.15	0.10	0.20	0.15	0.15	0.12
Cu	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.05
Mn	0.10-0.25	0.10-0.025	0.10-0.25	0.10-0.25	0.05	0.05
Mg	6.2-7.5	6.6-7.5	6.5-7.5	6.6-7.5	6.5-7.5	6.6-7.5
Cr						
Ni						
Zn						
Sn						
Ti	0.10-0.25	0.10-0.25	0.25	0.25	0.10-0.25	0.10-0.25

La aleación 535 tiene una densidad de 2.62g/cm^3 sin embargo una variante presenta densidad de 2.54g/cm^3 para la A535.0, el rango en la temperatura de fusión es de $550\text{-}630^\circ\text{C}$, la resistencia a la tracción y el esfuerzo de cedencia son 240 y 125MPa respectivamente. [5]

2.2 Fundición en arena

La importancia del moldeo en arena es la gran versatilidad que puede otorgar a los procesos de fabricación de piezas metálicas, ya que se puede diseñar el tamaño, forma y calidad del producto.

2.2.1 Moldeo en verde

El material de moldeo de mayor uso a nivel mundial es la arena sílice (SiO_2) que es relativamente barata y suficientemente refractaria, además de la arena se agregan componentes aglomerantes comúnmente arcillas, la mezcla es humectada para alcanzar las propiedades deseadas para ello se realizan pruebas con diferentes composiciones de los componentes de la mezcla. [7]

2.2.2 Control de la arena para moldeo en verde

Los de mayor importancia o llamados de control primario consisten en el contenido de los componentes en la mezcla: arena, arcillas, agua y componentes adicionales, los controles secundarios en la mezcla de arena como la resistencia en verde, la permeabilidad, compactabilidad, entre otras son propiedades que son consecuencia de los componentes en la mezcla de moldeo. [8]

2.2.3 Pruebas para el control de la arena

El objetivo principal para el reciclado y control de la arena es mantener una arena con características y propiedades establecidas dentro de un rango de trabajo que permitan un adecuado funcionamiento para la obtención de piezas sanas.

Se recomienda que la práctica debería enfocarse en 8 pruebas que son importantes herramientas para el control de la arena en condiciones industriales. [9]

1. Temperatura de la arena
2. Contenido de humedad
3. Compactabilidad
4. Peso de la muestra
5. Permeabilidad
6. Resistencia a la compresión en verde
7. Pruebas con azul de metileno
8. Distribución del tamaño de la arena

Temperatura de la arena: Es de importancia debido a la evaporación del agua de la mezcla de arena, que está relacionado con el tiempo que transcurre entre su preparación y la fabricación de los moldes.

Contenido de humedad: El contenido de agua en la mezcla no es un indicador preciso debido a que el agua no es totalmente absorbida por las arcillas. Los compuestos orgánicos o impurezas interfieren en esta absorción, por lo que se recomienda una prueba adjunta como permeabilidad o compactabilidad que son más precisas al tratar de alcanzar una condición denominada “punto temper” condición en la que hay un máximo en la resistencia a la compresión en verde y un mínimo en la densidad.

Los niveles de humedad para fundiciones no ferrosas con 6% de bentonita y arena fina, están alrededor de 3%.

Compactabilidad: Es una medida en porcentaje de la disminución en la altura de una muestra, al aplicarle una fuerza o carga controlada.

Permeabilidad: Es la facilidad con la que un gas puede fluir a través de una porción de un material, esta propiedad está relacionada con la finura, la forma, el tipo y distribución de los granos de arena, además de la cantidad de material, humedad y densidad. El aumento en la permeabilidad puede indicar un tamaño de grano más grueso o una menor densidad de molde,

estos son factores que afectan el quemado y la penetración de arena (acabados ásperos), una baja permeabilidad ocasiona defectos como sopladuras y poros.

Resistencia a la compresión en verde: Una de las pocas pruebas de resistencia en verde que siguen siendo empleadas. La mayor contribución es debida a los enlaces de la arcilla, otros factores que contribuyen son la humedad, compactabilidad, tipo y contenido de aditivos.

Prueba con azul de metileno: La prueba de arcilla es un método rápido y preciso para determinar la cantidad de arcilla activa (montmorillonita). Implica determinar la capacidad de cambio de base de la bentonita presente en la arena y una titulación con azul de metileno para reemplazar los iones intercambiables que se encuentran solo en las estructuras de materiales arcillosos activos. [9]

Distribución del tamaño de la arena: Prueba para determinar el porcentaje de distribución del tamaño de los granos de arena. La muestra debe estar completamente seca y libre de arcilla o aditivos. Para separar la arena, la muestra se coloca en una serie de mallas acomodadas de manera descendente en el tamaño del poro, se aplica vibración por 15 minutos y se obtiene el peso retenido por malla cada peso se multiplica por un factor mostrado en la Tabla 6, finalmente se suman los valores y se divide entre el total de arena retenida para obtener el número de finura del grano. [10]

Tabla 6. Factores correspondientes a cada malla y un ejemplo del cálculo de la finura.

Malla	Porcentaje retenido	Multiplicador	Producto
6	0	3	0
12	0	5	0
20	0	10	0
30	2	20	40
40	2.5	30	75
50	3	40	120
70	6	50	300
100	20	70	1400
140	32	100	3200
200	12	140	1680
270	9	200	1800
Platillo	4	300	1200
Totales	90.5		9815
Finura del grano = 9815/90.5 = 108			

2.3 Diseño del sistema de colada

Un paso crítico durante una fusión es el llenado del molde, como se ha confirmado por experimentos de rayos-x el mayor daño se debe a un deficiente sistema de llenado, la eliminación de la turbulencia superficial es uno de los requisitos más complicados a cumplir en sistemas por gravedad.

2.3.1 Sistema de colada

Se define como el conjunto de canales que llevan metal a la cavidad de la pieza, en la Figura 5 se muestran las partes del sistema de colada. En principio debería ser diseñado para minimizar el daño al metal al paso por el molde sin embargo depende de varios factores además no es el único objetivo de acuerdo con [9], el sistema de colada debería ser diseñado para cumplir con los siguientes objetivos:

- Llenado rápido del molde sin pliegues y evitar alta temperatura de vaciado.
- Reducir y prevenir la agitación o turbulencia y la formación de escoria en el molde.
- Evitar que la escoria y la arena erosionada entren a la cavidad del molde.
- Prevenir la aspiración de gases en la corriente metálica.
- Evitar la erosión del molde.
- Ayuda a obtener gradientes térmicos para lograr la solidificación direccional y minimizar la distorsión en la colada.
- Obtener máximos rendimientos en las coladas y minimizar los costos.
- Proporcionar facilidad de vertido.

No todos los objetivos son compatibles, por tanto resulta importante encausar los esfuerzos del diseño hacia la meta deseada.

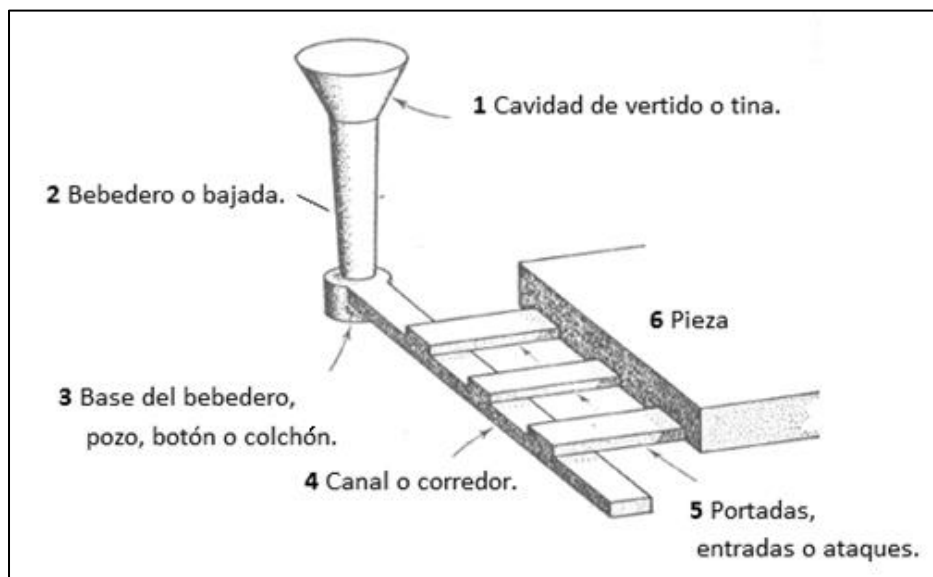


Figura 5. Partes de un sistema de colada general.

El diseño del sistema puede caracterizarse por la relación de las áreas transversales de los componentes del sistema, para determinar estas características se emplean cálculos, comparaciones con sistemas anteriores, tablas establecidas o aproximaciones, estos sistemas pueden pertenecer a dos categorías principales, sistemas presurizados o sistemas no presurizados.

Sistema presurizado: estos sistemas mantienen una contra presión mediante restricciones en las áreas transversales, en general el área de la base de la bajada es mayor que la del corredor y el área del corredor es mayor al área total de las entradas. La contra presión evita la aspiración de aire en el flujo de metal en los corredores y las entradas ya que se mantienen llenos en todo momento.

En un sistema con entradas múltiples con la misma sección permite un flujo homogéneo, los sistemas presurizados demandan menor cantidad de metal disminuyendo los retornos del sistema de colada, sin embargo presentan una alta velocidad del metal al pasar por las contracciones generando agitación y turbulencia.

Sistemas no presurizados: sistemas con baja presión, la restricción principal al flujo está en la base inferior de la bajada o cercana a la bajada, en estos sistemas las secciones siguientes son mayores a las anteriores lo que permite flujos a baja velocidad reduciendo la turbulencia en la cavidad del molde.

Estos sistemas requieren de un diseño cuidadoso ya que es difícil mantener todas las secciones llenas durante el vertido, lo que podría ocasionar defectos de separación de metal, es complicado conseguir flujos homogéneos en las entradas en sistemas con entradas múltiples, por otra parte estos sistemas demandan una mayor cantidad de metal para un mismo régimen de flujo en comparación con los sistemas presurizados. [7]

2.3.2 Bases teóricas en el diseño de sistemas de colada

Todos los diseños de sistemas de colada están basados en dos leyes de la dinámica de fluidos, por una parte la “Ecuación de Continuidad”, la cual expresa que el flujo volumétrico se mantiene constante en un sistema y se expresa en la siguiente ecuación. [11]

Ecuación 3
$$Q = A_1v_1 = A_2v_2$$

Donde Q, A y v son el flujo volumétrico, área transversal al flujo y la velocidad del fluido respectivamente. Por otra parte el “Teorema de Bernoulli” que establece que la energía de un

fluido en un punto puede dividirse en tres partes Energía potencial, cinética y energía debida a la presión como se muestra en la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho}$$

Donde h es la altura, P la presión estática g y ρ son la gravedad y la densidad del fluido respectivamente. Si bien los cálculos empleando estas leyes llevan a errores al no considerar las pérdidas por fricción o pérdidas por cambios de sección y dirección la realidad es que en muchos casos resultan insignificantes aun así estas pérdidas pueden obtenerse experimentalmente e implementarlas al cálculo básico. [11]

2.3.3 Filtros de espuma cerámica

Fabricación

Estos filtros son fabricados a partir de una matriz polimérica de canales abiertos la cual es recubierta con una suspensión cerámica posteriormente se calienta para quemar la matriz dejando el recubrimiento cerámico. Los filtros se clasifican de acuerdo al número de poros por pulgada lineal (ppi), el tamaño de los poros se puede controlar entre 0.5 a 2mm estos pueden ser fabricados en alúmina (Al_2O_3), zirconia (ZrO_2) o carburo de silicio (SiC), una de las desventajas de los filtros de espuma cerámica es el difícil control dimensional, condición de interés como se verá a continuación. [12]

2.3.4 Consideraciones en la implementación de filtros

Para la implementación de los filtros en los corredores es esencial controlar las fugas, en primer instancia se pensaría sobre el paso de metal sin filtrar sin embargo el mayor problema es la formación de nuevos defectos de capas de óxido que se generan por la aceleración del fluido en las secciones delgadas como lo son las uniones entre el filtro y las paredes de arena, se puede considerar dos aspectos para reducir este efecto en la técnica de moldeo en arena.

1 Moldear el filtro directamente con el medio de moldeo, esto colocándolo en el patrón asegurando un sello perfecto, en tal caso el material de moldeo solo penetra en la primera línea de poros, para esta técnica se requiere de algunas piezas sueltas.

2. Utilizar una geometría adecuada que permita visualizar la posición del filtro generalmente se recomienda que el filtro solo se asiente en la tapa o en la base, nunca mitad y mitad, una colocación recomendada se ilustra en la Figura 6 en la cual las fugas serán despreciables debido al impulso del flujo.

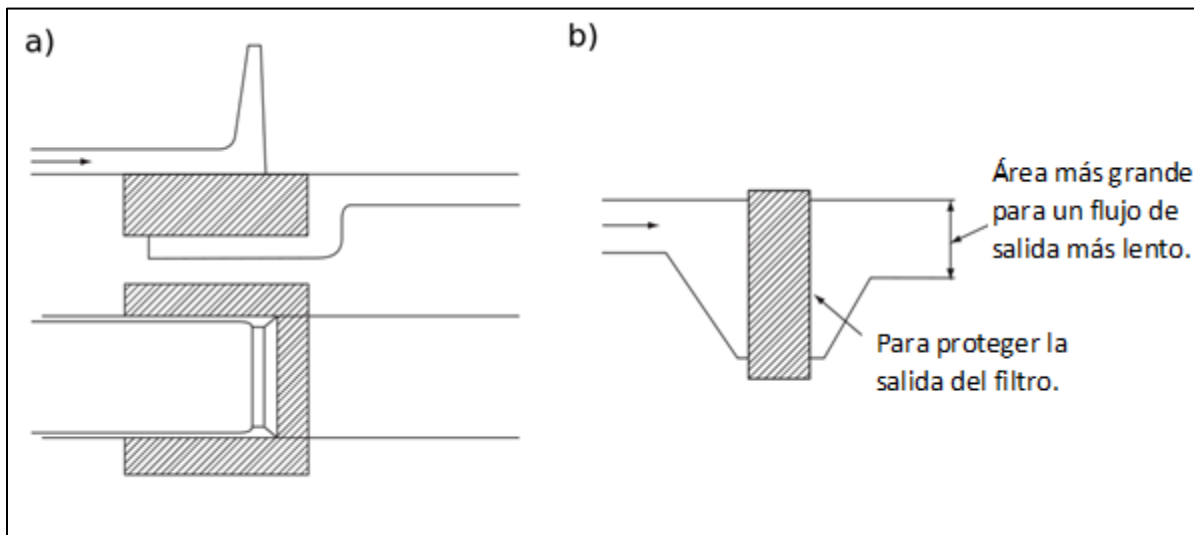


Figura 6 Muestra dos posiciones de filtros adecuados para reducir las fugas. a) Posición horizontal del filtro debajo de la línea de partición. b) Posición vertical en este caso el filtro sobre sale de la línea de partición para que la tapa actúe como sello.

La calidad del metal después del paso por el filtro se mantiene siempre y cuando la altura entre la salida y el filtro sea menor a 12mm de no ser así los tubos de óxido generados por el fluido que cae o las películas retenidas serán removidas del filtro y pasaran a la corriente de metal además de una nueva formación de películas de óxido debido a la altura. La cavidad después del filtro se llene rápidamente para desplazar el aire y evitar discontinuidad en el líquido evitando así nuevas formaciones de películas. Expandir el canal del corredor a un factor de 3.85 del corredor anterior al filtro además de que los canales siguientes deberán ser horizontales o ascendentes. [13]

Capítulo III

Metodología

En este trabajo se reprodujo el diseño de una placa modelo de probetas de tensión, para evaluar la calidad de piezas obtenidas directamente de colada, al implementar filtros de espuma cerámica en un sistema inicialmente no presurizado sin filtro, además se presenta una técnica para determinar la velocidad en el sistema de colada, finalmente una inspección por metalografía.

3.1 Elaboración de la placa modelo

Se partió de un sistema ya establecido en B 26/B26M-03 Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings [14], el cual presenta un corredor central hexagonal con dos barras de tensión paralelas al corredor, cada pieza tiene dos alimentadores de tipo lateral caliente, uno en cada extremo de la probeta y cada alimentador es provisto de metal mediante una entrada con forma de trapecio, el diseño se observa en la Figura 7.

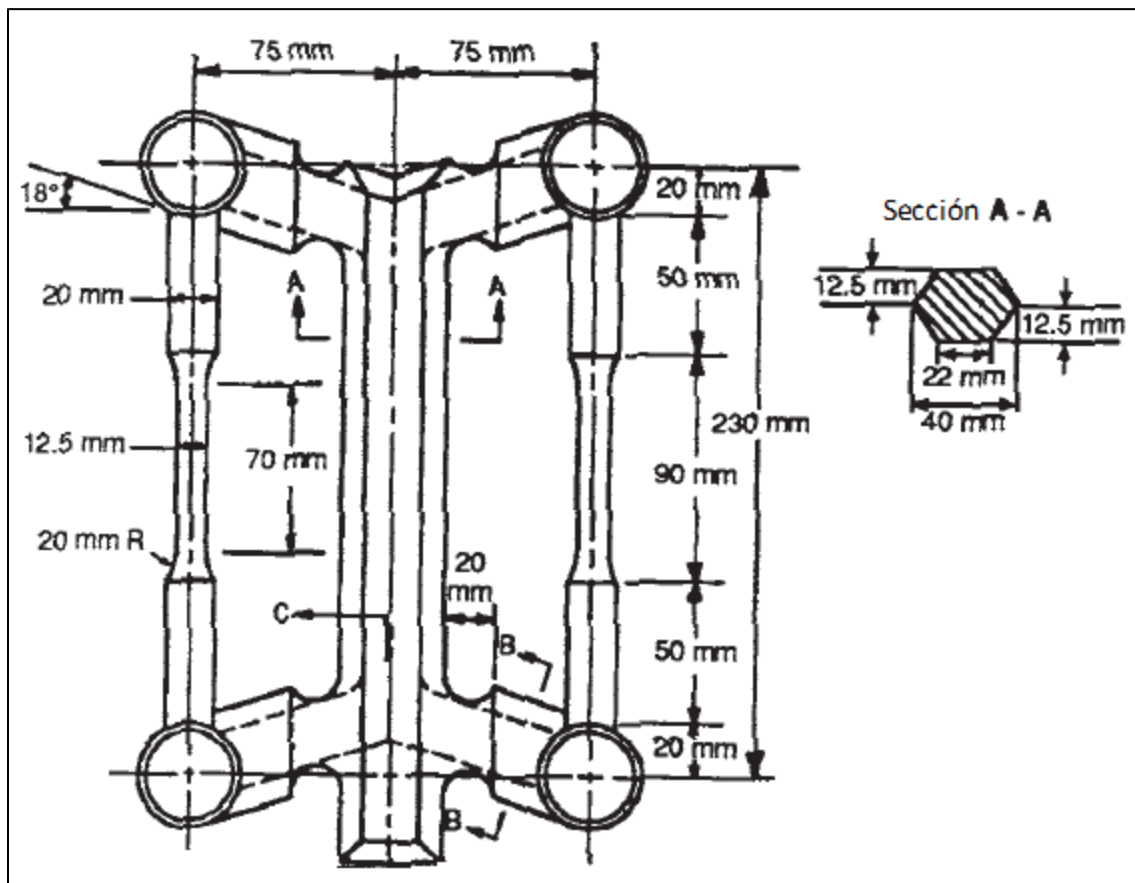


Figura 7. Diseño del sistema de colada para barras de tensión en la norma mencionada.

3.1.1 Consideraciones para el sistema de colada

De acuerdo a las condiciones de oxidación y defectos generados por la turbulencia durante el llenado del sistema en aleaciones base aluminio se decidió usar un sistemas no presurizado, con una posición de filtro horizontal como en la Figura 6, altura a la salida del filtro de 10mm para evitar la formación de nuevos defectos, altura de la bajada de 300mm para observar el comportamiento de los filtros bajo condiciones reales, expansión de la sección del corredor a la salida del filtro de 2 veces la sección anterior al filtro.

3.1.2 Piezas y accesorios para la placa modelo

Probetas

Para obtener la impresión de la barra de tensión en el molde de arena se requiere obtener medias barras de tensión que estarán a cada cara de la placa modelo, para ello se elaboraron 12 piezas de silicato-CO₂, 6 con la impresión de media probeta, esto se realizó a partir de un molde metálico ilustrado en la Figura 8 y las 6 restantes son paredes planas.

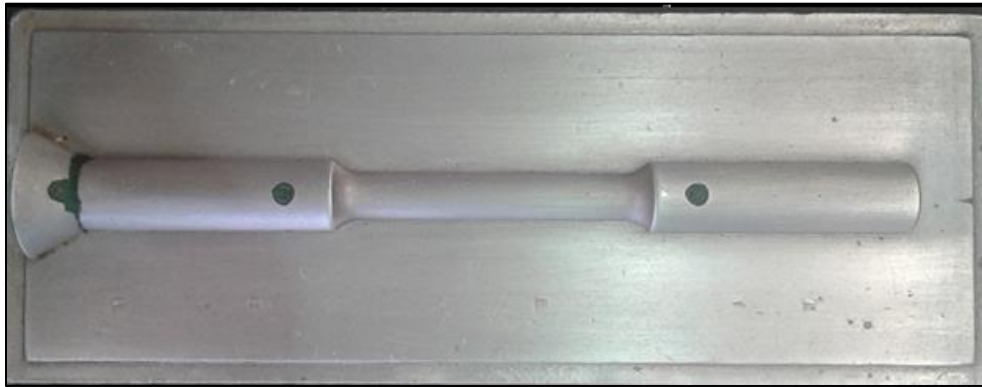


Figura 8 Muestra el modelo metálico empleado para obtener las piezas de media barra de tensión.

Para la obtención de los moldes de silicato-CO₂ se preparó una mezcla de arena de sílice Oklahoma con 5% en peso total de silicato de sodio, posteriormente se mezcló durante 2.5 min.

Se colocó la placa con la media barra, y una caja alrededor de la placa, para contener la mezcla, el llenado se realizó en dos etapas, se llenó y se comprimió, posteriormente se realizó un rayado a la superficie antes de agregar más mezcla, en la segunda adición de mezcla el molde debería quedar al ras de la caja después de la compactación.

La caja junto con la placa son sometidos un gaseado directo con CO₂ en zonas de la superficie del molde evitando el escape de gas para dar resistencia, posteriormente una vez que el molde tiene suficiente resistencia es llevado a una atmósfera de CO₂ alrededor de 3 minutos, para que el gas reaccione con el silicato de sodio hacia el interior del molde en todas las direcciones y no solo en su superficie.

Una vez que se ha endurecido la mezcla se retira la placa, y se obtiene la mitad del molde, su contraparte sigue el mismo tratamiento sin embargo en lugar de colocar la placa con la media barra se coloca una superficie lisa debajo de la caja, para generar una pared totalmente plana.

Las piezas de silicato que han recibido el tratamiento de endurecimiento son llevadas a una estufa por 15 minutos a 80 °C, finalmente se dejan secar al ambiente.

El molde final para obtener las barras consiste en una pieza de silicato con la impresión de la barra y una pieza con pared lisa, las medias barras fueron coladas en una aleación de aluminio 356, se dejaron enfriar, se desmoldan y se mejora la calidad superficial de las piezas.

Corredor y entradas del sistema general

Estas piezas fueron fabricadas en madera con forma de trapecio, con ángulos de salida de aproximadamente 55° generados en una sierra de banco, en la Tabla 7 se muestran las áreas transversales para estos componentes.

Tabla 7 Áreas transversales de las piezas fabricadas así como la relación de colada que determina un sistema no presurizado.

Componente	Áreas transversales totales	Relaciones entre áreas
<i>Bajada (sección inferior).</i>	4.32 cm ²	1.00
<i>Corredor anterior al filtro</i>	4.31 cm ²	1.00
<i>Corredor posterior al filtro</i>	8.63 cm ²	2.00
<i>Entradas</i>	14.85 cm ²	3.44

Accesorios

Una forma común para los accesorios fue de cono truncado, piezas fabricadas con esta forma son: la bajada, alimentadores y el colchón, estos fueron generados a partir de un prisma rectangular de madera, con ayuda de un cepillo se eliminaron las aristas a lo largo del prisma para redondearlo, una vez que tuvo cierta redondees se maquina mediante un torno y gurbias para madera, de esta forma se obtuvo una bajada un colchón y ocho conos truncados.

Además del corredor y las entradas que forman parte del sistema general para la placa se generaron corredores intercambiables, estos tienen la función de conectar la bajada con el sistema general de acuerdo al experimento a ejecutar, ya sea sistema con filtro o sin filtro. Al igual que las entradas y el corredor estos fueron cortados con un ángulo mediante la sierra de banco del taller de modelos.

Para el sistema con filtro se elaboró una expansión del corredor que estará por arriba del filtro, por otra parte la cámara con corredor que contendrá el filtro y dirigirá metal hacia el sistema general, ambas piezas se fabricaron en madera, nuevamente con la sierra de banco.

Finalmente se prepararon corazones que evitan el paso de metal hacia el corredor obligando al metal a pasar por el filtro, estas piezas se fabricaron manualmente, mediante herramientas

de corte y gurbias para dar la forma deseada, el material empleado para estas piezas fueron bloques de arena Shell.

3.1.3 Ensamble de la placa modelo

El ensamble de la placa se realizó en varias etapas, debido al ajuste del sistema en el espacio delimitado por las dimensiones de la tapa y base.

Piezas del sistema general

Una vez que la placa de madera fue lijada, se realizó un tratamiento para su protección mediante cuatro capas de sellador para evitar la penetración de humedad evitando distorsión en la placa, finalmente se realizó un tratamiento superficial para obtener una superficie lisa y tersa.

Para empezar con el ensamble del sistema general se presentaron las barras junto con todas las piezas de este sistema, dejando suficiente espacio para la arena entre la pared de la tapa o base y las piezas en la placa.

Una vez que se estableció la posición de todas las piezas, se marcó su silueta. Las medias barras fueron barrenadas uniendo las dos mitades, los orificios se hicieron en los extremos de la barra, finalmente se colocó una barra en la posición establecida y se perforo la placa de madera siguiendo la guía de la barra, en todo momento se cuidó que las superficies estuvieran en condiciones de nivel y perpendicularidad respecto a la broca.

Una vez que se realizó el mismo proceso para los dos pares de medias barras se unieron a la placa con pegamento y para evitar que se movieran, se colocó un perno a presión cruzando la placa y las dos partes de la barra de tensión en los orificios.

Una vez que las barras estaban fijas en la placa modelo, se colocaron las piezas restantes, los alimentadores fueron ensamblados con la misma técnica de las barras sin embargo en este caso solo se colocó un perno central para unir las piezas superior e inferior, los corredores solo

fueron pegados al igual que las entradas, algunos detalles de estas piezas se pueden revisar en el Anexo B.

Piezas intercambiables

Lo primero fue determinar la posición del colchón que es la parte más grande, nuevamente cuidando, el espacio para la arena entre la pared de las cajas y las piezas, al colocar el colchón correctamente aseguramos que la bajada concederá espacio suficiente para la arena dado que los dos diámetros de la bajada son menores al diámetro del colchón ambas piezas se barrenaron y se colocó un perno en el centro haciendo que sobresaliera de la placa de madera para posicionar la bajada y evitar que se mueva durante el moldeo.

Una vez posicionado el colchón, ya se tenían todas las restricciones de espacio posibles, es entonces que se diseñaron los corredores y la cámara para el filtro que unirán la bajada con el sistema general, estos se ensamblan a la placa modelo mediante pijas en dos puntos para evitar rotación de las piezas.

Acabados en la placa modelo

Finalmente se resanaron los huecos entre las diferentes piezas generando un conducto continuo en el sistema.

Posteriormente se aplicó sellador a todas las piezas junto con la placa y se realizó un tratamiento para la mejora superficial de las piezas y de las caras en contacto con la arena durante el moldeo, en la Figura 9 y 10 se muestra la placa modelo con los dos sistemas empleados. Esto es de importancia debido a que la arena húmeda tiende a adherirse en las superficies rugosas ocasionando que las impresiones en la arena sean de mala calidad o deformando los canales por los que fluirá el metal durante la colada.



a)

b)

Figura 9. Placa modelo con el sistema no presurizado sin filtro, a) corresponde a la tapa y b) corresponde a la base.



a)

b)

Figura 10 Placa modelo incorporando el sistema no presurizado con filtro, a) corresponde a la tapa y b) corresponde a la base.

3.2 Mezcla de arena para moldeo en verde

Para la mezcla de arena se determinó usar una humedad de 3.1% de acuerdo a González. A. [15], que realizó un análisis de propiedades de la arena empleada en este trabajo.

3.2.1 Técnica para la preparación de la mezcla de arena.

Cada experimento consiste de dos moldes, la demanda de arena es aproximadamente de 100 Kg/molde, durante cada experimento se realizaron 14 cargas de arena cada una de 15 Kg, las cargas fueron divididas en 3 lotes, esto es debido a la diferencia de humedad respecto a nivel de la arena en la tolva.

Para cada lote se determinó la humedad inicial esto fue de la siguiente manera, se vierte el contenido de una carga en un molino chileno de capacidad 20Kg y se mezcla por medio minuto, se toma una muestra aproximada de 50g posteriormente se lleva a un secador durante 7 minutos para extraer la humedad de la mezcla, se retira del secador y se pesa nuevamente, con ello se determina tanto la humedad inicial de la arena y el agua que se deberá agregar para alcanzar la humedad requerida con las siguientes ecuaciones.

Ecuación 5
$$H_o = \frac{W_o - W_f}{W_o}$$

Ecuación 6
$$Aa = \frac{Hr - H_o}{1 - Hr} * MA$$

Donde H_o , H_r y MA son humedad inicial, humedad requerida y carga de arena respectivamente, de la misma forma W_o y W_f son peso inicial y final en la muestra.

Una vez que se ha calculado la humedad y la cantidad de agua, esta se agrega y se mezcla durante 3 minutos, finalmente se toma una muestra aproximada de 50g y se procede a determinar la humedad final.

Después de haber preparado varias cargas de mezcla de arena en pruebas de moldeo se notó que con el agua calculada a agregar nunca se alcanzaba la humedad requerida, por tal motivo se desarrolló una técnica para entrar al rango de la humedad requerida, esto se muestra en la sección 3.2.3 “Control de la humedad en la mezcla de arena”.

3.2.2 Pruebas de moldeo

A partir de las cargas de arena se procedió a realizar el moldeo, principalmente para observar defectos en la placa o en las impresiones ya sea por, la rugosidad de la superficie, la humedad de la arena, la geometría de las piezas en la placa o en sí mismo la técnica de compactación y moldeo.

En las primeras pruebas de moldeo se observó que la arena se adhería a la placa modelo en las uniones de piezas con ángulos cerrados y en las uniones de la placa con las piezas, lo que llevo a realizar nuevos acabados para la placa modelo hasta obtener una impresión de calidad.

Por otra parte una vez que se observó que la calidad de la impresión en arena fue adecuada se procedió a realizar una colada, esta consistió de dos moldes, por una parte un molde con sistema no presurizado con filtro, y un sistema no presurizado sin filtro.

Durante esta colada se observó que el tiempo entre la preparación de las cargas de arena y el inicio del moldeo era suficiente para que la mezcla de arena empezara a secarse, una vez que se desmoldaron las piezas se observó que las barras de tensión presentaban penetración de arena en gran parte de su superficie, aunque la calidad de la impresión fue adecuada, se observó en las piezas que hubo erosión de arena con lo que las barras de tensión presentaban rugosidad, por otra parte se presentó una situación en el sistema con filtro, específicamente en la zona del filtro, esto debido a un ángulo de salida de la cámara donde se coloca el filtro lo que permitía el paso de metal en el espacio entre la pared de arena y el filtro.

De las pruebas de moldeo se determinó lo siguiente:

Establecer un rango para la humedad de la arena de 3.1 a 3.3%, emplear la arena del último lote preparado para el contacto con la placa y emplear los primeros lotes como arena de relleno, además de protección a las cargas preparadas para evitar perdida de humedad.

Aumentar el nivel de compactación de la arena para evitar la erosión de la impresión por el impacto con el metal líquido.

Disminuir las dimensiones de la pieza de madera que deja la impresión para el filtro. De tal modo que el filtro entre a presión aun cuando erosione la arena.

Eliminar la arena erosionada en el filtro mediante un flujo de aire a presión, para evitar la penetración de los granos de arena generados por esta acción.

3.2.3 Control de la humedad en la mezcla de arena

De acuerdo a los datos proporcionados en la referencia [15], se tomó la humedad como 3.1 sin embargo en la sección anterior se hablo acerca del problema de secado de la arena por lo que se estableció un rango de 3.1 a 3.3 porciento de humedad en la mezcla de arena.

Como se mencionó en la sección “Técnica para la preparación de la mezcla de arena”, los cálculos no reflejaban la humedad requerida después del proceso de mezclado.

Para mejorar la precisión en la humedad de la mezcla de arena se realizó la siguiente secuencia:

- 1 Determinar la humedad inicial de la carga.
- 2 Calcular el agua teórica a agregar para obtener la humedad requerida 3.2 porciento (promedio del rango).
- 3 Mezclar y determinar la humedad en la mezcla.
- 4 Con la nueva humedad que siempre era menor a la requerida recalcular el agua faltante a agregar.
- 5 Mezclar y determinar la humedad.
- 6 Una vez que se alcanzó la humedad requerida aproximadamente 3.2%, se calcula un factor.

Ecuación 7
$$FAa = \frac{Aar}{Aat}$$

Donde FAa es el factor correctivo para el agua a agregar A_{ar} y A_{at} son agua real a agregar y agua teórica a agregar.

Finalmente se estimó un factor de 1.08 para alcanzar aproximadamente 3.2 porciento de humedad, con lo que la Ecuación 6 cambia a:

Ecuación 8
$$Aa = \frac{Hr-Ho}{1-Hr} * MA * FAa$$

Con el factor calculado se realizó la preparación de la arena para la totalidad de los experimentos, se comprobó que la humedad era aproximada a 3.2 por ciento para la primera carga a preparar de cada lote, finalmente se ajusta agregando o disminuyendo 5ml, mínima unidad que se puede estimar en una probeta de 1L para la siguiente carga del mismo lote.

3.3 Dispositivo para la evaluación de la velocidad del metal en el sistema de colada

Se elaboró un dispositivo tipo mesa de control por duplicado uno para cada molde de la corrida, la cual contiene focos led que dan la señal al paso del flujo de metal en el corredor y posteriormente en las entradas del sistema de colada.

La elaboración consistió en una placa de madera, la cual fue perforada en 12 posiciones simétricas, para insertar los focos led, estos se posicionaron y se unieron a la placa mediante pegamento termofusible, una vez colocados los focos asegurando que todos los focos estuvieran con el mismo polo en la misma posición (polo positivo arriba y polo negativo abajo), se decidió conectar el circuito eléctrico en paralelo principalmente debido a que en un circuito en serie si un led falla los demás no encenderán en el caso del circuito en paralelo esto no ocurre minimizando la pérdida de información en caso de un led en mal estado, en la Figura 11 se puede ver un esquema del circuito eléctrico en la placa de control.

Se colocó un porta pilas en la parte de atrás de la placa y se generó el circuito mediante alambre y cable de cobre, se unió el polo positivo del porta pilas con el primer foco y cada foco se unió con el siguiente en el mismo polo, los polos negativos de los leds fueron soldados a un cable de cobre con doble fase, la otra fase en el mismo extremo se soldó a un alambre de cobre grueso que a su vez se conecta al otro polo del porta pilas, este alambre de cobre grueso se conecta con todos los leds de la misma manera como lo muestra la Figura 11.

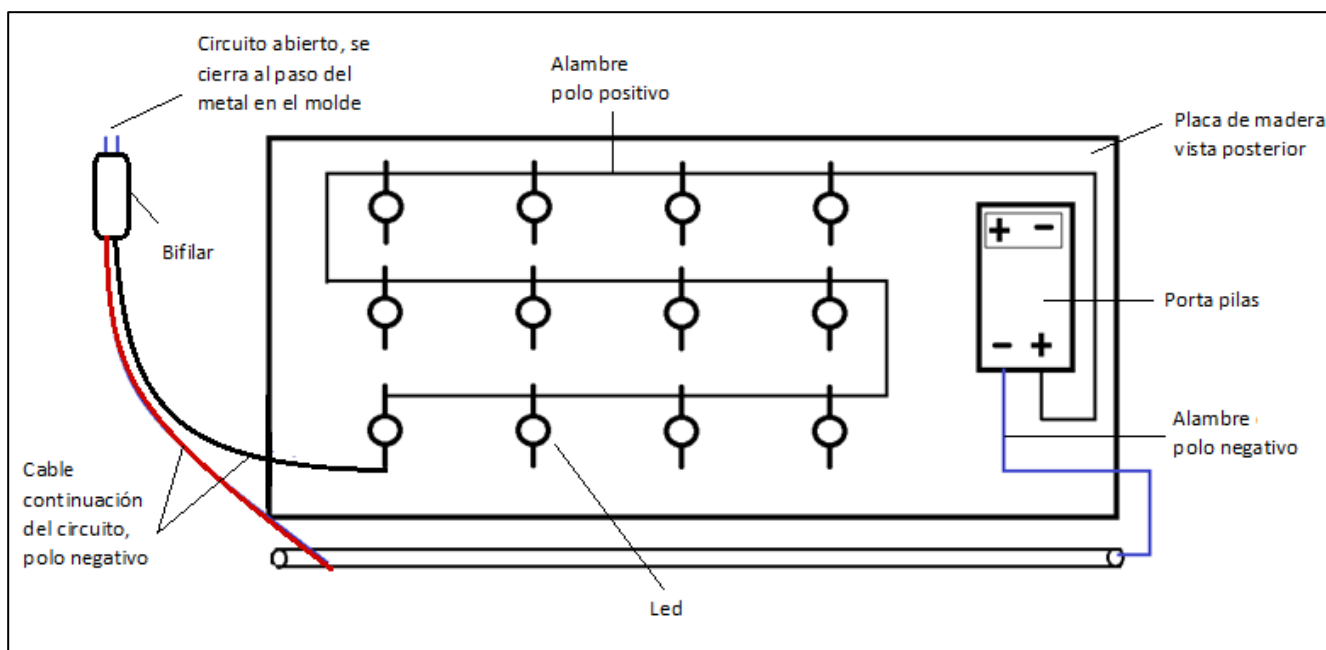


Figura 11 Esquema del dispositivo y el circuito eléctrico empleado para determinar la velocidad del fluido en las partes del molde.

El extremo opuesto de cada cable de cobre con dos fases se colocó en el molde sin unir ambas fases en cada una de las posiciones de la Figura 12, al pasar el metal el circuito se completa encendiendo cada led, dado que los alambres de cobre en las uniones tendían a romperse por el movimiento, se aplicó una masa de pegamento termofusible para evitar la rotura de las uniones.

3.4 Diseño experimental

En esta sección se describe a detalle las condiciones y variables para el desarrollo de los experimentos.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de los defectos bifilms al implementar filtros de espuma cerámica, se seleccionó la aleación 535 (Aluminio-Magnesio), que es una aleación de colada y que presenta una gran oxidación de su superficie, durante el proceso de fusión. El trabajo consiste de 4 sistemas de colada como lo indica la Tabla 8 que a su vez es la variable de trabajo.

Tabla 8 Sistemas de colada

Variable	Etiqueta	Descripción
Sistema no presurizado sin filtro	SF	
Sistema no presurizado con filtro de 10ppi.	F10	Filtro con dimensiones en cm de 50x50x20 con 10 poros por pulgada lineal.
Sistema no presurizado con filtro de 20ppi.	F20	Filtro con dimensiones en cm de 50x50x15 con 20 poros por pulgada lineal.
Sistema no presurizado con filtro de 30ppi.	F30	Filtro con dimensiones en cm de 50x50x20 30 poros por pulgada lineal.

Para los experimentos de colada se realizaron dos moldes por corrida para obtener al menos 3 probetas por cada sistema.

Además un experimento para determinar la velocidad en el sistema de colada, para cada uno de los cuatro tipos presentados en la Tabla 8, realizándolo en dos corridas más. En donde cada molde en estas corridas correspondió a un sistema diferente, así completando un total de 6 fusiones.

Sin embargo durante la experimentación se observaron algunos errores lo que llevo a un aumento de las fusiones planeadas generando un total de 13 fusiones.

6 relacionadas con los experimentos para la determinar la velocidad de flujo y 7 para obtener probetas de tensión, en principio se estableció no tomar las barras de los moldes en los que se determinaría la velocidad debido a un posible daño en las piezas por la erosión provocada durante la instrumentación de los moldes, sin embargo al ser los últimos experimentos que se realizaron la técnica permitió obtener piezas de excelente calidad superficial.

3.5 Desarrollo experimental.

En esta sección se lleva la secuencia realizada durante la experimentación para las 13 fusiones realizadas.

3.5.1 Moldeo en los experimentos

Se prepararon 14 cargas de arena divididas en tres lotes, los dos primeros de 5 cargas y el restante de 4 cargas, tal cual se vio en la sección 3.2.3 “Control de la humedad en la mezcla de arena”.

Después de preparar la arena se colocó la placa entre la tapa y la base posteriormente se empieza por llenar la base, se colocan prensas en las pestañas de la tapa y base como sistema de sujeción esto ayudo a refinar la técnica de moldeo para evitar desfase en los moldes y la fuga de metal, durante la colada.

Para iniciar el llenado se colocó una malla para deshacer los terrones de arena, recordando empezar con las ultimas cargas preparadas, una vez que se ha cubierto la superficie de la placa se agrega arena de los primeros lotes, el moldeo de la base se realizó en tres pasos, una vez que se compacta la primera capa de arena, se ralla la superficie para crear puntos de anclaje con la capa posterior, esta y la siguiente capa de arena se incorporaran sin pasar por la malla.

Una vez que se alcanza o excede el nivel de la caja de la base se rasa para generar una superficie plana, se voltea y se empieza a llenar la tapa, en esta parte se coloca la bajada en el perno para evitar que se mueva al incorporar las capas de arena.

Nuevamente se realiza el proceso como en la base, dado que la tapa es dos veces la base, se realizaron más de tres capas de arena, es de vital importancia no llenar demasiado de arena antes de compactar la primera capa, para generar buenas superficies en las piezas finales. Si se agregaba mucha mezcla la superficie de la arena presentaba desprendimiento o erosión y en las probetas excesos de metal debido a falta de compactación.

Al llegar a cierta altura se colocó una caja para alcanzar la altura de la bajada, siguiendo el mismo proceso de llenado de arena una vez que se alcanza la altura de la caja final, se generó una tina para el vertido controlado de metal, hacia la bajada.

3.5.2 Técnica de fusión

Se fabricó aleación 535 mediante aluminio puro comercial, magnesio puro y lingotes de lata de aluminio, la composición química de cada fusión y de los lingotes de lata de aluminio se puede observar en el Anexo C.

Preparación de la aleación 535.

Una vez que se han calculado los componentes a agregar, se cortan y pesan las cantidades necesarias, se enciende el horno y se espera a que el crisol tome una coloración naranja, para empezar a precalentar los componentes a agregar, en este caso primero las partes de aluminio puro, seguido de la chatarra de lata de aluminio, una vez que el crisol alcanza la temperatura cercana a la de fusión (660°C), se introducen las partes de aluminio puro y se espera a que el nivel de metal en el crisol baje debido al cambio de estado una vez que se pueda introducir o que se ha fundido la masa suficiente de aluminio puro se agregan los lingotes de las latas.

Una vez que se ha completado el cambio de estado de sólido a líquido se precalienta el magnesio directamente con la radiación que expide el crisol antes de introducirlo a la masa de la fusión, después de introducir el magnesio este se sostiene mediante unas pinzas en el fondo del crisol, al mismo tiempo se coloca un fundente de cobertura para evitar una masiva oxidación del magnesio y la caída en el porcentaje de magnesio final, una vez que el magnesio paso a formar parte de la masa líquida esta se agita para homogeneizar.

Después de agitar se extrae una muestra para realizar un análisis de composición química, para tomar las acciones pertinentes para mantener los elementos de aleación en el rango de composición química establecido.

Fusión para corrida experimental

En la gran mayoría de corridas se partió de una aleación de magnesio preparada con antelación, en este caso se pesa la carga necesaria para abastecer a los moldes y tener un sobrante, (11-12Kg) para cualquier inconveniente en la colada.

Se enciende el horno y se precalienta la carga, esta consiste de aleación 535, tanto de lingotes con masa entre 200 a 300g y retorno de la colada anterior.

Después de precalentarla se carga al crisol con la aleación, posteriormente y cuando el metal está en forma líquida o semilíquida se agrega fundente de cobertura para evitar la oxidación principalmente de magnesio, se agita y comprueba que el metal está completamente en estado líquido y se empieza a revisar la temperatura del metal, al mismo tiempo y una vez que se ha comprobado que el material está completamente en estado líquido se toma una muestra para obtener la composición química, en todo momento se monitorea la temperatura evitando rebasar la temperatura de trabajo establecida en 900°C.

El porcentaje de magnesio en este caso siempre está cerca del límite inferior, si ha pasado tiempo excesivo es posible que el magnesio este por debajo del límite inferior. Para ajustar el magnesio a la composición requerida se agregan pedazos de magnesio previamente cortados con masas diferentes, durante la fusión se calcula el magnesio a agregar, para seleccionar el pedazo que aporte la cantidad requerida y se comprueba la composición, generalmente se excede el límite superior por efectos de pérdida durante el tratamiento al metal líquido y el tiempo de permanencia en el horno.

De acuerdo a la temperatura en la masa líquida se puede encender nuevamente el quemador para alcanzar la temperatura de tratamiento que se estableció en 800°C o si estamos dentro del rango de temperatura de trabajo se apaga el quemador y esperamos a estar a temperatura de tratamiento, al estar a la temperatura de tratamiento se realiza una desgasificación con argón durante 15 minutos, mediante una lanza metálica con cobertura cerámica y tapón poroso, durante este tiempo y de acuerdo al tiempo de permanecía después del ajuste se puede cubrir con fundente las zonas descubiertas por el flujo o bien aumentar el flujo en caso de que el porcentaje de magnesio fuera excesivo.

Después de haber terminado con la desgasificación, la temperatura se encuentra aún por arriba de la temperatura de colada, en este momento si la temperatura está cercana a la de colada se limpia la masa líquida dentro del horno para retirar la escoria y las capas de óxido formadas, si la temperatura aun continua elevada se retira el crisol del horno y se realiza la limpieza fuera de la cámara del horno, posteriormente o durante la limpieza se toma una muestra para la composición química final y se procede a colar cuando se alcanza una temperatura alrededor de 760, el rango de la temperatura para colada fue establecida entre 760-750°C.

3.5.3 Instrumentación del molde en las pruebas de velocidad

Para los experimentos en los que se empleó el dispositivo para medir la velocidad se preparó con antelación el sistema, es decir se cortan pedazos de cable a los cuales se les coloca bifilares a modo de resistir la temperatura, se trenzan por separado los alambres de cada fase del extremo con bifilar para evitar que se junten y se unen por el otro extremo a las conexiones adecuadas en la placa de la Figura 11. Para los siguientes experimentos se deben cortar los pedazos de cable usados y colocar nuevos.

Durante la instrumentación se generan hoyos en el molde, 4 de ellos en el corredor y 2 en cada entrada, los del corredor están separados equidistantes a 6.5cm, en las entradas a 5cm uno del otro.

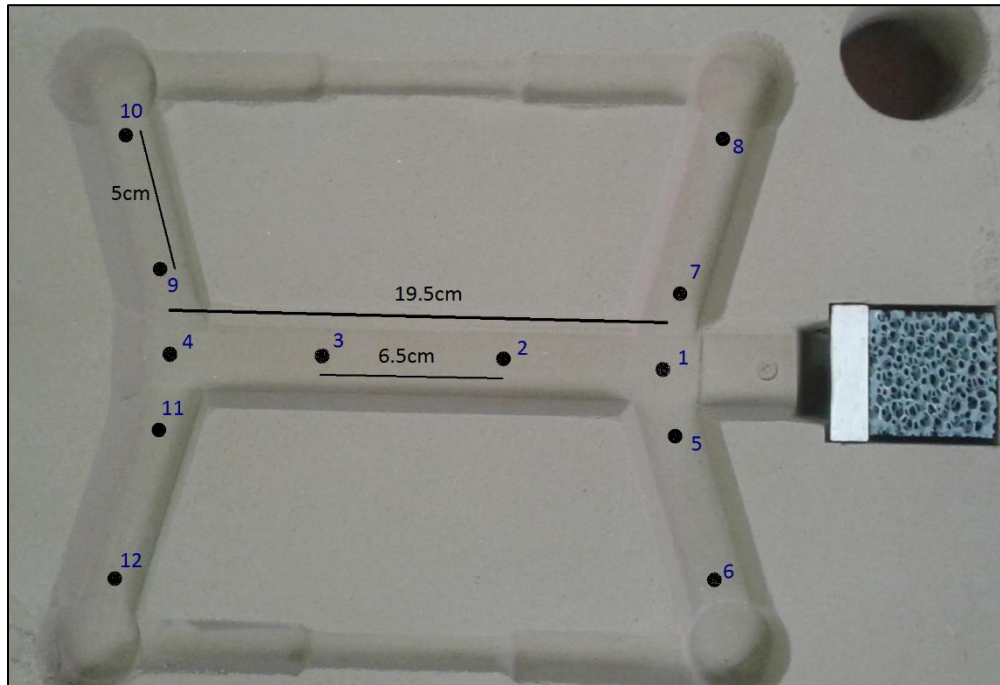


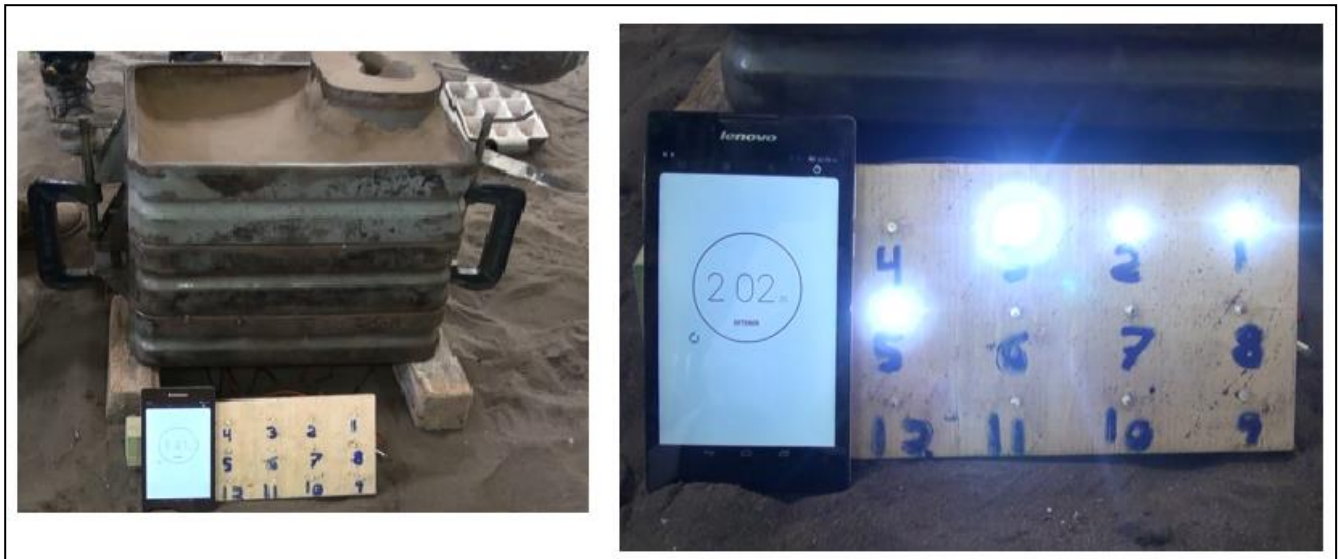
Figura 12. Posiciones en las que se colocaron los cables durante los experimentos, así como la distancia entre las posiciones para estimar la velocidad mediante tiempo y distancia.

Se insertan los cables con los bifilares de acuerdo a la posición establecida en el esquema de la Figura 12. Una vez que se comprueba la continuidad de corriente se sujetan, mediante pernos delgados y arena para evitar que se desprendan durante el transporte al área de colada, finalmente antes de cerrar el molde se comprueba nuevamente la continuidad de la conexión en caso afirmativo se procede a cerrar el molde, si no se busca y corrige el error.

Vaciado a moldes

Sin importar si los moldes son para determinar la velocidad u obtener las piezas, los moldes se colocan en la zona de vaciado con ayuda de un nivel, esto es incluso más importante para la determinación de la velocidad.

Si los experimentos fueron para medir la velocidad se colocaron los moldes junto con el dispositivo y se colocó un cronómetro en la carátula de la tabla de control, este se acciona y se posiciona una cámara de video para registrar el tiempo en el que cada foco enciende como se muestra en la Figura 13.



a)

b)

Figura 13. Vertido a moldes para las corridas con el dispositivo para medir velocidad, en a) se muestra como se compone este sistema que va conectado al molde antes de empezar a verter el metal y en b) se observa como encienden los focos al paso del metal.

La parte final del experimento consiste en el vertido del metal a moldes, una vez que se está 10 grados arriba de la temperatura de colada y el metal está completamente limpio se posiciona el maneral junto con el crisol, inclinando el crisol para verter el metal en la tina al estar en la temperatura de colada.

Al recibir la señal se inclina para empezar el llenado de la tina es importante mantener el nivel de metal en la tina para evitar diferencias y discontinuidad durante el llenado.

3.5.4 Ensayo de tracción

A lo largo de los experimentos se cortaron las piezas para emplear los retornos del sistema de colada en la próxima fusión, las piezas fueron marcadas con la condición del experimento, es decir con las etiquetas de la Tabla 8 y el número de fusión, además se les incorporo un número a las probetas para llevarlas al ensayo de tensión.

Antes de ensayar las probetas se prepararon quitando los remanentes de metal en la línea de partición y se les dio un mejor acabado mediante lijas finas, finalmente se agruparon de

acuerdo a las condiciones y se midió una longitud centrada de 5 cm en la sección más delgada de la barra, además se midieron 5 diámetros a lo largo de esta sección debido a irregularidades en la pieza.

Una vez agrupadas, marcadas y realizadas las mediciones pertinentes se ensayaron para obtener los datos de resistencia a la tracción (σ_{tr}), de acuerdo a las pruebas iniciales se observó que el material tenía un comportamiento frágil por lo que la resistencia a la tracción correspondía con el esfuerzo de cedencia por lo tanto las gráficas esfuerzo-deformación no fueron de interés dando mayor importancia a la resistencia a la tracción.

3.5.5 Inspección micrográfica

Esta inspección se realizó desbastando las superficies de fractura obtenidas en el ensayo de tensión sin llegar a eliminar la evidencia de la fractura como se muestra en la Figura 14, ya que se quería encontrar la evidencia de defectos bifilm causantes de una falla anticipada en las probetas, los resultados de las metalografías se presentan en el Capítulo IV.

Una vez que se seleccionó una probeta de cada sistema se cortó paralelamente al plano de la fractura, posteriormente se realizó un desbaste parcial para obtener zonas lisas en el área de la fractura, este fue con lijas de 80 a 2000, en cada número de lija se debe cuidar que las líneas de la lija anterior se borren para tal resultado se recomienda tomar la pieza con las líneas en sentido perpendicular a la dirección del siguiente lijado.

Una vez que se ha alcanzado un desbaste hasta la lija 2000 se procede a realizar un pulido, este se realiza mediante un paño con movimiento rotatorio, además se emplea tartrato de amonio para evitar la oxidación de la pieza, se puede emplear alúmina sin embargo un exceso de este producto no es recomendable. El pulido final se realiza de manera estática para evitar la aparición de rallas causadas por el propio paño.



Figura 14. Piezas desbastadas parcialmente para evitar destruir la evidencia de la fractura y observar la interface fractura-pieza pulida.

El revelado de la estructura se realizó con Keller reactivo disponible en el laboratorio metalográfico que de acuerdo con American Society for Metals Vol. 9 Microstructures and Metalography [16], sirve para algunos sistemas de aleación de aluminio. Finalmente se revisó la estructura mediante un microscopio óptico con aumentos de 50, 100 y 200X.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1 Pruebas de tensión

En la Tabla 9 se muestran los diámetros y en la Figura 15 las zonas de medición de las probetas.



Figura 15. Secciones de medición de los diámetros, los puntos indican que la medición se tomó en los extremos de la línea de partición, las mediciones entre los puntos fueron tomadas perpendicularmente al plano de la línea de partición para tener una mejor representación de los esfuerzos en las probetas.

Tabla 9. Mediciones de los diámetros de las probetas sometidas a ensayo de tensión las etiquetas siguen la siguiente regla la primera parte corresponde al tipo de sistema como se indicó en la Tabla 8, la siguiente corresponde al número de fusión y el tercer conjunto al número de muestra.

Sin filtro (SF)					Sin filtro (SF)				
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	SF/F4/M1	SF/F4/M2	SF/F4/M3	SF/F4/M4		SF/F5/M1	SF/F5/M2	SF/F9/M1	SF/F9/M2
1	1.27	1.34	1.335	1.365	1	1.29	1.36	1.325	1.225
2	1.28	1.36	1.295	1.36	2	1.285	1.35	1.35	1.25
3	1.26	1.37	1.28	1.335	3	1.26	1.34	1.355	1.25
4	1.245	1.265	1.265	1.32	4	1.285	1.265	1.26	1.36
5	1.205	1.27	1.245	1.295	5	1.305	1.27	1.315	1.315
Promedio	1.252	1.321	1.284	1.335	Promedio	1.285	1.317	1.321	1.28

Tabla 9. Continuación

Sin filtro (SF)					Filtro 10ppi				
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	SF/F10/M1	SF/F10/M2	SF/F10/M3	SF/F10/M4		F10/F5/M1	F10/F5/M2	F10/F9/M1	F10/F9/M2
1	1.23	1.26	1.36	1.37	1	1.345	1.325	1.34	1.335
2	1.265	1.285	1.36	1.365	2	1.315	1.365	1.31	1.38
3	1.3	1.315	1.34	1.345	3	1.3	1.37	1.3	1.37
4	1.3	1.32	1.3	1.29	4	1.295	1.27	1.295	1.27
5	1.285	1.31	1.32	1.295	5	1.245	1.27	1.3	1.315
Promedio	1.276	1.298	1.336	1.333	Promedio	1.3	1.32	1.309	1.334

Filtro 10ppi					Filtro 10ppi				
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	F10/F8/M1	F10/F8/M2	F10/F8/M3	F10/F8/M4		F10/F11/M1	F10/F11/M2	F10/F11/M3	F10/F11/M4
1	1.33	1.265	1.35	1.295	1	1.38	1.365	1.3	1.3
2	1.36	1.29	1.34	1.275	2	1.37	1.355	1.27	1.33
3	1.36	1.3	1.32	1.25	3	1.35	1.35	1.27	1.345
4	1.265	1.31	1.265	1.21	4	1.29	1.32	1.335	1.29
5	1.28	1.27	1.31	1.265	5	1.295	1.315	1.35	1.27
Promedio	1.319	1.287	1.317	1.259	Promedio	1.337	1.341	1.305	1.307

Filtro 20ppi					Filtro 20ppi				
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	F20/F1/M1	F20/F1/M2	F20/F1/M3	F20/F1/M4		F20/F3/M1	F20/F3/M2	F20/F3/M3	F20/F3/M4
1	1.33	1.305	1.36	1.26	1	1.32	1.355	1.31	1.245
2	1.365	1.275	1.36	1.275	2	1.36	1.38	1.275	1.3
3	1.365	1.25	1.365	1.3	3	1.36	1.385	1.255	1.31
4	1.31	1.315	1.325	1.295	4	1.29	1.28	1.285	1.3
5	1.32	1.325	1.33	1.28	5	1.3	1.31	1.27	1.3
Promedio	1.338	1.294	1.348	1.282	Promedio	1.326	1.342	1.279	1.291

Filtro 20ppi					Filtro 30ppi				
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	F20/F12/M1	F20/F12/M2	F20/F12/M3	F20/F12/M4		F30/F2/M1	F30/F2/M2	F30/F2/M3	F30/F2/M4
1	1.26	1.26	1.335	1.36	1	1.345	1.32	1.34	1.32
2	1.275	1.29	1.355	1.37	2	1.345	1.27	1.35	1.28
3	1.3	1.3	1.36	1.35	3	1.355	1.235	1.36	1.255
4	1.3	1.3	1.33	1.26	4	1.235	1.265	1.32	1.31
5	1.3	1.31	1.32	1.26	5	1.32	1.28	1.295	1.31
Promedio	1.287	1.292	1.34	1.32	Promedio	1.32	1.274	1.333	1.295

Tabla 9. Continuación

Filtro 30ppi						Filtro 30ppi		Filtro 20ppi	
	Diámetro [cm]					Diámetro [cm]			
	F30/F13/M1	F30/F13/M2	F30/F13/M3	F30/F13/M4		F30/F6/M1	F30/F6/M2	F20/F6/M1	F20/F6/M2
1	1.34	1.295	1.31	1.37	1	1.37	1.34	1.3	1.355
2	1.365	1.295	1.285	1.365	2	1.375	1.315	1.28	1.36
3	1.38	1.265	1.26	1.35	3	1.35	1.29	1.26	1.34
4	1.29	1.325	1.285	1.3	4	1.31	1.31	1.315	1.31
5	1.305	1.32	1.3	1.265	5	1.29	1.315	1.33	1.32
Promedio	1.336	1.3	1.288	1.33	Promedio	1.339	1.314	1.297	1.337

Ahora se muestran en las Tablas 10 a 13 los datos registrados y relacionados con los ensayos de tensión y la secuencia para la obtención de los esfuerzos mediante hoja de cálculo.

Tabla 10. Secuencia y datos referentes a los ensayos de tensión para obtener la resistencia a la tracción para las probetas sin filtro.

	Muestra	Carga [ton]	Carga [Kg]	Fuerza [N]	Diámetro [m]	Area [m²]	σ_{tr} [Pa]	σ_{tr} [MPa]	
SF	SF/F4/M1	1.53	1530	15009.3	0.01252	0.00012311	121916050	121.92	117.57 Promedio
	SF/F4/M2	1.61	1610	15794.1	0.01321	0.00013706	115238700.2	115.24	
	SF/F4/M3	1.55	1550	15205.5	0.01284	0.00012949	117430189.3	117.43	
	SF/F4/M4	1.62	1620	15892.2	0.01335	0.00013998	113535216.8	113.54	
	F10/F5/M1	1.54	1540	15107.4	0.01285	0.00012969	116491054.3	116.49	
	F10/F5/M2	1.61	1610	15794.1	0.01317	0.00013623	115939770.6	115.94	
	SF/F9/M1	1.69	1690	16578.9	0.01321	0.00013706	120964846.8	120.96	
	SF/F9/M2	1.54	1540	15107.4	0.0128	0.00012868	117402918.2	117.40	
	SF/F10/M1	1.65	1650	16186.5	0.01276	0.00012788	126578721.8	126.58	
	SF/F10/M2	1.66	1660	16284.6	0.01298	0.00013232	123065639.7	123.07	
	SF/F10/M3	1.57	1570	15401.7	0.01336	0.00014019	109866388	109.87	
	SF/F10/M4	1.6	1600	15696	0.01333	0.00013956	112470284.6	112.47	

Tabla 11. Secuencia y datos referentes a los ensayos de tensión para obtener la resistencia a la tracción para las probetas, empleando filtro de 10ppi.

	Muestra	Carga [ton]	Carga [Kg]	Fuerza [N]	Diámetro [m]	Area [m ²]	σ_{tr} [Pa]	σ_{tr} [MPa]	
10ppi	F10/F5/M1	1.42	1420	13930.2	0.013	0.00013273	104949349.3	104.95	111.60 Promedio
	F10/F5/M2	1.58	1580	15499.8	0.0132	0.00013685	113262810.8	113.26	
	F10/F8/M1	1.63	1630	15990.3	0.01319	0.00013664	117024319.3	117.02	
	F10/F8/M2	1.52	1520	14911.2	0.01287	0.00013009	114621108.6	114.62	
	F10/F8/M3	1.59	1590	15597.9	0.01317	0.00013623	114499525	114.50	
	F10/F8/M4	1.42	1420	13930.2	0.01259	0.00012449	111896111.5	111.90	
	F10/F9/M1	1.72	1720	16873.2	0.01309	0.00013458	125379710.9	125.38	
	F10/F9/M2	1.7	1700	16677	0.01334	0.00013977	119320584.7	119.32	
	F10/F11/M1	1.52	1520	14911.2	0.01337	0.0001404	106208404.3	106.21	
	F10/F11/M2	1.52	1520	14911.2	0.01341	0.00014124	105575742.1	105.58	
	F10/F11/M3	1.36	1360	13341.6	0.01305	0.00013376	99746116.39	99.75	
	F10/F11/M4	1.46	1460	14322.6	0.01307	0.00013417	106752926.9	106.75	

Tabla 12. Secuencia y datos referentes a los ensayos de tensión para obtener la resistencia a la tracción para las probetas, empleando filtro de 20ppi.

	Muestra	Carga [ton]	Carga [Kg]	Fuerza [N]	Diámetro [m]	Area [m ²]	σ_{tr} [Pa]	σ_{tr} [MPa]	
20ppi	F20/F1/M1	1.65	1650	16186.5	0.01338	0.00014061	115119747.3	115.12	113.11 Promedio
	F20/F1/M2	1.55	1550	15205.5	0.01294	0.00013151	115622207.3	115.62	
	F20/F1/M3	1.61	1610	15794.1	0.01348	0.00014272	110668545.5	110.67	
	F20/F1/M4	1.53	1530	15009.3	0.01282	0.00012908	116276912.4	116.28	
	F20/F3/M1	1.58	1580	15499.8	0.01326	0.00013809	112240127	112.24	
	F20/F3/M2	1.57	1570	15401.7	0.01342	0.00014145	108886172.3	108.89	
	F20/F3/M3	1.46	1460	14322.6	0.01279	0.00012848	111478181.9	111.48	
	F20/F3/M4	1.37	1370	13439.7	0.01291	0.0001309	102670622	102.67	
	F20/F6/M1	1.62	1620	15892.2	0.01297	0.00013212	120285470.9	120.29	
	F20/F6/M2	1.68	1680	16480.8	0.01337	0.0001404	117388236.3	117.39	
	F20/F12/M1	1.51	1510	14813.1	0.01287	0.00013009	113867022.4	113.87	
	F20/F12/M2	1.52	1520	14911.2	0.01292	0.0001311	113735665	113.74	
	F20/F12/M3	1.56	1560	15303.6	0.0134	0.00014103	108515833.9	108.52	
	F20/F12/M4	1.63	1630	15990.3	0.0132	0.00013685	116847076.9	116.85	

Tabla 13. Secuencia y datos referentes a los ensayos de tensión para obtener la resistencia a la tracción para las probetas, empleando filtro de 30ppi.

	Muestra	Carga [ton]	Carga [Kg]	Fuerza [N]	Diámetro [m]	Área [m ²]	σ_{tr} [Pa]	σ_{tr} [MPa]	
30ppi	F30/F2/M1	1.58	1580	15499.8	0.0132	0.00013685	113262810.8	113.26	121.56 Promedio
	F30/F2/M2	1.51	1510	14813.1	0.01274	0.00012748	116202695.4	116.20	
	F30/F2/M3	1.6	1600	15696	0.01333	0.00013956	112470284.6	112.47	
	F30/F2/M4	1.5	1500	14715	0.01295	0.00013171	111719718.5	111.72	
	F30/F6/M1	1.8	1800	17658	0.01339	0.00014082	125397668.4	125.40	
	F30/F6/M2	1.66	1660	16284.6	0.01314	0.00013561	120086854.2	120.09	
	F30/F13/M1	1.98	1980	19423.8	0.01336	0.00014019	138557610.3	138.56	
	F30/F13/M2	1.67	1670	16382.7	0.013	0.00013273	123426347.4	123.43	
	F30/F13/M3	1.73	1730	16971.3	0.01288	0.00013029	130254425.4	130.25	
	F30/F13/M4	1.76	1760	17265.6	0.0133	0.00013893	124276065.8	124.28	

En las Tablas 10 a 13 se muestran los valores promedio de resistencia a la tracción (σ_{tr}) bajo estos datos se observa que el filtro que presenta valores más altos es el sistema con filtro de 30ppis, seguido por el sistema sin filtro, posteriormente el sistema con filtro de 20 ppi y finalmente el sistema con 10 ppi. Si bien el obtener mayores valores de esfuerzo es un parámetro importante, también interesa reducir la dispersión de la resistencia con el fin de obtener una mayor reproducibilidad, para ello a continuación se muestran histogramas de frecuencia Figuras 16 a 19 para una mejor visualización de los datos.

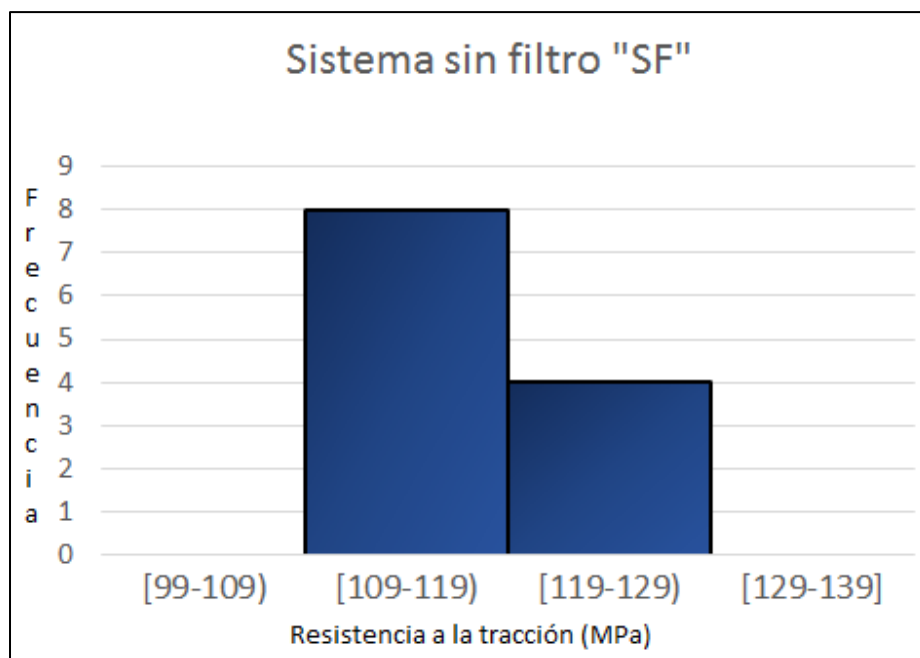


Figura 16. Histograma de frecuencia para el sistema sin filtro.

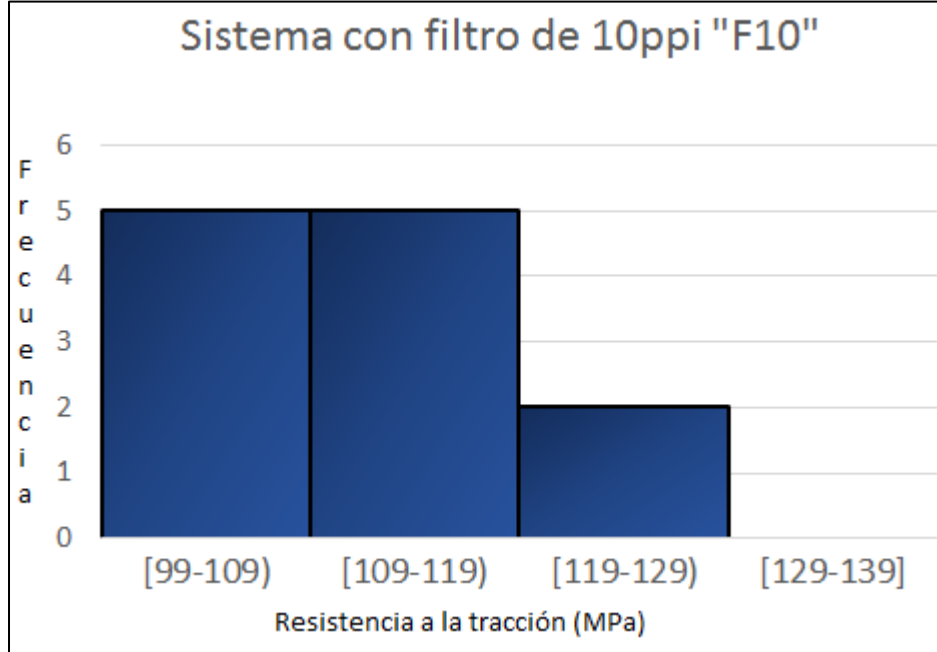


Figura 17 Histograma de frecuencia para el sistema F10.

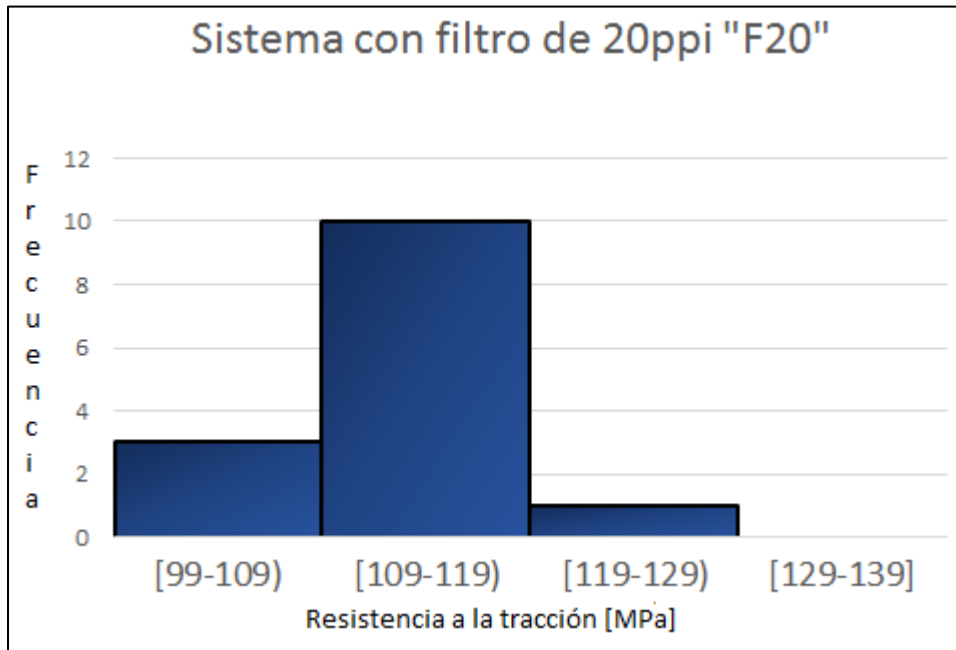


Figura 18 Histograma de frecuencia para el sistema F20.

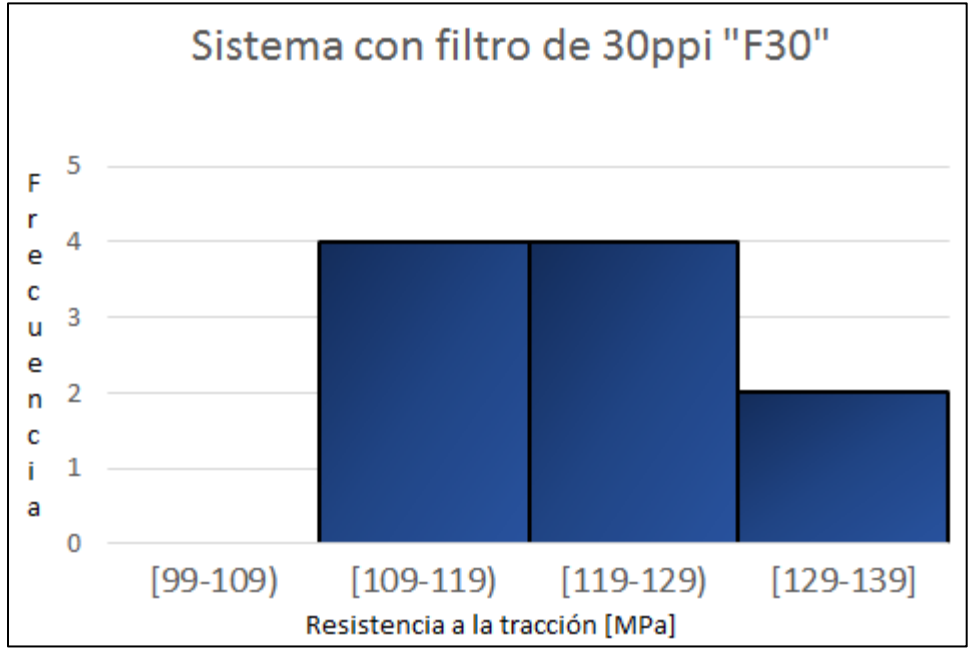


Figura 19 Histograma de frecuencia para el sistema F30.

En la Tabla 14 se presentan los datos de desviación estándar obtenidos mediante una hoja de cálculo, aplicando la Ecuación 9 “desviación estándar muestral”.

Ecuación 9
$$S = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$$

Tabla 14. Datos de tendencia central (promedio y desviación estándar), tomando en cuenta el total de datos para cada sistema en el lado izquierdo y en el lado derecho solo los datos de los ensayos en los que se determinó la velocidad.

Sistema	Población		Pruebas de velocidad	
	$\sigma_{tr} (\bar{X})$	Desviación (S)	$\sigma_{tr} (\bar{X})$	Desviación (S)
SF	117.57	4.79	118.00	8.08
F10	111.60	7.22	104.57	3.25
F20	113.11	4.49	113.24	3.46
F30	121.57	8.62	129.13	6.98

Es evidente al revisar los histogramas de las Figuras 16 a 19 que la menor distribución se dio en el sistema sin filtro Figura 16 concentrando los esfuerzos en dos clases 109 a 119 y 119 a

129 para los sistemas con filtro la distribución se dio en tres clases, el sistema con filtro de 10ppis presenta una distribución desplazada a la izquierda como se puede ver en la Figura 17 indicando menores resistencias, además presenta una alta desviación estándar, en el caso del sistema con filtro de 20ppis la mayoría de probetas están en la segunda clase de 109 a 119, en este caso se evaluaron 14 probetas de las cuales 10 pertenecen a esta clase con lo que se puede hablar de una mayor reproducibilidad en dicho sistema, incluso si se observa el esfuerzo de la probeta con mayor valor en este sistema, que presenta cercanía con la clase anterior, este hecho se confirma con ayuda de la Tabla 14 que muestra la desviación estándar por lo que este sistema presenta la menor dispersión, al analizar de la misma forma el sistema sin filtro la cercanía de los datos entre las clases no es tan estrecha y es confirmado por la desviación estándar de la Tabla 14, finalmente se observa una buena distribución en el histograma de la Figura 19 correspondiente al sistema con filtro de 30ppis sin embargo el alto valor en una probeta provoca un valor alto en la desviación estándar de la Tabla 14 sin embargo es el sistema que presento mayores valores de resistencia a la tracción.

En la Tabla 14 se presentan dos segmentos uno para la totalidad de datos y el segundo solamente toma en cuenta los valores de las pruebas de velocidad. Esto se debe al hecho de que las pruebas de velocidad fueron realizadas al final como se puede inferir de las etiquetas que indican el número de fusión, en estas pruebas la experiencia acumulada durante el trabajo experimental promovió una refinación de las técnicas de moldeo, fusión y vertido, por tal motivo se notó la diferencia en la calidad de las probetas obtenidas en estas pruebas en comparación a las fusiones iniciales.

Analizando los datos con este enfoque algunos cambios son evidentes, las menores dispersiones se presentan en los sistemas con filtro. La de menor dispersión es el sistema con filtro de 10ppi sin embargo es el sistema que presenta los menores esfuerzos 104.57 en promedio, seguido por el sistema con filtro de 20ppi con una buena dispersión cercana con el sistema de 10ppi y aumentando los esfuerzos en comparación con el sistema anterior con un promedio de 113.24, en el sistema sin filtro que sigue en orden ascendente en el promedio de los esfuerzos llegando a 118 presento la mayor dispersión de todos los sistemas, finalmente el sistema con un mayor valor promedio de resistencia a la tracción, corresponde al sistema con filtro de 30ppi alcanzando un promedio de 129.13 sin embargo hay una alta dispersión debido a un valor anómalo que afecto este valor, al comprobar los promedios de esfuerzo se

observa que la tendencia se repite en cuanto a él orden ascendente tomando en cuenta el total de datos y los datos para las muestras de velocidad.

Además de analizar los datos respecto a la resistencia y la calidad de las piezas resulta interesante, comparar las composiciones químicas de las diferentes fundiciones en busca de un efecto importante en las propiedades, de acuerdo con Mondolfo. L [17], el aumento en Mg incrementa la resistencia a la tracción.

A modo de resumen se presenta en la Tabla 15 algunos elementos de importancia que pudieran afectar la resistencia, los análisis químicos de las diferentes fusiones se pueden observar en el Apéndice C.

Tabla 15 Porcentaje en peso de elementos relevantes para la resistencia y sus respectivas σ_{tr} .

No de fusión	σ_{tr} [MPa]				% en peso			
	M1	M2	M3	M4	Si	Fe	Mn	Mg
F1	115.12	115.62	110.67	116.28	0.176	0.361	0.169	7.76
F2	113.26	116.2	112.47	111.72	0.232	0.372	0.168	8.013
F3	112.24	108.89	111.48	102.67	0.274	0.379	0.166	7.5
F4	121.92	115.24	117.43	113.54	0.26	0.377	0.171	7.511
F5	116.49	115.94	104.95	113.26	0.269	0.429	0.197	9.116
F6	120.29	117.39	125.4	120.09	0.282	0.419	0.197	9.398
F8	117.02	114.62	114.5	111.9	0.239	0.39	0.204	8.321
F9	120.96	117.4	125.38	119.32	0.307	0.404	0.203	8.916
F10	126.58	123.07	109.87	112.47	0.153	0.402	0.163	7.965
F11	106.21	105.58	99.75	106.75	0.266	0.414	0.184	7.593
F12	113.87	113.74	108.52	116.85	0.26	0.424	0.182	8.129
F13	138.56	123.43	130.25	124.28	0.352	0.418	0.178	8.296
	SF		10ppi		20ppi		30ppi	

Para el sistema SF las fusiones 4, 10, 9 y 5 ordenados ascendentemente respecto al contenido de magnesio muestran que el aumento en este elemento no es relevante en la resistencia a la tracción ya que aún las fusiones 9 y 5 con mayores contenidos de magnesio presentan valores de tensión menores a algunos de los valores de tensión de las fusiones con menor contenido de magnesio con lo que se puede afirmar que este sistema genera variabilidad en los esfuerzos de las probetas independientemente de la composición química.

Siguiendo la misma línea las fusiones 11, 8, 9 y 5 corresponden al sistema con filtro de 10ppi en este caso se aprecia incremento de la resistencia a la tracción proporcional al aumento en contenido de magnesio sin embargo en la fusión 5 con alto contenido de magnesio no presento la misma tendencia, causa de esto podría deberse al hierro, que es un elemento que si bien ayuda a elevar la resistencia en caliente altos contenidos disminuyen la ductilidad de acuerdo con la referencia [9].

En el sistema con tamaño de poro de 20ppi las fusiones 3, 1, 12 y 6 ordenadas ascendentemente en porcentaje de Mg muestran un incremento del esfuerzo correspondiente al aumento en Mg sin embargo también se muestra que hay un decremento del esfuerzo respecto al contenido de hierro.

En el sistema de 30ppis el porcentaje en magnesio no muestra relevancia en la resistencia, de la misma manera el hierro parece no tener un efecto disminuyendo la resistencia como se puede observar al comparar las fusiones 13 y 6 en las cuales la fusión 13 presenta menor cantidad de magnesio y prácticamente la misma cantidad en hierro.

Con el análisis de estas composiciones se puede establecer que una gran cantidad de hierro en la aleación es menos dañina que la presencia de los óxidos "bifilm", por otra parte un aumento en magnesio que debería aumentar la magnitud de la resistencia a la tracción se puede ver opacada nuevamente por este defecto bifilm. Hasta este punto se ha hablado de los esfuerzos y composiciones en las fusiones sin embargo para corroborar que se formó el defecto de la doble capa de óxido después de haber pasado por el filtro, a continuación se presentan experimentos en los cuales se estimó la velocidad del fluido lo que corrobora esta formación, de acuerdo con la literatura este defecto se genera durante el llenado si la velocidad supera 0.5m/s.

4.2 Muestras metalográficas

Se preparó una muestra para metalografía de cada una de las fusiones en las que se realizaron los experimentos de velocidad, con la finalidad de observar las características microestructurales respecto a la composición química, en las Figuras 20 a 23 se muestran las fotos de las metalografías de las fusiones 10 a 13 correspondientes a los diferentes sistemas.

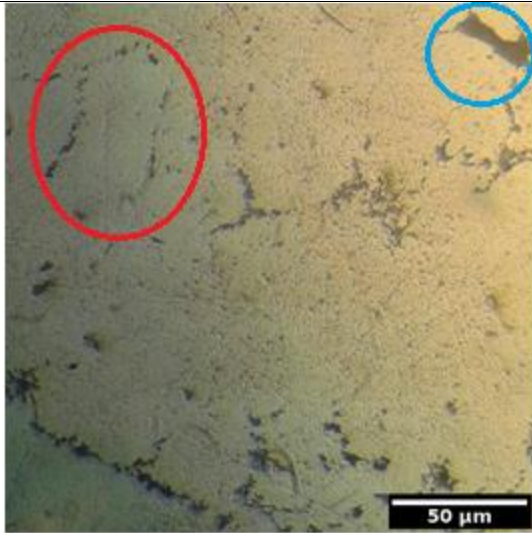


Figura 20 Metalografía para la probeta SF/F10/M3 a 200X, aleación aluminio magnesio, revelada con Keller, 7.96% Mg, 0.16% Mn, 0.40% Fe y 0.15% Si. Las especies $MgAl_3$ y Mg_2Si están indicadas en las elipses roja y azul respectivamente.

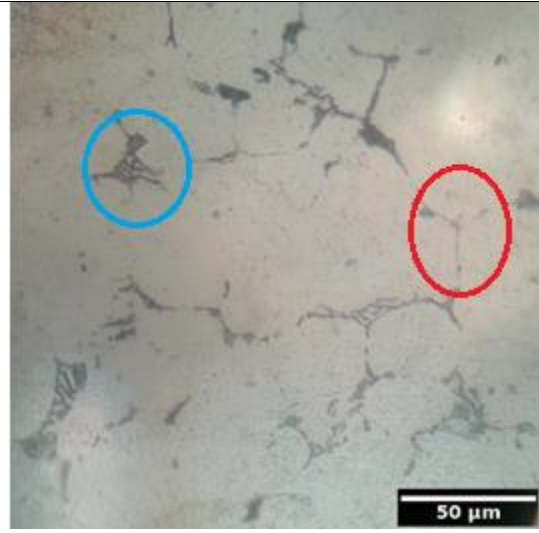


Figura 21 Metalografía para la probeta F10/F11/M2 a 200X, aleación aluminio magnesio revelada con Keller, 7.59% Mg, 0.18% Mn, 0.41% Fe y 0.27% Si. Las especies $MgAl_3$ y Mg_2Si están indicadas en las elipses roja y azul respectivamente.

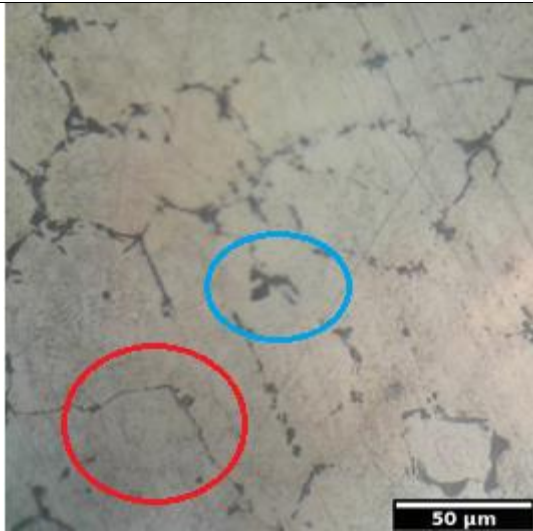


Figura 22 Muestra la metalografía para la probeta F20/F12/M4 a 200X, aleación aluminio magnesio, revelada con Keller, 8.13% Mg, 0.18% Mn, 0.42% Fe y 0.26% Si. Las especies $MgAl_3$ y Mg_2Si están indicadas en las elipses roja y azul respectivamente.

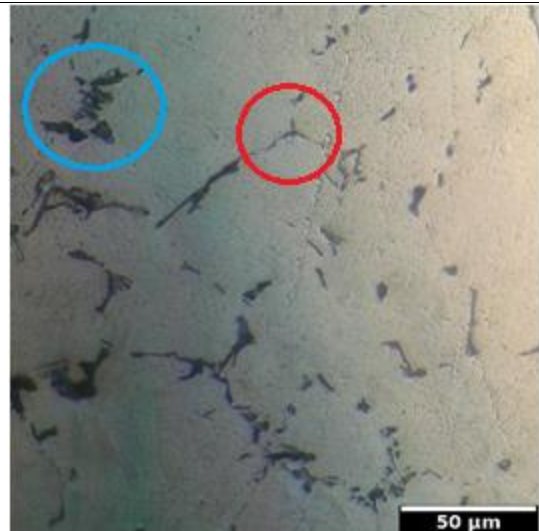


Figura 23 Muestra la metalografía para la probeta F30/F13/M1 a 200X, aleación aluminio magnesio revelada con Keller, 8.30% Mg, 0.18% Mn, 0.42% Fe y 0.35% Si. Las especies $MgAl_3$ y Mg_2Si están indicadas en las elipses roja y azul respectivamente.

Se puede ver cierta diferencia en las metalografías mayormente debido al contenido de magnesio, hierro y silicio. En esta sección se explica acerca de las estructuras presentes, de acuerdo con [16] y [17]. La aleación 520 Al-Mg que contiene 10% de Mg nominal, esta presenta en los límites de las dendritas la fase Mg_5Al_8 y partículas insolubles de hierro con aluminio $FeAl_3$, en el Anexo A se muestran las metalografías encontradas en la literatura relacionadas con la aleación 535 fabricada en este trabajo.

Al analizar la composición química junto a las imágenes se puede notar que la mayor diferencia se presenta con el silicio, la Figura 23 corresponde a una cantidad de silicio de 0.352 % que es la mayor entre estas muestras y se caracteriza por tener mayor cantidad de Mg_2Si que se observa en la Figura 23 como partes negras gruesas e irregulares en comparación a la Figura 20 que presenta la menor cantidad de Si no hay una gran cantidad de esta fase.

En la Figura 22 se observa la mayor red de la fase Mg_5Al_8 debido a una mayor cantidad de Mg y menor cantidad de Si, en todas las muestras no se observó a 200x la fase $FeAl_3$ que debería

verse como partículas negras redondeadas tanto en los espacios entre dendritas e incluso dentro de las dendritas como lo indica las Figuras 28 y 29. Como se mencionó con anterioridad la composición química afecta en menor medida a los valores de resistencia a la tracción que el daño por los defectos de la doble capa de óxido.

4.3 Experimentos de velocidad

Los experimentos de velocidad se llevaron a cabo filmando la placa de la Figura 13 b) durante el vertido de metal al molde. Con los vídeos se procedió a determinar los tiempos entre la señal de focos mediante un programa de reproducción de video (VLC), disminuyendo la velocidad de reproducción hasta 0.03X a esta velocidad era posible pausar el video y obtener valores entre intervalos de 0.03s, es decir de 0.07 pasa a 0.10 y al pausar el video se podía obtener 0.08 o 0.09 sin embargo los números en el cronómetro no se mueven de 1 en 1 en ocasiones cambian de 2 o 3 números por lo cual no se pudo determinar exactamente el tiempo en el que el foco enciende sin embargo esta variación de 1 o 2 números en el último dígito no es de relevancia en la velocidad, estos datos se pueden ver con una mayor profundidad en el Anexo C.

El tiempo entre las señales de los focos se presenta en la Tabla 16, estos experimentos se realizaron por duplicado y son referentes a las fusiones 10 a 13.

Tabla 16 Datos de tiempo entre las posiciones de los focos indicados en la Figura 12, la etiqueta indica el sistema y el número de fusión respectivamente.

Etiqueta		Tiempo entre los focos [s]									
		1 a 2	1 a 3	1 a 4	2 a 3	2 a 4	3 a 4	5 a 6	7 a 8	9 a 10	11 a 12
SF/F10	A	0.235	0.58	0.81	0.345	0.575	0.23	3.1	3	0.295	0.52
	B	0.36	0.735	0.94	0.375	0.58	0.205	2.735	2.095	0.285	0.29
	\bar{X}	0.2975	0.6575	0.875	0.36	0.5775	0.2175	2.9175	2.5475	0.29	0.405
F10/F11	A	0.185	0.385	0.56	0.2	0.375	0.175	0.81	0.705	0.425	0.33
	B	0.2	0.49	0.75	0.29	0.55	0.26	2.47	1.445	0.295	0.605
	\bar{X}	0.1925	0.4375	0.655	0.245	0.4625	0.2175	1.64	1.075	0.36	0.4675
F20/F12	A	0.215	0.475	0.68	0.26	0.465	0.205	0.875	0.54	0.34	0.51
	B	0.205	0.38	0.575	0.175	0.37	0.195	0.44	0.54	0.295	0.335
	\bar{X}	0.21	0.4275	0.6275	0.2175	0.4175	0.2	0.6575	0.54	0.3175	0.4225
F30/F13	A	0.16	0.395	0.63	0.235	0.47	0.235	0.85	0.24	0.31	0.33
	B	0.33	0.53	0.735	0.2	0.405	0.205	0.815	2.56	0.41	0.26
	\bar{X}	0.245	0.4625	0.6825	0.2175	0.4375	0.22	0.8325	1.4	0.36	0.295

De acuerdo con la tabla de tiempos y la distancia entre los focos que se pueden observar en la Figura 12 se presenta la Tabla 17.

Tabla 17 Datos de velocidad entre la señal de un foco y el siguiente en las posiciones de la Figura 12, la etiqueta indica el sistema y el número de fusión respectivamente.

		Velocidades [m/s]									
		1 a 2	1 a 3	1 a 4	2 a 3	2 a 4	3 a 4	5 a 6	7 a 8	9 a 10	11 a 12
		Corredor						Entradas		Entradas	
SF/F10	A	0.277	0.224	0.241	0.188	0.226	0.283	0.016	0.017	0.169	0.096
	B	0.181	0.177	0.207	0.173	0.224	0.317	0.018	0.024	0.175	0.172
	\bar{X}	0.229	0.201	0.224	0.181	0.225	0.300	0.017	0.020	0.172	0.134
F10/F11	A	0.351	0.338	0.348	0.325	0.347	0.371	0.062	0.071	0.118	0.152
	B	0.325	0.265	0.260	0.224	0.236	0.250	0.020	0.035	0.169	0.083
	\bar{X}	0.338	0.301	0.304	0.275	0.292	0.311	0.041	0.053	0.144	0.117
F20/F12	A	0.302	0.274	0.287	0.250	0.280	0.317	0.057	0.093	0.147	0.098
	B	0.317	0.342	0.339	0.371	0.351	0.333	0.114	0.093	0.169	0.149
	\bar{X}	0.310	0.308	0.313	0.311	0.315	0.325	0.085	0.093	0.158	0.124
F30/F13	A	0.406	0.329	0.310	0.277	0.277	0.277	0.059	0.208	0.161	0.152
	B	0.197	0.245	0.265	0.325	0.321	0.317	0.061	0.020	0.122	0.192
	\bar{X}	0.302	0.287	0.287	0.301	0.299	0.297	0.060	0.114	0.142	0.172

La velocidad calculada para el sistema sin filtro es 2.43m/s, tanto en la bajada como en el corredor inmediato a la bajada, 1.21m/s en el corredor inmediato a las entradas, la velocidad en las entradas es de 0.705m/s, los cálculos se pueden ver en el Apéndice B.

Como se puede ver en la Tabla 17 la velocidad real de los sistemas es mucho menor a la velocidad estimada mediante los cálculos presentados en el Apéndice B, sin embargo la velocidad de la bajada debe ser similar a la calculada debido a que no hay interferencia por fricción o disminución de la energía cinética por impacto, hasta el momento de contacto con el colchón en donde se forman más defectos de doble capa de óxido, de acuerdo a las velocidades presentadas en la Tabla 17 en las secciones siguientes no debería haber creación de estos defectos, siendo estas velocidades menores a la velocidad crítica de 0.5m/s.

En la Tabla 18 se presentan las velocidades promedio del corredor posterior al filtro en orden ascendente para los diferentes sistemas, además las velocidades promedio de los dos pares de entradas, que muestran valores diferentes para cada par indicando que el fluido paso hasta las entradas alejadas con una mayor velocidad, posteriormente al llenar totalmente el corredor el flujo de metal paso por las entradas cercanas con una menor velocidad en el flujo, de acuerdo con el sistema presurizado la disminución del área permite una contrapresión que impide el flujo hasta que el corredor se llena completamente, en ese caso el metal fluye a una velocidad similar en todas las entradas no así en el caso del sistema no presurizado en donde el metal fluye inmediatamente al encontrar la última entrada, posteriormente fluye en las entradas anteriores.

Tabla 18 Velocidades promedio de las secciones evaluadas, indicadas en la Figura 12.

Sistema	Velocidad promedio en el corredor [m/s]	Velocidad promedio en las entradas cercanas [m/s]	Velocidad promedio en las entradas alejadas [m/s]
SF	0.227	0.019	0.153
F30	0.296	-----	0.157
F10	0.304	0.047	0.131
F20	0.314	0.089	0.141

Al ver la tabla 18 se observa un aspecto de gran relevancia, la menor velocidad obtenida por el sistema sin filtro (SF) aun cuando se incorporaron los filtros que deberían haber reducido la velocidad por debajo del sistema sin filtro.

Dejando de lado el sistema SF y F30 se esperaría que el sistema F20 redujera en mayor medida la velocidad sin embargo no ocurrió, esto se debe a una competencia entre el espesor del filtro y el tamaño de poro, mientras que en el sistema F20 se emplearon filtros de 20ppi con un espesor de 15 mm, en el sistema F10 se emplearon filtros de 10ppi con espesores de 20mm en ese sentido el espesor resulto más importante que el tamaño del poro.

Sin embargo si trasladamos este análisis con los valores de esfuerzo podemos ver que aunque el sistema con filtro F10 tiene menor velocidad que el sistema F20, los esfuerzos obtenidos por F10 son menores que los de F20 por tanto podemos asegurar que el filtro de 20ppi realizo una mejor limpieza que el filtro de 10ppi por el tamaño de los poros.

Es muy importante definir porque los sistemas con filtro no disminuyeron la velocidad obtenida por el sistema SF, aun cuando los sistemas fueron simétricamente similares. Este efecto se debe a una contracción en una parte de la cavidad en donde se coloca el filtro, la Figura 24 muestra la dirección de flujo en la cavidad.

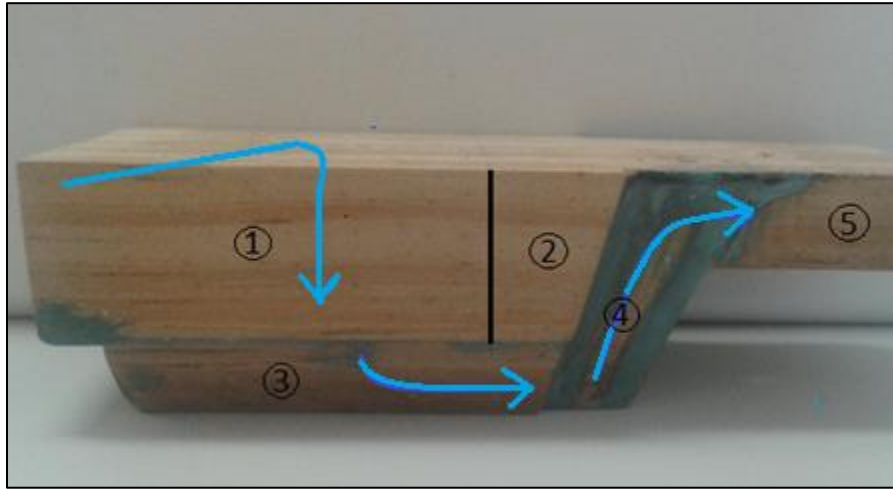


Figura 24 Flujo del metal en la cavidad del filtro: zona 1 filtro, zona 2 corazón evitando el paso del metal sin filtrar al corredor, zona 3 cavidad con altura de 10mm, zona 4 cavidad conectora entre la cámara del filtro y el corredor, zona 5 medio corredor correspondiente a la base.

Hay dos posibles contracciones de área que pudieron acelerar la velocidad del fluido después del paso por el filtro, por una parte la zona 3 de la Figura 24 inmediata al paso por el filtro por otra la zona 4 ascendente, que conecta al corredor con la cavidad del filtro.

El área de la sección transversal a la flecha horizontal de la zona 3 de la Figura 24 tiene un área de 3.7cm^2 de acuerdo con la velocidad real en el corredor para F30 y aplicando la ecuación de continuidad, en esta sección hay una velocidad de 0.690m/s y en la sección transversal a la flecha ascendente de la zona 4 en la Figura 24 en la parte más estrecha tiene un área de 3.72cm^2 , en la sección con área de 3.7cm^2 las velocidades para los otros sistemas son 0.709 y 0.732m/s para F10 y F20 respectivamente.

Con las velocidades calculadas se determinó que los sistemas con filtro aceleraron la velocidad después de haber pasado por el filtro con lo que aun si los filtros lograron remover algunos de estos defectos, al pasar por la sección con área de 3.7cm^2 se generaron nuevos defectos eliminando toda acción de limpieza y reducción de los defectos, sin embargo al analizar los datos de esfuerzos se puede notar que hay diferencias entre los sistemas F10 y F20 con el sistema F30 en este caso se logró limpiar una gran cantidad de estos defectos y la caída en propiedades puede deberse solamente a la creación de los nuevos defectos.

En el caso de F10 y F20 la limpieza no fue adecuada seguramente gran cantidad de defectos lograron pasar a través del filtro en este caso se apoya la idea de mayor retención en F20 reflejado en los esfuerzos, por tanto el mayor problema se debió al paso de los defectos a través del filtro que se generaron durante la bajada y el primer impacto con el molde, por tal motivo y a pesar de que todos los sistemas con filtro tienden a generar nuevos defectos el sistema F30 tiene una gran capacidad para la retención de los defectos siendo el mejor sistema con base a las pruebas realizadas, el efecto de la aceleración posterior no parece afectar en gran medida sin embargo, no es posible establecer dicho efecto debido a falta de un blanco con mejores condiciones sin embargo fue el sistema que presento los mayores valores de resistencia a la tracción de todos los sistemas.

Capítulo V

Conclusiones

El diseño de la cavidad del filtro no fue adecuado para la implementación de los filtros de 10 y 20ppi, ya que no fueron capaces de retirar los defectos generados en la bajada, sin embargo en el sistema con filtros de 30ppi la limpieza fue aceptable y el efecto de la aceleración fue mínimo, generando las mayores resistencias a la tracción.

En las pruebas de velocidad en donde las técnicas de moldeo, vertido y fusión estaban perfeccionadas la mayor dispersión en los datos de resistencia se presenta en el sistema sin filtro, esta dispersión disminuye al implementar los filtros.

Las menores dispersiones en los datos de resistencia para los experimentos de velocidad se dieron con los sistemas F10 y F20 sin embargo sus valores de esfuerzo estuvieron por debajo de la media del sistema sin filtro.

El sistema F30 presentó una alta dispersión de los datos de resistencia a la tracción pero menor a la del sistema sin filtro, el sistema F30 presenta mayores valores de resistencia, el sistema SF presenta valores que caen dentro de los valores del sistema F30, sin embargo el sistema SF también presenta valores por debajo de las resistencias del sistema F30 y que son cercanos a la media del sistema F20.

La implementación de los filtros de espuma cerámica de 30ppi fueron adecuados para la fabricación de una aleación con susceptibilidad a la oxidación, por tanto es posible incrementar la resistencia y reducir su dispersión al eliminar los defectos de la doble capa de óxido generados mayormente durante el vertido.

Bibliografía

- [1] Hashemi, H., & Raiszadeh, R. (2009). *Naturally-Pressurized Running Systems: the role of ceramic filters*. Journal of applied Sciences, 9(11), 2115-2122.
- [2] Hsu, F. Y., Li, C. L., & Campbell, J. (2014). *Ceramic Foam Filters in Runner System Design for Castings*. In *Key Engineering Materials* (Vol. 573, pp. 19-29). Trans Tech Publications.
- [3] Hsu, F. Y., & Lin, H. J. (2011). *Foam filters used in gravity casting*. Metallurgical and Materials Transactions B, 42(6), 1110-1117.
- [4] Ardekhani, A., & Raiszadeh, R. (2012). *Removal of double oxide film defects by ceramic foam filters*. Journal of materials engineering and performance, 21(7), 1352-1362.
- [5] Kaufman, J. G., & Elwin, L. (2004). *Rooy. Aluminum alloy castings: properties, processes and applications*, ASM international.
- [6] ASM International. Handbook Committee (Ed.). (1990). *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials* (Vol. 2). Asm Intl.
- [7] Howard, F., Merton. C y John. W. (1961). *Fundición para Ingenieros*. (1ra. ed en Español). México: Contineltal, S. A.
- [8] ASM International. Handbook Committee (Ed.). (1998). *Castings* (Vol. 15). Asm Intl.
- [9] Sahoo, M., & Sahu, S. (2014). *Principles of Metal Casting*. (3ra. ed) United States of America: McGraw Hill Professional.
- [10] Vázquez, M. (1992). *Procesos de fundición: antología de recopilación*. (1ra. ed) México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- [11] Beeley, P. (2001). *Foundry technology*. (2da. Ed) Butterworth Heinemann.
- [12] GIPRO AG. *Filtro de fundición cerámico*. Consultado el 12 abril de 2019, http://gipro.ch/seiten/esp/prod_02_esp.html

[13] Campbell, J. (2011). *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. (1ra. ed) United Kingdom: Butterworth-Heinemann.

[14] ASTM. (2003). *B 26/B26M-03 Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings*.

[15] Gonzáles. A. (2018). *Fabricación de ejes de patineta profesionales en aleación A356.0 mediante la técnica de moldeo en verde. Tesis de licenciatura*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de química.

[16] ASM International. Handbook Committee (Ed.). (1998). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). Asm Intl.

[17] Mondolfo, L. (1976). *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. London-Boston: Butter Worths & Co Ltd.

Anexo A

Sistema Al-Mg

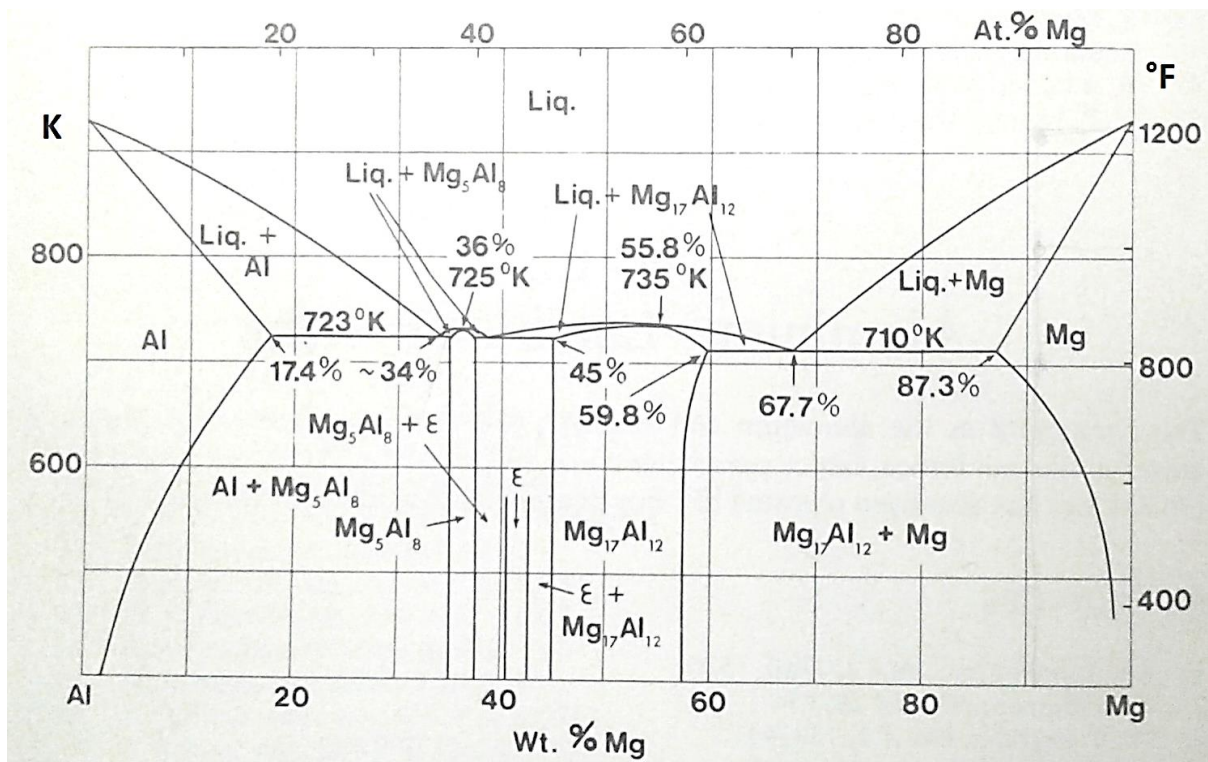


Figura 25. Diagrama de fases del sistema Al-Mg. Mondolfo. L [17]

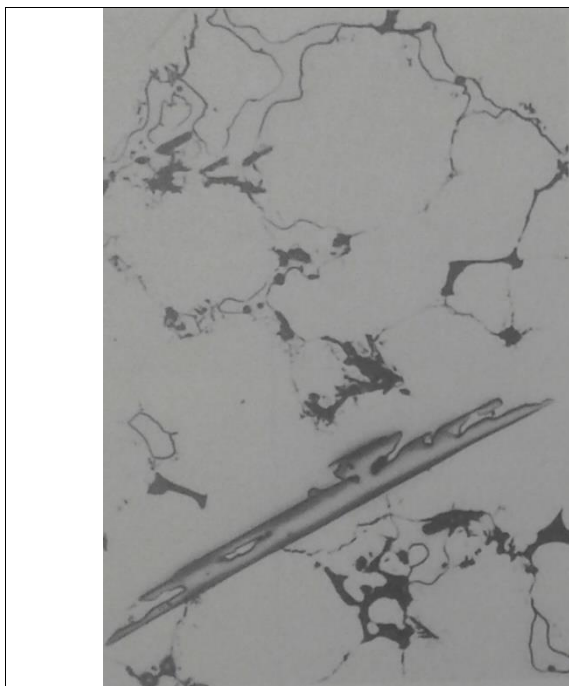


Figura 26. Aleación con 10% Mg, 0.3% Si, 0.6 Fe en molde de arena a 250X. Cristales largos de FeAl₃, segregación de Mg₂Si en negro y porosidad en los límites de grano.

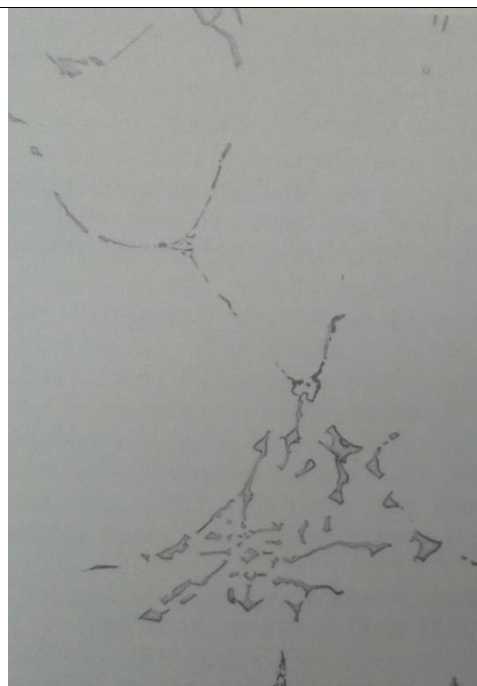


Figura 27. Aleación con 1% Mg, 1.2% Mn, 0.5% Fe, 0.7% Si lingote a 250X. Mg₂Si en negro y en gris claro (FeMn)₃Si₂Al₁₅.

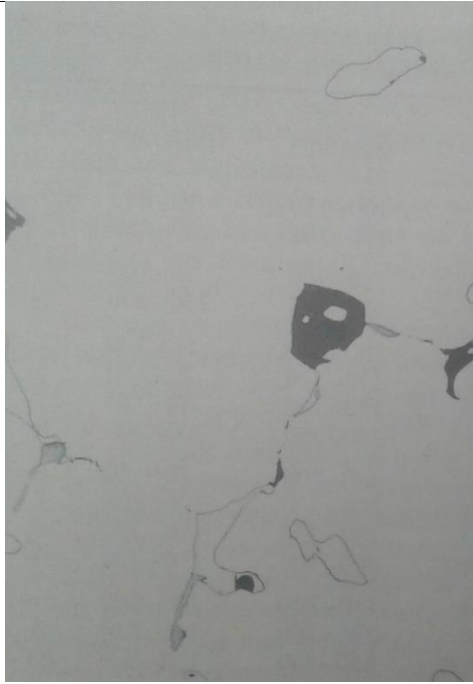


Figura 28. Aleación con 10% Mg, 0.3% Si, 0.3% Fe en molde de arena a 250X. Mg₂Si en negro, FeAl₃ y Mg₅Al₈ en gris y gris claro respectivamente.



Figura 29. Aleación con 7% Mg, 1.5% Si, 0.2% Mn, 0.3% Fe en molde de arena a 250X. Mg₂Si en negro, FeAl₃ y Mg₅Al₈ en gris oscuro y gris claro respectivamente.

Las Figuras 26 a 29 correspondientes a metalografías de aleaciones aluminio-magnesio con diferentes rangos de composición química, fueron extraídas de Mondolfo. L. [17]

Anexo B

Cálculos del diseño de colada

Piezas del diseño de colada

Tabla 19. Características de las piezas del diseño de colada.

Piezas	Dimensiones
Bajada	Altura 30cm, diámetro superior 4.35cm, diámetro inferior 2.35cm y Área 4.325cm ² .
Alimentador	Compuesto por dos conos truncados, en la tapa altura de 6.5cm, diámetro superior 3cm y diámetro inferior 4cm en el base altura de 1.5cm, diámetro superior de 4cm y diámetro inferior de 3.2cm.
Colchón	Cono truncado en la parte de la base, diámetro mayor 6cm, diámetro menor 4.5cm y altura 5.4cm.
Corredor anterior al filtro	Corredor con forma de trapecio en la parte de la tapa, base mayor 3.9cm, base menor 2.53cm, altura de 1.345cm y área de 4.324cm ² .
Corredor posterior al filtro.	Compuesto por dos corredores con forma de trapecio uno en la tapa y uno en la base con área total de 8.648cm ²
Entradas	Cuatro entradas con forma de trapecio, base mayor 3.52cm, base menor 2cm, altura 1.345cm y área total de 14.85cm ²

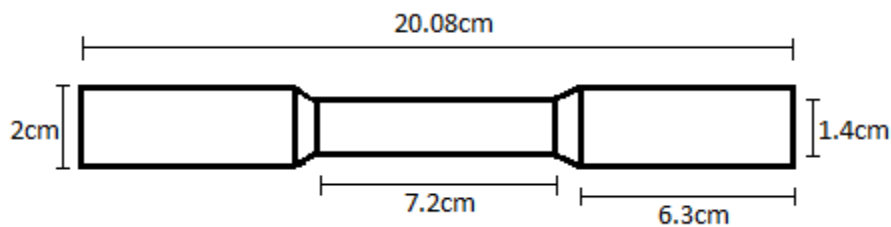


Figura 30. Presenta las dimensiones de la probeta en la placa modelo, los extremos son sujetados por las mordazas y la sección central recibe el esfuerzo de la prueba de tensión.

Cálculo teórico para la velocidad desarrollada por el fluido a lo largo del sistema de colada

De la Ecuación 4, si la velocidad inicial es 0, la presión atmosférica es la misma tanto en la parte superior de la bajada como en la parte inferior y tomando h_2 como 0, entonces tenemos una dependencia solamente por la altura y la gravedad por tanto la Ecuación 4 pasa a ser:

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}.$$

Velocidad en la bajada.

$v = \sqrt{2(9.81m/s^2)(0.3m)} = 2.426m/s$. La velocidad en la bajada es la misma que la del corredor anterior al filtro que posee área similar a la bajada.

Velocidad en el corredor posterior al filtro.

Con la Ecuación 3 se puede calcular la velocidad en las siguientes secciones del sistema conociendo el área trasversal al flujo.

$A_1 v_1 = A_2 v_2$ por tanto al despejar tenemos $v_2 = A_1 v_1 / A_2$

$v = (4.324cm^2 \times 2.426m/s) / (8.648cm^2) = 1.213m/s$

Velocidad en las entradas

$v = (4.324cm^2 \times 2.426m/s) / (14.85cm^2) = 0.706m/s$

Los cálculos realizados no consideran las pérdidas por fricción y para tal cálculo se considera el diseño (SF), por lo que se esperaría que los sistemas con filtro presentaran menor velocidad tal como se muestra en el Capítulo IV.

Comprobación de los alimentadores

Los alimentadores incorporados al sistema de colada ayudan a disminuir los rechupes por contracción durante la transformación líquido-sólido, son capaces de proveer metal líquido conforme se presenta la contracción en los módulos con menor disipación del calor en la pieza moldeada.

Para el cálculo de un alimentador se considera su volumen y el área de transferencia con el medio de moldeo, así como el propio medio de molde en este caso el alimentador y la pieza están en contacto con el mismo medio de moldeo por lo tanto se puede emplear la Ecuación

10 “Método de Chvorinov”, basado en los módulos de solidificación que es la relación entre volumen total y área de transferencia con el medio de moldeo, la ecuación simplificada resultante es:

Ecuación 10 $M_{Sa} = 1.12 M_{Sp}$

Módulo de solidificación del cilindro para las mordazas.

$$M_{Sp1} = \frac{\pi r^2 h}{2\pi r h + \pi r^2} = \frac{3.1416(1cm)^2(6.3cm)}{2(3.1416)(1cm)(6.3cm) + 3.1416(1cm)^2} = 0.4632cm.$$

Módulo de solidificación cilindro de prueba.

$$M_{Sp2} = \frac{\pi r^2 h}{2\pi r h} = \frac{(3.1416)(0.7cm)^2(7.2cm)}{2(3.1416)(0.7cm)(7.2cm)} = 0.35cm$$

$M_{Sp1} > M_{Sp2}$ Recordando que la pieza con mayor módulo de solidificación, solidifica al final por lo que debe ser la pieza a la cual colocarle un alimentador.

Empleando la Ecuación 10 podemos determinar el módulo de solidificación mínimo para obtener una pieza sana de acuerdo con la técnica de los módulos de solidificación de Chvorinov.

$$M_{Sa} = 1.12 (M_{Sp1}) = 1.12 (0.4632cm) = 0.5188cm$$

Ahora se comprueba el módulo de solidificación del alimentador, recordando que consiste de dos conos truncados, uno arriba y uno debajo de la línea de partición.

Ecuación 11 $V = \frac{\pi(R^2+r^2+Rr)h}{3}$

Ecuación 12 $A = \pi R^2 + \pi r^2 + \pi g(R+r)$

Volumen del alimentador

$$V = \frac{3.1416((2\text{cm})^2 + (1.5\text{cm})^2 + (2\text{cm} \times 1.5\text{cm}))6.5\text{cm}}{3} + \frac{3.1416((2\text{cm})^2 + (1.6\text{cm})^2 + (2\text{cm} \times 1.6\text{cm}))1.5\text{cm}}{3} = 78.294\text{cm}^3$$

Área del alimentador

$$A = (3.1416)(1.5\text{cm})^2 + (3.1416)(1.6\text{cm})^2 + 3.1416(6.52\text{cm})(2\text{cm} + 1.5\text{cm}) + 3.1416(1.55\text{cm})(2\text{cm} + 1.6\text{cm}) = 104.36\text{cm}^2$$

Módulo de solidificación del alimentador

$$M_{Sr} = \frac{78.294\text{cm}^3}{104.360\text{cm}^2} = 0.75\text{cm} \text{ que es mayor al módulo de solidificación obtenido por el método de}$$

Chvorinov.

Anexo C

Datos de las fusiones

Análisis químicos.

Las tablas 20 a 32 muestran la composición química final de las diferentes fusiones.

Tabla 20. Composición química, fusión 1.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.172	0.354	0.041	0.168	7.735	0.0063	0.0022	0.029	0.019	0.0023
0.178	0.362	0.040	0.169	7.770	0.0062	0.0023	0.029	0.017	0.0023
0.179	0.368	0.040	0.170	7.774	0.0063	0.0023	0.029	0.017	0.0023

Tabla 21. Composición química, fusión 2.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.239	0.385	0.042	0.168	8.054	0.0064	0.0022	0.028	0.017	0.0023
0.230	0.365	0.043	0.168	8.017	0.0064	0.0024	0.029	0.017	0.0023
0.227	0.367	0.042	0.168	7.967	0.0062	0.0021	0.029	0.017	0.0025

Tabla 22. Composición química, fusión 3.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.261	0.365	0.044	0.164	7.244	0.0066	0.0030	0.029	0.018	0.0034
0.270	0.387	0.045	0.170	7.520	0.0064	0.0018	0.033	0.019	0.0040
0.291	0.385	0.046	0.163	7.738	0.0062	0.0014	0.032	0.018	0.0034

Tabla 23. Composición química, fusión 4.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.261	0.377	0.041	0.171	7.511	0.0065	0.0023	0.028	0.018	0.0022
0.258	0.374	0.041	0.170	7.533	0.0063	0.0021	0.028	0.018	0.0022
0.260	0.377	0.041	0.171	7.488	0.0064	0.0020	0.028	0.018	0.0022

Tabla 24. Composición química, fusión 5.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.270	0.432	0.052	0.198	9.080	0.0056	0.0015	0.032	0.020	0.0027
0.270	0.430	0.050	0.197	9.165	0.0056	0.0020	0.031	0.020	0.0026
0.266	0.426	0.049	0.197	9.104	0.0054	0.0016	0.032	0.020	0.0027

Tabla 25. Composición química, fusión 6.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.282	0.413	0.045	0.197	9.121	0.0060	0.0020	0.034	0.021	0.0040
0.282	0.422	0.045	0.198	9.656	0.0058	0.0016	0.031	0.020	0.0029
0.284	0.422	0.044	0.197	9.418	0.0060	0.0019	0.031	0.020	0.0032

Tabla 26. Composición química, fusión 8.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.230	0.379	0.038	0.206	8.006	0.0060	0.0012	0.031	0.021	0.0022
0.247	0.399	0.043	0.203	8.545	0.0063	0.0020	0.032	0.021	0.0025
0.241	0.393	0.041	0.204	8.412	0.0059	0.0016	0.032	0.021	0.0024

Tabla 27. Composición química, fusión 9.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.306	0.401	0.042	0.201	8.840	0.0061	0.0019	0.032	0.021	0.0026
0.307	0.407	0.042	0.203	8.965	0.0059	0.0020	0.032	0.021	0.0027
0.308	0.403	0.043	0.204	8.943	0.0060	0.0021	0.034	0.021	0.0027

Tabla 28. Composición química, fusión 10.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.157	0.421	0.028	0.165	8.207	0.0052	0.0022	0.025	0.011	0.0026
0.151	0.385	0.025	0.163	7.774	0.0052	0.0015	0.023	0.012	0.0023
0.150	0.401	0.027	0.162	7.915	0.0053	0.0017	0.027	0.013	0.0035

Tabla 29. Composición química, fusión 11.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.273	0.422	0.036	0.183	7.699	0.0055	0.0020	0.028	0.016	0.0024
0.273	0.427	0.036	0.184	7.701	0.0054	0.0019	0.028	0.016	0.0024
0.253	0.393	0.032	0.185	7.379	0.0054	0.0019	0.026	0.015	0.0023

Tabla 30. Composición química, fusión 12.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.259	0.422	0.034	0.183	8.106	0.0055	0.0021	0.027	0.015	0.0024
0.261	0.425	0.034	0.181	8.157	0.0056	0.0022	0.027	0.015	0.0026
0.259	0.424	0.034	0.181	8.124	0.0055	0.0021	0.027	0.015	0.0026

Tabla 31. Composición química, fusión 13.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.355	0.426	0.088	0.177	8.319	0.0055	0.0021	0.026	0.014	0.0027
0.349	0.423	0.089	0.177	8.376	0.0056	0.0021	0.027	0.015	0.0026
0.351	0.406	0.080	0.179	8.194	0.0055	0.0018	0.026	0.015	0.0026

Tabla 32. Composición química de lingotes obtenidos de una fusión de latas de aluminio.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Ti	V	Co	Sr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.235	0.545	0.149	0.808	0.781	0.063	0.008	0.018	0.005	0.016	0.009	0.002	0.0002

Registro de las señales.

Los videos que heran capturados se corrieron en el programa “VLC” con velocidad de 0.3X, al correr el video se anotaba el tiempo en el que se encndia el led, esto se repitio varias veces para disminuir el rango en el tiempo entre la señal de la luz y el momento anterior a el destello.

Tabla 33. Ejemplo de la obtención de los tiempos entre las señales de los focos led.

30ppi	tiempo					t estimado
Foco	1	2	3	4	5	
1	2.18.34	2.18.31	2.18.28			2.18.31
2	2.18.50	2.18.48				2.18.50
3	2.18.66	2.18.59	2.18.68	2.18.62	2.18.65	2.18.65
4	2.18.86	2.18.81	2.18.85			2.18.85
5	2.18.66	2.18.65	2.18.62	2.18.57		2.18.62
6	2.19.09	2.19.01	2.18.96	2.18.98		2.19.01
7	2.18.81	2.18.76	2.18.75			2.18.76
8	2.20.62	2.20.54	2.20.60	2.20.58		2.20.58
9	2.19.24	2.19.19	2.19.12	2.19.15		2.19.15
10	2.19.45	2.19.35	2.19.42	2.19.38		2.19.42
11	2.19.01	2.18.85	2.18.94	2.18.96		2.18.96
12	2.19.42	2.19.35	2.19.29	2.19.32		2.19.32
	Encendido		Apagado			

En ocasiones la caratula en el cronómetro cambia en 4 unidades y en otras 2 o 3 por lo que en la mayoria de los casos no se logro determinar el tiempo exacto, en la resolución permitida por el instrumento, sin embargo estas diferencias no afectaron los experimentos al realizar las conversiones de unidades a m/s.