

22 de mayo de 2025

**ING. AHTZYRI DAMAYANTI DELGADO GUTIÉRREZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 22 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Estudio de factibilidad del uso de la escoria de horno de arco eléctrico como material de moldeo autofraguante en la producción de piezas de aluminio"

Introducción.

1. Procesos de moldeo con sistemas autofraguantes.
 2. Escorias de horno de arco eléctrico.
 3. Metodología para evaluar el moldeo autofraguante con escorias de horno de arco eléctrico.
 4. Resultados y discusión.
- Conclusiones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*bvlg

Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia
Teléfono: 011 221 23 10 10
Correo electrónico: mramos@uaslp.mx
Teléfono: 011 221 23 10 10
Fax: 011 221 23 10 10

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“ Estudio de factabilidad del uso de la escoria de horno de arco eléctrico como material de moldeo autofraguante en la producción de piezas de aluminio”

se realizó en el periodo enero de 2024 a agosto de 2025 bajo la dirección del Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Ahtzyri Damayanti Delgado Gutiérrez



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA VIRTUAL
Zona Universitaria s/n C.P. 78190 Tel. 834 25 42 Fax 828-23-06
San Luis Potosí, S.L.P. México



El que suscribe Ahtzyri Damayanti Delgado Gutiérrez,
con domicilio en Josefa Ortiz de Domínguez #139
Colonia / fraccionamiento "El Terremoto"
C.P. 78143 Tel. 4442875496 Ciudad San Luis Potosí
y en mi carácter de autor y titular de la tesis que
lleva como nombre: "Estudio de factibilidad del uso de la escoria de horno de arco eléctrico como material de moldeo
autofraguante en la producción de piezas de aluminio", en lo sucesivo "LA OBRA" y por
ende, cedo y autorizo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para que
lleve a cabo la divulgación, publicación, reproducción, así como la digitalización
de la obra, en formato electrónico y sin fines de lucro.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se compromete a respetar
en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente.

San Luis Potosí, S.L.P., a 22 de Agosto de 200 25.

Atentamente,

Ahtzyri Damayanti Delgado Gtz.
FIRMA
AUTOR



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Estudio de factibilidad del uso de la escoria de horno de
arco eléctrico como material de moldeo autofraguante en la
producción de piezas de aluminio”**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

Ing. Ahtzyri Damayanti Delgado Gutiérrez

Asesor:

Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia

San Luis Potosí, S. L. P.

Agosto de 2025



DEDICATORIAS.

A Dios, por la vida, la perseverancia y la fortaleza que me sostienen en esta etapa de mi desarrollo profesional.

A mis padres, Rogelio y Leonor, por brindarme su mayor apoyo, ser la base de todo lo que soy y logro en la vida.

A mis hermanas, Itzel y Mezly, por acompañarme a su manera en este camino.

A mi tía Pavis, a mi amiga Valeria y mi ahijado Chuyito, por los momentos compartidos y su cariño.

A mis abuelos, Francisco y Marcelina, por siempre darme la bendición de Dios.

A la memoria de mis abuelos, Juan y Casimira, cuyos valores siguen presentes en mi vida.

A mi novio Adrián, por su apoyo, amor y compañía lo cual ha sido una motivación en este camino.

A mis amigas, Andrea y Denisse, por siempre confiar en mí, por su amistad y momentos de alegría.

AGRADECIMIENTOS.

A SECIHTI, por otorgarme la beca para el financiamiento de mis estudios y desarrollo de este trabajo de investigación, con numero de CVU: 1317687.

A mi asesor, Dr. Mitsuo Ramos Azpeitia, por la confianza que depositó en mí para realizar no solo este trabajo, sino también otros proyectos que fortalecieron mi desarrollo profesional y personal. Le agradezco sinceramente su apoyo constante, su paciencia y todos los consejos que me brindó, los cuales fueron clave para mi crecimiento durante esta etapa.

A mis sinodales: Dra. Esperanza Elizabeth Martinez Flores, Dr. José de Jesús Cruz Rivera y Dr. José Luis Hernández Rivera, por cada uno de sus valiosos comentarios y aportes durante la revisión de este trabajo.

A la Mtra. Nora Edith Cerón Arenas, por compartirme su conocimiento, consejos y valiosa experiencia, que contribuyeron al desarrollo de este trabajo y a mi aprendizaje.

Al Ing. Juan Gutiérrez, por el apoyo en la fusión y vaciado del material para este trabajo.

A Diego Almaguer, por el apoyo en el maquinado de probetas.

A Eliuth Espericueta Flores, por el apoyo en la realización de pruebas de tensión y por su amistad. Junto con las ocurrencias de Atzin Irineo y Héctor Esparza, hicieron más llevadero el proceso de tesis.

A mis compañeros de maestría: Salvador, Israel y Frida, por todo su apoyo durante el primer año de maestría, les deseo éxito siempre.

Al Centro de Capacitación en Ingeniería de Materiales (CCIM) por prestarme el uso de sus instalaciones y equipos para el desarrollo de este trabajo.

A la empresa ASK Chemicals por la donación del sistema autofraguante y arena de sílice, para el desarrollo experimental.

A las secretarias del Instituto de Metalurgia, Nalleli Madai Martinez Sánchez y María Juana Catalina Guadalupe Moya Zertuche, por el apoyo en formatos y orden de mi expediente. Agradezco también por cada una de sus palabras de aliento.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

EAFS	Escoria de horno de arco eléctrico (por sus siglas en inglés)
EHAE	Escoria de Horno de Arco Eléctrico
PUN	Fenólico uretano sin hornear (por sus siglas en inglés)
GFN	Numero de finura de grano (por sus siglas en inglés)
WFS	Arena de fundición desechada (por sus siglas en inglés)
PUCB	Fenólico uretano de caja fría (por sus siglas en inglés)
PECB	Ester fenólico de caja fría (por sus siglas en inglés)
MDI	Metilen difenil diisocianato
BT	Vida útil de banco
ST	Tiempo de desmoldeo
COV	Compuestos Orgánicos Ambientales
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
LOI	Perdidas por ignición (por sus siglas en inglés)
T_s	Temperatura del molde en la superficie
T_M	Temperatura de fusión
T_0	Temperatura inicial
α	Difusividad térmica
k	Coefficiente de transferencia de calor
C_p	Calor específico
ρ	Densidad
H_f	Calor latente
M	Espesor solidificado

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la factibilidad de utilizar escoria de horno de arco eléctrico (EHAE) como sustituto parcial de la arena de sílice en mezclas de moldeo autofraguante con resina fenólica-uretano, destinadas a la producción de piezas de aluminio. El estudio se desarrolló mediante un diseño de experimentos factorial 3^3 , en el que se consideraron tres factores principales: porcentaje de escoria (10%, 30% y 50%), granulometría (AFS 60, 90 y 120) y contenido de resina (6.5%, 7.0% y 7.5%).

Las mezclas preparadas se caracterizaron a través de ensayos de refractabilidad, resistencia a la compresión, permeabilidad y estabilidad. Posteriormente se fabricaron moldes para el vaciado de piezas de aluminio, sobre las cuales se realizaron inspecciones visuales y con líquidos penetrantes, así como pruebas de microdureza, ensayos de tensión y análisis microestructurales. Los datos obtenidos se procesaron estadísticamente mediante el software MINITAB, lo que permitió identificar los efectos principales y de interacción entre las variables estudiadas.

Los resultados demostraron que la incorporación de EHAE en las mezclas de moldeo permite obtener propiedades mecánicas y térmicas comparables con las obtenidas utilizando arena de sílice convencional. Asimismo, se observó que el uso de la escoria contribuye a mejorar la refractabilidad de los moldes y a refinar la microestructura de las piezas, generando condiciones favorables para alcanzar mejores propiedades mecánicas. Esta alternativa representa una opción técnica viable y sostenible para la industria de fundición, ya que aprovecha un residuo industrial, disminuye la disposición en vertederos, reduce el consumo de recursos naturales y favorece procesos más competitivos y respetuosos con el medio ambiente.

ABSTRACT

This work evaluated the feasibility of using electric arc furnace slag (EAFS) as a partial replacement for silica sand in self-setting molding mixtures with phenolic-urethane resin, intended to produce aluminum castings. The study was carried out through a 3^3 factorial experimental design considering three main factors: slag content (10%, 30%, and 50%), grain size (AFS 60, 90, and 120), and resin content (6.5%, 7.0%, and 7.5%).

The prepared mixtures were characterized through refractoriness, compression strength, permeability, and stability tests. Subsequently, molds were fabricated for aluminum casting, and the resulting parts were evaluated by means of visual inspection, liquid penetrant testing, microhardness measurements, tensile testing, and microstructural analysis. The experimental data were statistically analyzed using MINITAB software, allowing the identification of main effects and interactions among the studied factors.

The results demonstrated that incorporating EAFS into molding mixtures provides mechanical and thermal properties comparable to those obtained with conventional silica sand. Moreover, the use of slag improved mold refractoriness and refined the microstructure of cast parts, thus favoring the development of enhanced mechanical properties. This approach represents a technically viable and sustainable alternative for the foundry industry, contributing to waste valorization and environmentally responsible manufacturing processes.

ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1	2
Procesos de moldeo con sistemas autofraguantes.....	2
1.1 Introducción.	2
1.2 Generalidades del proceso de moldeo con arena.....	2
1.2.1 Arena de zirconio ($ZrSiO_4$)	5
1.2.2 Arena de cromita ($FeCr_2O_4$)	5
1.2.3 Arena de olivino (Mg_2SiO_4).....	5
1.2.4 Arena de sílice (SiO_2).....	5
1.3 Transferencia de calor en moldes	7
1.4 Sistemas de moldeo	10
1.4.1 Moldeo en arena con aglutinantes químicos.	11
1.4.2 Moldeo en arena con aglutinantes naturales.	12
1.4.3 Moldeo en arena sin aglutinantes.	13
1.5 Sistema fenólico uretano (PUN).....	13
1.5.1 Ventajas y desventajas del uso del moldeo con el sistema fenólico uretano.....	15
Capítulo 2	18
Escorias de horno de arco eléctrico.....	18
2.1 Introducción.	18
2.2 Características de las escorias de horno de arco eléctrico.	18
2.2.1 Procesamiento de las escorias de horno de arco eléctrico.....	19
2.2.2 Composición y propiedades de las escorias de horno de arco eléctrico.....	20
2.3 Aplicaciones de las escorias de horno de arco eléctrico.....	21
2.3.1 Recuperación de residuos de acero.	22
2.3.2 Agregado para la industria de la construcción.	22
2.3.3 Filtro para tratamiento de aguas residuales.....	22

2.3.4 Aplicación en la agricultura.....	23
2.3.5 Material para sinterización.....	23
2.3.6 Sustituto parcial del cemento Portland.....	23
2.4 Problemas ambientales relacionados con las escorias de horno de arco eléctrico.	23
Capítulo 3	26
Metodología para evaluar el moldeo autofraguante utilizando escorias de horno de arco eléctrico.....	26
3. 1 Introducción.	26
3. 2 Pruebas de acondicionamiento para el sistema autofraguante.	27
3. 2. 1 Acondicionamiento de las mezclas de arena-escoria.	27
3. 2. 2 Mediciones de porcentaje de humedad y secado de mezclas.....	27
3. 2. 3 Medición de pH a las mezclas.....	28
3. 2. 4 Determinación de las condiciones para el sistema autofraguante.....	28
3. 3. 1 Pruebas de estabilidad a mezclas arena- escoria.	29
3. 3. 2 Pruebas de compresión a mezclas arena- escoria.....	29
3. 3. 3 Pruebas de permeabilidad a mezclas arena- escoria.....	30
3. 3. 4 Elaboración de moldes	31
3. 3. 5 Vaciado y medición de refractabilidad de los moldes.	31
3. 3. 6 Evaluación de piezas vaciadas mediante líquidos penetrantes.....	32
3. 3. 7 Pruebas de recuperación térmica de las mezclas arena-escoria.	32
3.4 Evaluación mecánica y microestructural de piezas vaciadas	33
3. 4. 1 Evaluación de refractabilidad.....	33
3. 4. 2 Pruebas de microdureza a piezas vaciadas.	33
3. 4. 3 Preparación metalográfica, caracterización microestructural y medición de tamaño de grano.	34
3. 4. 4 Maquinado y pruebas de tensión a probetas vaciadas.....	34
3.5 Análisis estadístico.	35
Capítulo 4	36
Resultados y discusión.....	36
4. 1 Introducción.	36
4. 2 Resultados de acondicionamiento para el sistema autofraguante.....	36
4. 2. 1 Resultados del porcentaje de humedad y mediciones de pH.	36
4. 2. 2 Resultados de determinación de las condiciones para el sistema autofraguante.	38

4. 3 Resultados de evaluación a las mezclas de moldeo y vaciado de piezas.....	40
4. 3. 1 Resultados de estabilidad, compresión y permeabilidad de mezclas arena-escoria.....	40
4. 3. 2 Resultados de la medición de refractabilidad de los moldes.....	43
4. 3. 4 Resultados de la recuperación térmica de mezclas arena- escoria.	53
4. 4 Resultados de evaluación microestructural de piezas vaciadas.....	55
4. 5 Resultados de evaluación mecánica de piezas y probetas vaciadas.....	60
4. 6 Resultados de análisis estadístico	65
CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características que influyen para seleccionar una arena de moldeo [1].	3
Tabla 2. Composición química de arena para moldeo con alto contenido de sílice [8].	6
Tabla 3. Comparación de las propiedades de los diferentes sistemas autofraguantes [21].	12
Tabla 4. Principales características de los sistemas autofraguantes.	17
Tabla 5. Composición química típica de una escoria de horno de arco eléctrico (EHAE) [32].	20
Tabla 6. Fases mineralógicas comúnmente encontradas en la escoria de horno de arco eléctrico [29].	21
Tabla 7. Características de las escorias de horno de arco eléctrico para aplicaciones específicas [32].	22
Tabla 8. Propiedades físicas y térmicas de la EHAE en comparación con la arena de sílice.	25
Tabla 9. Variables de estudio para el trabajo previo.	27
Tabla 10. Variables y niveles usados en un trabajo previo de moldeo en arena en verde.	36
Tabla 11. Resultados del porcentaje de humedad inicial de las 27 muestras originales.	37
Tabla 12. Resultados de las mediciones de pH en mezclas representativas.	37
Tabla 13. Resultados del tiempo de endurecimiento para cada tipo de catalizador.	38
Tabla 14. Variables de estudio para la elaboración de los moldes en el presente trabajo.	40
Tabla 15. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 10% escoria.	64
Tabla 16. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 30% escoria.	64
Tabla 17. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 50% escoria.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Ejemplo de un molde permanente, b) ejemplo de molde hecho con arena específicamente arena en verde.....	2
Figura 2. Clasificación de la forma del grano de arena para fundición [1].....	4
Figura 3. A) Granos de arena de forma angular antes de ser transportada, B) Granos de arena fracturados después de ser transportados [5].....	4
Figura 4. Distribución de temperatura en la solidificación del metal en el molde de arena [16].	8
Figura 5. Grupos de los tipos de aglutinantes químicos para el moldeo de arena [3].	10
Figura 6. Secuencia de pasos para el proceso- V [3].	14
Figura 7. Reacción de polimerización para el sistema aglomerante fenólico uretano [21].	14
Figura 8. Mecanismo de unión entre la resina parte 1 y resina parte 2 [25].	15
Figura 9. Grafica de endurecimiento del sistema fenólico uretano comparado con el sistema furánico [26].	16
Figura 10. Clasificación de los tipos de escoria generados durante la producción de acero.....	18
Figura 11. Micrografía de la escoria de horno de arco eléctrico obtenida mediante SEM a 1000x [33].	20
Figura 12. Estadística del uso posterior a la escoria de horno de arco eléctrico [31].	24
Figura 13. Etapas para la experimentación de este proyecto.	26
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso experimental.	26
Figura 15. Acondicionamiento de mezclas para ser nuevamente procesadas.	27
Figura 16. Equipo de infrarrojo KETT.....	28
Figura 17. Medidor de pH digital.....	28
Figura 18. Probetas elaboradas para la prueba de estabilidad y equipo utilizado para la prueba.	29
Figura 19. Ensayo de compresión.	30
Figura 20. Permeámetro DISA para medición de permeabilidad de probetas elaboradas con sistema autofraguante fenólico- uretano.	30
Figura 21. Proceso de moldeo autofraguante de las piezas utilizando mezclas de arena y escoria.	31
Figura 22. a) Termopar para la medición de la temperatura en el molde con mezcla de arena-escoria y b) Esquema de las posiciones de cada termopar, siendo T1 el termopar 1 y T2 el termopar 2.....	32
Figura 23. Probetas A) y B) hechas con catalizador 3501, y C) y D) hechas con catalizador 3451.	39
Figura 24. Probetas realizadas con mezclas arena- 50% escoria con los siguientes porcentajes de resina a) 6.5%, b)7% y c) 7.5%.	39
Figura 25. Resultados de estabilidad en función de granulometría y cantidad de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.	41
Figura 26. Resultados de compresión en función de granulometría y cantidad de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.	41
Figura 27. Resultados de permeabilidad en función de la granulometría y nivel de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.....	42
Figura 28. Curvas de temperatura en función del tiempo, a) para un molde con arena nueva y b) para un molde con arena nueva- 30% escoria.....	44

Figura 29. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 10% escoria.	46
Figura 30. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 30% escoria.	46
Figura 31. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 50% escoria.	47
Figura 32. Graficas del coeficiente de conductividad térmica k en función del tiempo para las muestras representativas de cada grupo de % de EHAE.....	49
Figura 33. Resultados de los valores del coeficiente de conductividad térmica para mezclas agrupadas en función del porcentaje de EHAE en la mezcla.	50
Figura 34. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 10% escoria.	52
Figura 35. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 30% escoria.	52
Figura 36. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 50% escoria.	53
Figura 37. Resultados de LOI en función de la temperatura para diferentes tiempos de calcinación.	54
Figura 38. Micrografías de la pieza vaciada en un molde con arena de sílice nueva. a) Micrografía a 50x, b) Micrografía a 200x	56
Figura 39. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 10% escoria a 50x.	56
Figura 40. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 30% escoria a 50x.	57
Figura 41. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 50% escoria a 50x.	58
Figura 42. Micrografías obtenidas a 200x de las muestras a) CF1 y b) CG3, se presenta principalmente la diferencia del uso de diferentes niveles de aglutinante.	59
Figura 43. Resultados de los valores de tamaño de grano en función de la granulometría para cada relación arena- escoria.	60
Figura 44. Resultados de microdureza Vickers.	61
Figura 45. Resultados de pruebas de tensión.	61
Figura 46. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados del coeficiente de conductividad térmica k.	66
Figura 47. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de microdureza.	67
Figura 48. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de tamaño de grano.	68
Figura 49. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de esfuerzo máximo de tensión.	69

INTRODUCCIÓN

La industria de la fundición depende en gran medida de los procesos de moldeo, siendo el sistema autofraguante fenólico-uretano uno de los más utilizados por su productividad, calidad y capacidad de reciclar arena. Sin embargo, este proceso requiere grandes volúmenes de arena de sílice, cuya extracción impacta de manera significativa al ambiente.

Al mismo tiempo, la producción de acero genera grandes cantidades de escoria de horno de arco eléctrico (EHAE), un residuo industrial que, en muchos casos, se deposita en vertederos a pesar de presentar propiedades físicas y químicas similares a las de la arena de sílice. Su aprovechamiento como sustituto parcial de la arena convencional representa una oportunidad para reducir costos, disminuir la disposición de residuos y avanzar hacia procesos de fundición más sostenibles.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de EHAE en mezclas de moldeo autofraguante para la producción de piezas de aluminio, analizando su efecto en la refractabilidad de los moldes, la microestructura y las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas. Con ello, se busca demostrar una alternativa técnica y ambientalmente viable que contribuya a la valorización de residuos industriales y a la innovación en la industria de fundición.

Los objetivos generales y específicos de este trabajo son:

Objetivo general:

Determinar la factibilidad de la sustitución parcial de arena por escoria de horno de arco eléctrico para la elaboración de moldes mediante el sistema autofraguante para el vaciado de piezas de aluminio.

Objetivos específicos

- Preparar mezclas de moldeo con diferentes proporciones de arena/escoria y granulometrías.
- Evaluar la viabilidad del sistema autofraguante fenólico-uretano mediante un diseño factorial considerando tres factores: porcentaje de escoria, granulometría y contenido de resina.
- Caracterizar los moldes obtenidos mediante pruebas de refractabilidad, resistencia a la compresión, permeabilidad y estabilidad.
- Fabricar y vaciar piezas de aluminio en los moldes elaborados, evaluando su microestructura, calidad superficial y propiedades mecánicas.

Capítulo 1

Procesos de moldeo con sistemas autofraguantes.

1.1 Introducción.

En la industria de la fundición se utilizan diferentes tipos de moldeo, los cuales se seleccionan en función de los requerimientos de productividad y de la calidad que se desea en la pieza terminada. El sistema de moldeo mayormente utilizado en la industria de fabricación de autopartes es el que utiliza arena sílice como material de moldeo. Existen diferentes sistemas de moldeo con arena, siendo el autofraguante el que proporciona mayor productividad. En este capítulo se describen las características de los sistemas autofraguantes, así como de los tipos de arena que se utilizan en dichos sistemas.

1.2 Generalidades del proceso de moldeo con arena.

Como primer paso en el proceso de moldeo de piezas es tener un modelo de la pieza que se quiera reproducir, este modelo comúnmente es de aluminio, madera o de polímero que se puede generar mediante impresión 3D o mediante un torno CNC. A partir del modelo se fabrica el molde, el cual puede ser desechable (típicamente de arena vertida sobre una caja que sirve como contenedor para el modelo), o moldes permanentes que son hechos de un metal con punto de fusión relativamente mayor al del metal a vaciar. Aunque estos últimos tienen la ventaja en el ahorro de los tiempos de producción, representan grandes gastos para su maquinado y ajuste dimensional, además de que no permite la flexibilidad de hacer cambios a los modelos, pues para cada cambio en el diseño de una pieza requiere la fabricación de un nuevo molde. En la **Fig. 1** se puede observar un ejemplo de un molde permanente y un ejemplo de un molde desechable hecho de arena.

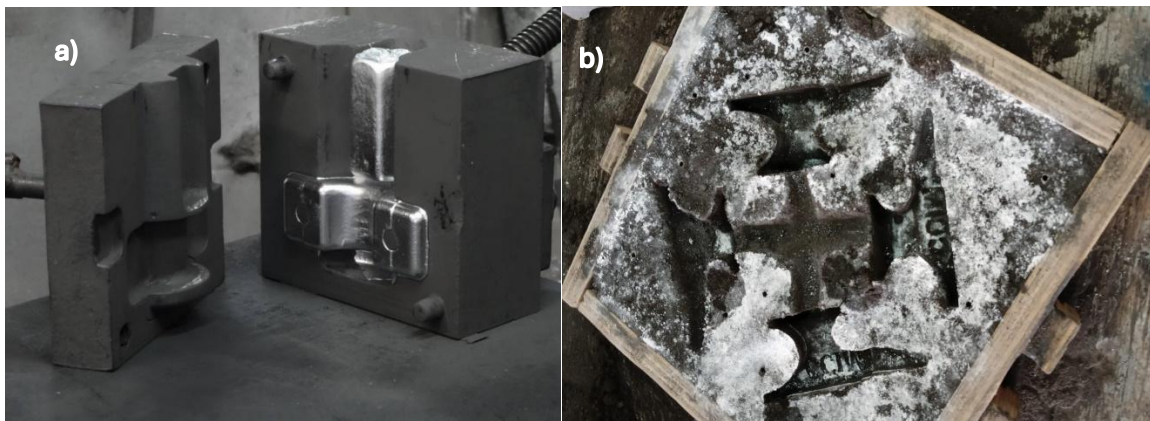


Figura 1. a) Ejemplo de un molde permanente, b) ejemplo de molde hecho con arena específicamente arena en verde.

Para elaborar los moldes de arena en la industria de la fundición, es necesario tener en cuenta las características de la arena a utilizar, las cuales se seleccionan dependiendo de la aleación a vaciar. Estas características incluyen composición química, estabilidad dimensional a altas temperaturas, refractabilidad, resistencia mecánica, compactabilidad, permeabilidad, así como el tipo y tamaño de grano; este último aspecto afecta en gran medida la calidad superficial de la pieza. En la **Tabla 1** se enlistan algunas de estas características y los valores típicos utilizados para los procesos de fabricación de moldes de arena [1, 2].

Tabla 1. Características que influyen para seleccionar una arena de moldeo [1].

Característica	Valor	Efecto en los moldes
Número de finura de grano (GFN)	50-60 AFS	Buen acabado superficial con niveles bajos de aglutinantes
Tamaño de grano promedio	220-250 micras	
Contenido de finos, por debajo de malla 200	2% máx.	Permite el uso de niveles bajos de aglutinantes
Diferencia de tamaño	95% en 4 o 5 tamices	Da buena compactación y resistencia a los defectos de expansión
Área de superficie específica	120-140 cm ² /g	Permite el uso de niveles bajos de aglutinantes
Permeabilidad en seco	100-150 (ml/min)	Reduce defectos de gases

Para obtener una adecuada arena de fundición que cumpla con las especificaciones anteriores, es necesario que se sigan una secuencia de procesos mineros de extracción, cribado y lavado para la eliminación arcillas, pequeñas rocas y otros compuestos que son contaminantes. En los pasos finales la arena pasa por tamices para su clasificación de tamaño de grano, el cual dependerá de las especificaciones de cada fundición [3, 4].

En cuanto a la forma del grano de la arena se clasifica de acuerdo con su angularidad y esfericidad como se observa en la **Fig. 2**. En esta figura se observa que los granos pueden ser con alta, media y baja esfericidad; y con morfologías muy angular, angular, sub-angular, sub-redondeado, redondeado y muy redondeado. Para que el molde de arena tenga alta resistencia, alta permeabilidad y un bajo consumo de aglutinante, el grano de arena debe de ser redondeado con esfericidad de media a alta. El tipo de grano que se debe evitar es el que tenga baja esfericidad y forma angular, ya que esto provoca una menor compactación del molde y el aumento del consumo de aglutinante [1].

						Alta esfericidad
						
						
Muy angular	Angular	Sub-angular	Sub-redondeado	Redondeado	Bien redondeado	Baja esfericidad

Figura 2. Clasificación de la forma del grano de arena para fundición [1].

Una de las causas por la cual los granos de arena pierden su forma es por el fenómeno de segregación que ocurre durante el almacenaje o transporte de la arena, como se ejemplifica en la **Fig. 3**, la cual muestra el cambio en la forma del grano de la arena después de ser transportada con aire a presión alta [5]. Otra causa del cambio de forma en los granos de arena es por la degradación que experimentan durante los ciclos de uso en procesos de moldeo y vaciado de metales, donde los granos de la arena se exponen a temperaturas de hasta 1500°C [6].

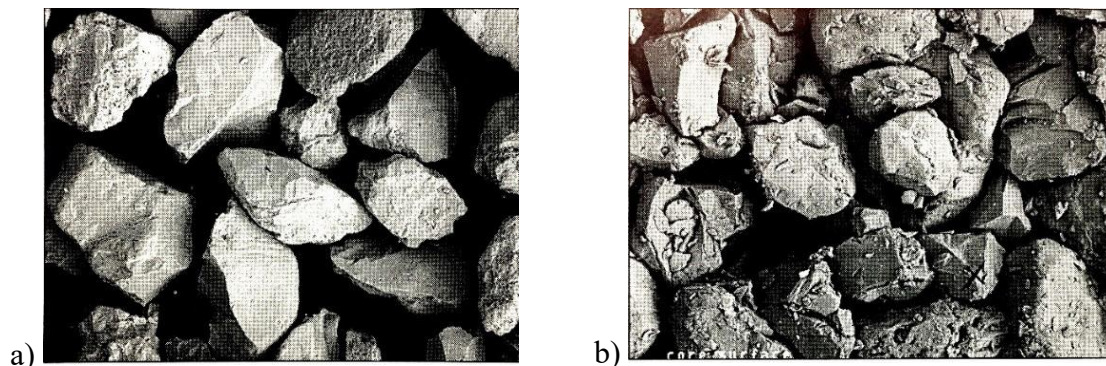


Figura 3. A) Granos de arena de forma angular antes de ser transportada, B) Granos de arena fracturados después de ser transportados [5].

La forma y tamaño de grano son de gran importancia debido a que determinan la permeabilidad del molde, la cual es la capacidad que tiene el molde para dejar salir los gases

que se generan al momento en el que el metal hace contacto con la arena. Cuando una arena de moldeo tiene impurezas se reduce la permeabilidad y aumenta el consumo de aglutinante [7]. Sin embargo, la generación de gases en el molde no es una desventaja completamente, ya que estos gases dentro del molde generan presiones altas que provocan que el metal no penetre en la arena, facilitando de este modo el desmoldeo de la pieza [3]. Es necesario que se tomen en cuenta las consideraciones anteriores para seleccionar el tipo adecuado de tamaño de grano de la arena y también el tipo de arena a utilizar. Existen diferentes tipos de arenas, los cuales se describen a continuación.

1.2.1 Arena de zirconio (ZrSiO_4)

Este tipo de arena para moldeo contiene 67% de zirconio y 33% de sílice y posee alta conductividad térmica, lo cual permite que las piezas vaciadas se enfríen rápido. Se puede utilizar con el sistema de moldeo en verde o con sistemas de aglutinantes químicos debido a que tiene una expansión térmica de 0.003 in/in [7]. Este tipo de arena se utiliza principalmente para piezas de acero con formas complejas y delgadas y normalmente se utiliza con una granulometría fina (120 AFS) para asegurar que la parte superficial de la pieza no tenga rugosidad. Es una buena opción para mejorar la calidad superficial de piezas, pero su costo es elevado [1, 2].

1.2.2 Arena de cromita (FeCr_2O_4)

Esta arena contiene 68% de óxido de cromo, el otro porcentaje es una combinación de óxidos como MgO , FeO , MnO y ZnO . La arena de cromita tiene granulometría gruesa (70 AFS), de igual manera que la arena de zirconio se utiliza para piezas de acero y tiene alto costo. La expansión térmica de este tipo de arena es de 0.004 in/in [7]. La recuperación de esta arena es difícil de llevar a cabo, ya que se reduce su refractariedad cuando se contamina con sílice [1, 2].

1.2.3 Arena de olivino (Mg_2SiO_4)

Se usa para el vaciado de piezas de acero al manganeso y debido a que proviene de la trituración del mineral olivino, su forma del grano es angular, lo que provoca baja resistencia del molde. No es apta para usarse con sistemas de aglutinantes químicos, ya que al utilizar el sistema fenólico uretano tiende a acelerar el fraguado del molde y para el sistema furánico tiende a consumir más cantidad de catalizador. Este tipo de arena cuenta con una expansión térmica de 0.005 in/in [1, 7].

1.2.4 Arena de sílice (SiO_2)

Esta arena tiene alto contenido de óxido de sílice, el cual se recupera principalmente de playas, ríos u océanos, por lo que esto hace que la arena sea fácil de conseguir y de bajo costo. Para fabricar un molde con este tipo de arena, esta debe de contener mínimo 87% de SiO_2 [6]. En la **Tabla 2** se presenta la composición química de una arena con alto contenido

de sílice; cabe señalar que la arena de sílice Chelford es la que se utiliza típicamente para moldeo en arena en verde y moldeo con sistemas de aglutinantes químicos [8, 9]. La arena de sílice es la que más se utiliza en la industria ya que destaca por tener una alta capacidad y una conductividad térmica moderada [7].

Tabla 2. Composición química de arena para moldeo con alto contenido de sílice [8].

Arena de sílice Chelford WS (50) (%)	
SiO ₂	97.91
Al ₂ O ₃	1.13
Fe ₂ O ₃	0.5
TiO ₂	0.04
CaO	0.11
MgO	0.02
K ₂ O	0.65
Na ₂ O	0.07

Este tipo de arena presenta la desventaja de que puede formar silicatos debido al contenido de Mn y Fe, los cuales generan defectos de quemado de arena; otra desventaja es que reacciona con aleaciones ferrosas que contienen Mn, además tiene una expansión térmica de 0.018 in/in [1, 10]. Cuando se trabaja con hierro fundido la sílice reacciona con él y forma una escoria que se adhiere a la superficie de la pieza creando una capa rugosa, sin embargo, la arena de sílice es la arena que más se utiliza para elaborar moldes ya que estos problemas se pueden solucionar modificando la cantidad de aglutinantes [3].

Entre las ventajas que podemos encontrar en el uso de este tipo de arena es su alto punto de fusión (1610°C), disponibilidad y bajo costo, además su recuperación es fácil y es factible utilizarla para elaborar moldes con aglutinantes naturales y químicos. Este tipo de arena es altamente refractaria debido al alto contenido de SiO₂, pero esto depende de la composición química, ya que es necesario que la arena contenga 95- 96% de SiO₂ como mínimo [9].

Independientemente del tipo de arena, esta es una de las materias primas más importantes en la industria de la fundición, la cual después de su uso se vuelve un desecho en caso de que no se apliquen procesos de recuperación de arena. La recuperación de arenas de moldeo es un proceso al cual se somete la arena proveniente del proceso de vaciado, que permite recuperar la arena ya utilizada con sus propiedades similares a las iniciales para que puedan ser reutilizadas en la elaboración de moldes [11]. La arena que se utilizó por repetidas ocasiones o la arena que se contaminó con arena de un sistema de moldeo diferente se denomina arena de desecho de fundición (WFS, por sus siglas en ingles) y está ya no puede ser reutilizada debido a que no tiene la resistencia suficiente para elaborar moldes de arena

[12, 13]. Existen tres métodos principales de recuperación de arenas de moldeo: recuperación húmeda, recuperación mecánica y recuperación térmica [14].

La recuperación húmeda consiste en separar restos metálicos de la arena mediante separadores magnéticos o cribas, después se forma una pulpa de arena- agua, se agita mecánicamente dentro de un equipo de recuperación para separar el aglutinante y después se realiza un cribado húmedo para separar partículas finas u otros contaminantes que quedan en el agua. Para separar el agua se envía a tanque de sedimentación, la arena se pasa a filtrar y finalmente pasa por hornos de secado para su reutilización. Este tipo de recuperación únicamente se puede utilizar con arenas de moldeo en verde o arenas aglutinadas con silicato de sodio ya que los aglutinantes presentan solubilidad en agua [11].

La recuperación mecánica es un método a temperatura ambiente en la cual se utiliza maquinaria sencilla y se aplica para la recuperación de arenas aglutinadas con resinas orgánicas e inorgánicas. Consiste en un proceso de atrición que provoca que el aglutinante que cubre los granos de arena se adelgace en grosor mediante la fricción entre cada grano de arena asistido por el contacto mecánico de las maquinas. La recuperación termina con el proceso de triturado para romper los enlaces aun presentes y la clasificación para eliminar las partículas más finas [11].

La recuperación térmica es más eficiente en arenas unidas con aglutinantes orgánicos, eliminado la mayoría de aglutinante. Para el caso de arenas utilizadas con moldeo en verde no es conveniente utilizar la recuperación térmica debido a que el calor provoca que la arcilla se convierta en aglutinante muerto sin poder eliminar por completo las capas de aglutinante formado entre cada grano de arena [12]. Este tipo de recuperación consiste principalmente en exponer la arena a una temperatura de 700°C a 800°C durante 15-30 minutos para lograr la combustión de los aglutinantes [11].

1.3 Transferencia de calor en moldes

Una propiedad importante de la arena es la refractabilidad, la cual es la capacidad que tiene la arena de transferir calor, en otras palabras, es la capacidad que tiene el calor para transferirse a través del contacto entre cada grano de arena a cierta velocidad. El calor que se transfiere a la arena depende de la temperatura del metal a vaciar, así como del volumen y tiempo de enfriamiento del metal [3, 7].

El resultado del comportamiento mecánico en las aleaciones vaciadas está directamente relacionadas a su microestructura, la cual depende de la composición química y el proceso de solidificación que haya ocurrido [15]. Algo importante en el proceso de solidificación es que pueden influir las condiciones del molde, ya que entre más refractario sea el molde, la microestructura del material vaciado llegará a las condiciones más cercanas al equilibrio, se

tendrán controlada la micro segregación dendrítica, segundas fases, inclusiones o microporosidad, por lo que se tendrá una microestructura con propiedades mecánicas efectivas.

Para entender mejor el concepto de refractabilidad, se puede hacer uso del siguiente análisis, que es válido cuando un metal solidifica en arena o cuando la resistencia principal al flujo de calor es el molde mismo. Considere un metal liquido puro sin sobrecalentamiento que se vacía en un molde con forma de placa plana. La distribución de la temperatura dentro del metal y el molde sería el mostrado en la **Fig.4**, donde la resistencia de transferencia de calor ocurre dentro del molde, por lo que la temperatura del molde en la superficie T_s es casi igual a la temperatura de fusión del metal T_M . Por consiguiente, en el proceso de solidificación, la caída de temperatura del metal solidificado es pequeña y en la interfaz metal-molde la temperatura $T_s \cong T_M$ se mantiene constante [16].

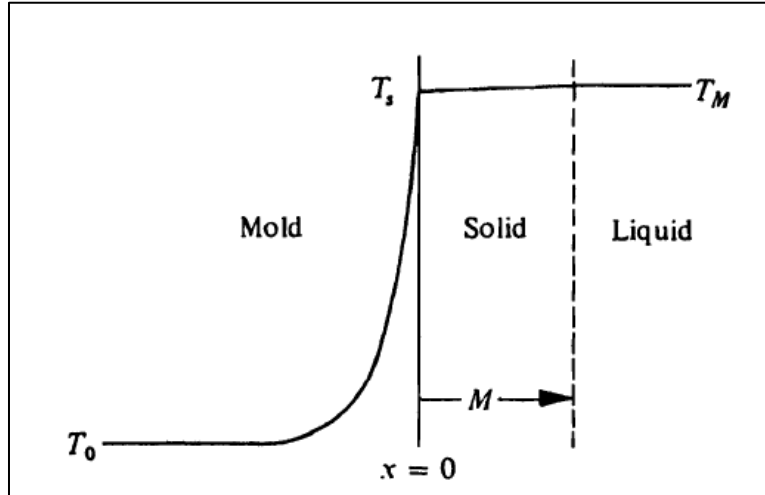


Figura 4. Distribución de temperatura en la solidificación del metal en el molde de arena [16].

La ecuación (1) permite estimar la cantidad de calor que fluye del metal hacia el molde a una temperatura específica T en función del tiempo:

$$\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = \text{fer} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (1)$$

En esta ecuación, el termino x es la distancia de la interfaz metal-molde hacia dentro del molde, T_0 es la temperatura inicial o temperatura ambiente y α es la difusividad térmica dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

Donde k es la conductividad térmica, ρ es la densidad y C_p es el calor específico del material del que está hecho el molde. Si consideramos que el molde tiene una extensión semi-infinita y sus propiedades térmicas son constante y uniformes, podemos deducir el flujo de calor dentro del molde [17]:

$$q|_{x=0} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{k(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad (3)$$

$$q|_{x=0} = \frac{\sqrt{k \rho C_p}}{\sqrt{\pi t}} (T_M - T_0) \quad (4)$$

El termino $k \rho C_p$ es la capacidad del molde para absorber calor a cierta velocidad, el cual se llama difusividad calórica y es diferente a la difusividad térmica α [17]. La velocidad a la cual se genera calor latente del metal por unidad de área se define como:

$$q|_{x=0} = \rho' H_f \frac{dM}{dt} \quad (5)$$

Siendo ρ' la densidad del metal sólido, M el espesor solidificado y H_f el calor latente de fusión del metal (J kg^{-1}). Con la ecuación (4) y (5) obtenemos la velocidad a la que avanza la interfaz hacia el líquido (ecuación 6), la cual queda determinada por la evolución del calor latente de solidificación, ya que al verter metal al molde de arena se genera un gradiente de temperatura y la transferencia de calor del metal al molde.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{(T_M - T_0) \sqrt{k \rho C_p}}{\rho' H_f \sqrt{\pi t}} \quad (6)$$

Considerando los limites $M = 0$ en $t = 0$, integramos la ecuación (6) para determinar el espesor solidificado en función del tiempo:

$$M = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{T_M - T_i}{\rho' H_f} \right] \sqrt{k \rho C_p} t^{1/2} \quad (7)$$

Los términos dentro del paréntesis son variables de solidificación que dependen de las propiedades del metal y de la difusividad calórica del molde, además el termino $\sqrt{k \rho C_p}$ representa una medida de la refractabilidad del molde [17].

Por último, con la ecuación (7) se puede despejar y calcular el tiempo de solidificación de la pieza, obteniendo:

$$t = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\rho' H_f}{T_M - T_0} \right]^2 \frac{M^2}{(k \rho C_p)} \quad (8)$$

Es importante conocer los parámetros que se relacionan con la transferencia de calor, ya que estos nos ayudan a determinar valores numéricos característicos de la solidificación, por ejemplo, el espesor solidificado, el tiempo de solidificación, así como también el coeficiente de transferencia de calor, lo cual es importante para optimizar el proceso de moldeo y solidificación de las piezas [18]. Se han realizado diversas investigaciones sobre las propiedades anteriormente mencionadas debido a que el coeficiente de conductividad térmica puede variar dependiendo de los materiales de moldeo, tipo de moldeo, cantidades de aglutinantes por lo que no es posible generalizar un solo valor para este coeficiente y además se modifican las propiedades y estructuras de las piezas fundidas [19].

1.4 Sistemas de moldeo

Según datos de la AFS el 90% de las piezas que son fabricadas por fundición son mediante el proceso de moldeo desechable con arena, el cual permite realizar cambios en el diseño del modelo, tamaño y calidad de la pieza [3, 20]. Algunas de las consideraciones más importantes a tomar en cuenta antes de realizar un molde son: la elección del tipo de moldeo en arena conveniente para la extracción del modelo, la elección de líneas de partición, la utilización de corazones, la elección de un tamaño de caja de moldeo adecuado para disminuir la cantidad de arena, entre otros [8].

Existen diferentes tipos de moldeo en arena, estos métodos se describen en la **Fig. 5**, en ella se observa que la principal diferencia entre ellos es el tipo de aglutinante, el medio por el cual la arena se mantiene unida y la manera en la que el molde endurece.

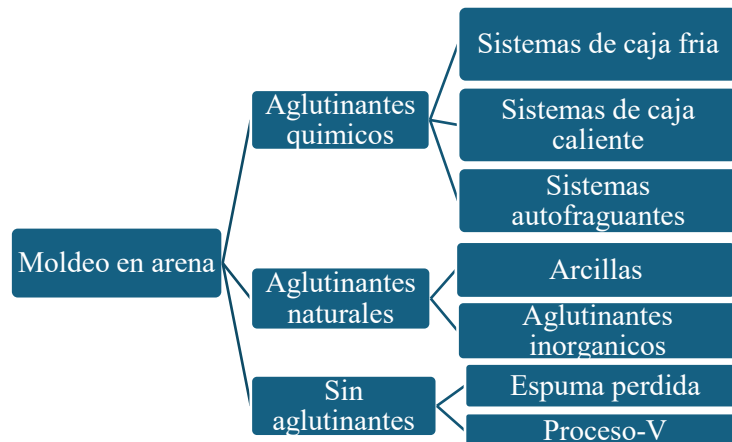


Figura 5. Grupos de los tipos de aglutinantes químicos para el moldeo de arena [3].

1.4.1 Moldeo en arena con aglutinantes químicos.

Este tipo de moldeo se utiliza principalmente para elaborar moldes y corazones [21]. Consiste principalmente en un sistema de resinas orgánicas en conjunto con catalizadores, los cuales reaccionan con los granos de arena y esto provoca que el molde endurezca. Existen diferentes sistemas; por ejemplo, los que endurecen sin necesidad de aplicar calor y los que no es necesario aplicarles calor o una fuente de gas para que el molde obtenga resistencia [3]. Estos sistemas se describen a continuación.

1.4.1.1 Sistemas de caja fría.

En este tipo de sistema el curado o fraguado del molde es a temperatura ambiente con ayuda de un gas (SO_2 o CO_2) como catalizador. Los sistemas que entran en esta clasificación son [3]:

- Fenólico uretano caja fría (PUCB)
- Furanico (SO_2)
- Acrílico epoxico (SO_2)
- Ester fenólico caja fría (PECB)

Este sistema cuenta con las ventajas de que es excelente para producciones grandes, tiene precisión dimensional, las piezas fundidas tienen acabado superficial excelente, además de que se pueden almacenar sin tiempo definido los moldes o corazones ya hechos [10].

1.4.1.2 Sistemas de caja caliente.

La característica principal de este tipo de moldeo es que se necesita aplicar temperatura al molde para poder curarlo. Para este proceso se calienta previamente el molde en el cual se vaciará la arena humedecida con el aglutinante, la cual reacciona para formar un ácido fuerte y como subproducto agua. Para lograr un curado aceptable, una eliminación de la humedad y la reducción de la emisión de gases, los moldes realizados con este proceso se mantienen por dos horas, antes de pasar al proceso de vaciado [22]. La subclasificación de este tipo de sistema únicamente es en dos: el tipo furano y el fenólico. El primero tiene un tiempo de curado menor en comparación con el fenólico [3].

1.4.1.3 Sistemas autofraguantes.

Comúnmente se les llama sistemas autofraguantes, pero también se les conoce como sistemas “nobake” o “airset” [10], ya que, el curado de este sistema es inmediato y sin aplicarle calor o gas. Consiste principalmente en mezclar la arena con dos o más componentes aglutinantes en conjunto con un catalizador. La principal característica de este tipo de sistemas es que el tiempo que se tiene para trabajar y extraer el molde de la caja de moldeo puede ajustarse, ya que puede durar minutos hasta horas dependiendo del tipo de aglutinantes utilizados. los sistemas autofraguantes se clasifican en [3]:

- Ácido furano

- Ácido fenólico
- Éster fenólico alcalino
- Alquídico
- Fenólico uretano (PUN)

La principal ventaja del uso de este sistema es su alta productividad, ya que el proceso de moldeo debe de llevarse a cabo de manera precisa debido a que las reacciones entre los aglutinantes y catalizador son rápidas. En la **Tabla 3** se muestran las principales características que hacen diferentes entre sí a estos sistemas [21].

1.4.2 Moldeo en arena con aglutinantes naturales.

La principal característica de este tipo de moldeo es el uso de arcillas (bentonita) o el uso de aglutinantes inorgánicos como lo es el silicato de sodio con dióxido de carbono. Cabe señalar que existen más sistemas que entran en este tipo de moldeo como lo son el moldeo con fosfatos, el moldeo con arena seca y el moldeo con marga el cual consiste en emplear rocas compuestas de carbonato de calcio [3].

El moldeo en verde es el moldeo con aglutinantes naturales más antiguo que existe y consiste en mezclar arena sílice con bentonita que se activa al adicionarle agua para que después del mezclado de estos componentes, el molde quede endurecido. Por otro lado, en el moldeo con silicato de sodio, se utiliza dióxido de carbono (CO₂) para curar el silicato de sodio y que este forme una matriz vítrea que une cada grano de arena, generando así el endurecimiento del molde. Este último tipo de moldeo tiene la desventaja de que a temperaturas mayores a 400°C el silicato se fusiona con los granos de arena y provoca que la pieza fundida sea difícil de desmoldear [23].

Tabla 3. Comparación de las propiedades de los diferentes sistemas autofraguantes [21].

PARÁMETRO	SISTEMA				
	ÁCIDO FURANO	ÁCIDO FENÓLICO	ÉSTER FENÓLICO ALCALINO	ALQUÍDICO	FENÓLICO URETANO
Tiempo de desmoldeo (min)	20-25	30-35	14-16	60	5-8
Tiempo de trabajo (min)	7-8	5-10	4-12	10-12	2-3
Facilidad de sacudida	Buena	Justa	Buena	Pobre	Buena
Resistencia a la humedad	Pobre	Pobre	Excelente	Buena	Buena
Temperatura óptima de la arena (°C)	27	27	27	32	27
Genera subproductos	Si	Si	Si	No	No
Evolución de humos	Ligeramente penetrantes	Penetrantes	Sin evolución	Penetrantes e irritantes para los ojos	Penetrantes e irritantes para los ojos

1.4.3 Moldeo en arena sin aglutinantes.

Como su nombre lo indica en este tipo de sistemas no se utilizan aglutinantes, estos se clasifican en el proceso de espuma perdida y en el proceso-V. El proceso de espuma perdida se utilizaba inicialmente con moldeo en verde usando un modelo en poliestireno expandible, el cual se colocaba dentro de la caja de moldeo y se rellenaba con arena en verde. Posteriormente el modelo de poliestireno se volatilizaba cuando el metal entraba dentro del molde. El problema que se tenía al utilizar arena en verde es que al quedar muy compactado el molde no permitía que los gases generados por la volatilización del poliestireno salieran, generando así defectos en la pieza vaciada. Actualmente para controlar estos defectos se utiliza arena suelta [3].

El proceso-V o también llamado moldeo al vacío, fue desarrollado en Japón para piezas fundidas de superficie y volumen grande. En este proceso se utiliza una lámina que tiene un grosor de 0.05 a 0.10 mm, es necesario que esta lamina tenga buena elasticidad y una alta relación de deformación plástica ya que tomara la forma del modelo, se rellena de arena libre y se cubre con una segunda lamina, después se aplica vacío y la arena toma la forma del modelo. Al vaciar el metal la primer lamina plástica se derrite, la secuencia de pasos más detallada se muestra en la **Fig. 6** [3, 10].

1.5 Sistema fenólico uretano (PUN).

En esta parte nos centraremos únicamente en el moldeo con arena de sílice y el sistema aglutinante fenólico uretano, el cual entra en el grupo de sistemas autofraguantes. Este sistema de aglutinante se introdujo en el sector de fundición en la década de 1970 y fue el primero en descubrirse dentro del grupo de endurecedores en frio [8, 24]. Está conformado por 3 partes las cuales se describen a continuación:

- Parte 1: Resina fenol formaldehido o resina fenólica líquida
- Parte 2: Isocianato polimérico o poliisocianato
- Parte 3: Catalizar de amina

El mecanismo que sigue el sistema para el fraguado es el que se describe en la **Fig.7** en ella se puede observar que en los productos no existen subproductos, sino que solamente se forma el enlace de uretano y un desprendimiento de calor por lo que esta reacción se considera exotérmica [21].

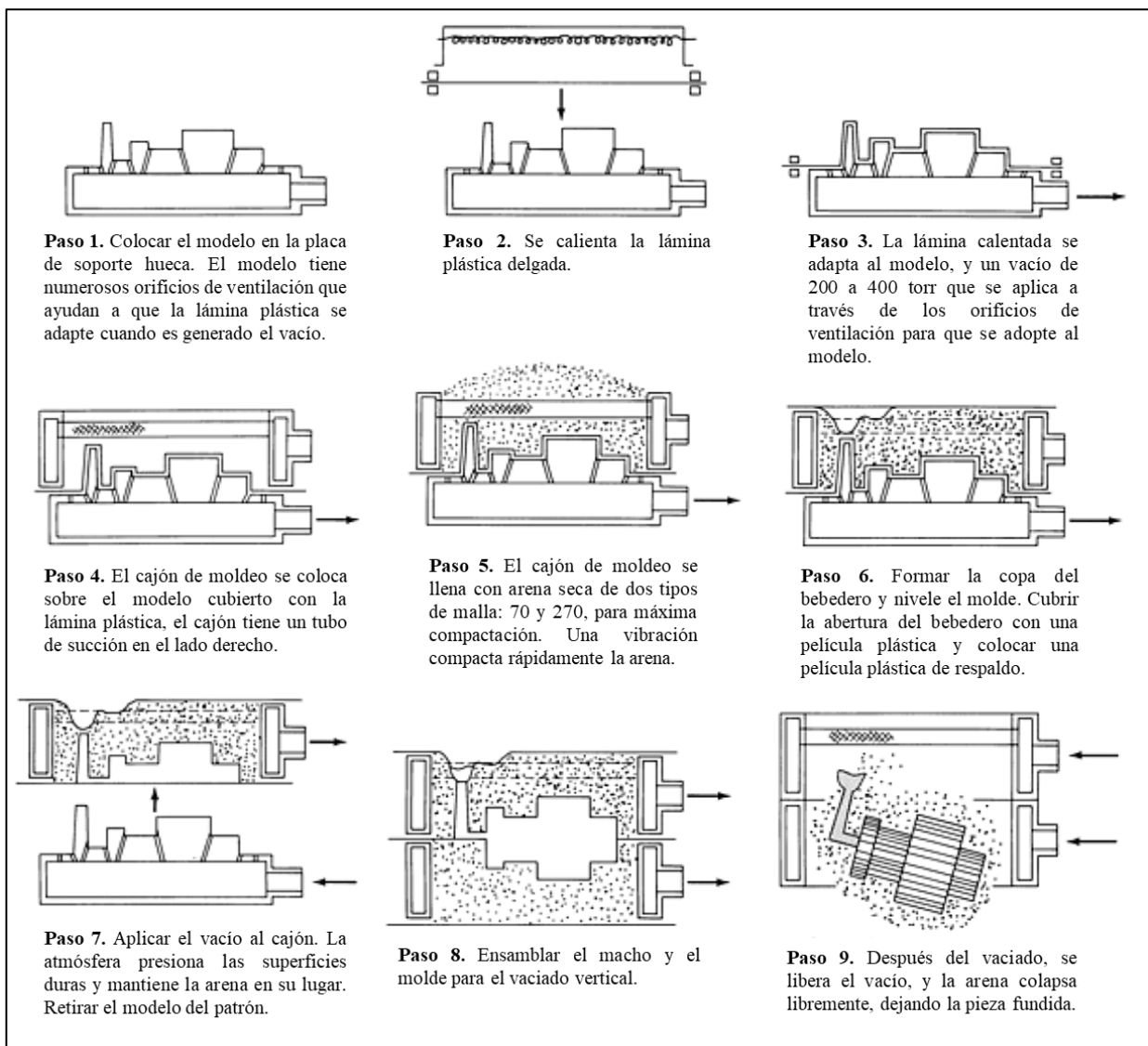


Figura 6. Secuencia de pasos para el proceso- V [3].



Figura 7. Reacción de polimerización para el sistema aglomerante fenólico uretano [21].

La parte 1 de este sistema es la resina fenólica, la cual es una resina con baja viscosidad que recubre a la arena. La parte 2 es un isocianato polimérico de tipo MDI que también se mezcla para formar una resina de baja viscosidad. El mecanismo de reacción comienza cuando los grupos hidroxilos de la resina fenólica de la parte 1 reaccionan con los grupos isocianato de la parte 2 en conjunto con el catalizador de amina para formar la resina de uretano sólida

como se muestra en la **Fig. 8**. En cuanto a contenidos de agua únicamente la resina parte 1 contiene menos del 1%, el contenido de nitrógeno va desde un 3 y 4% el cual se obtiene desde el isocianato polimérico de la parte 2 [25].

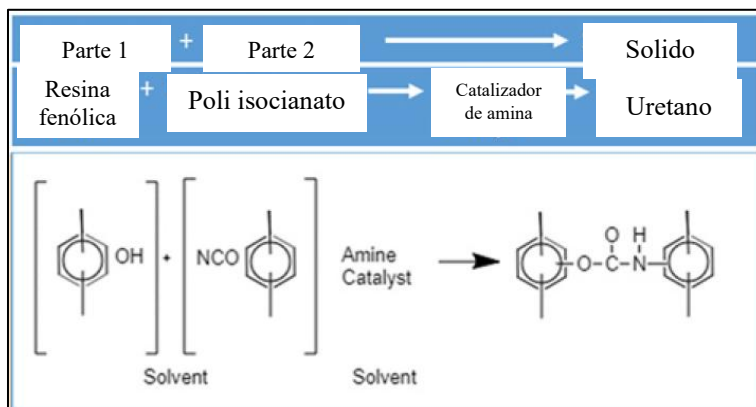


Figura 8. Mecanismo de unión entre la resina parte 1 y resina parte 2 [25].

El proceso de moldeo para este sistema consiste primero en mezclar la arena con los aglutinantes y el catalizador. Para este sistema se debe de tener en cuenta los tiempos del proceso, ya que dependiendo de la cantidad de catalizador utilizado se puede alargar o acortar el tiempo. Una vez que se mezcla la resina con el catalizador comenzara la reacción química con la arena y de esta manera es como el molde quedara fraguado. No es necesario aplicar fuerza humana para compactar la arena mezclada, únicamente se coloca sobre el modelo y se va rellenando uniformemente hasta tener el molde completo, después se saca el modelo y se tiene listo el molde para ser vaciado.

Como se ha mencionado en el párrafo anterior existen tiempos que se deben considerar en el moldeo con aglutinantes, a cada tiempo se le da un nombre específico ya que se van describiendo conforme avanza el proceso de moldeo y a continuación se describe cada uno de ellos.

1. *Vida útil de banco (BT)*: es el tiempo hasta el cual se puede manipular la arena mezclada con los aglutinantes ya que después de este tiempo la resistencia del material se afectará porque fue detenido el proceso de unión entre aglutinante-arena.
2. *Tiempo de desmoldeo (ST)*: se dice que ha llegado a su tiempo de desmoldeo cuando el molde se ha endurecido completamente y se puede desmoldar sin que se fracture y por lo tanto es resistente para soportar el metal líquido que se verterá dentro de él.

1.5.1 Ventajas y desventajas del uso del moldeo con el sistema fenólico uretano.

En la **Fig. 9** se presentan los tiempos de trabajo para este tipo de sistema en comparación con los de otros sistemas de aglutinantes endurecedores en frio, siendo el principal el Furánico.

Podemos observar que para el sistema fenólico uretano los tiempos de trabajo son mucho menores por lo que permite una mayor productividad [26].

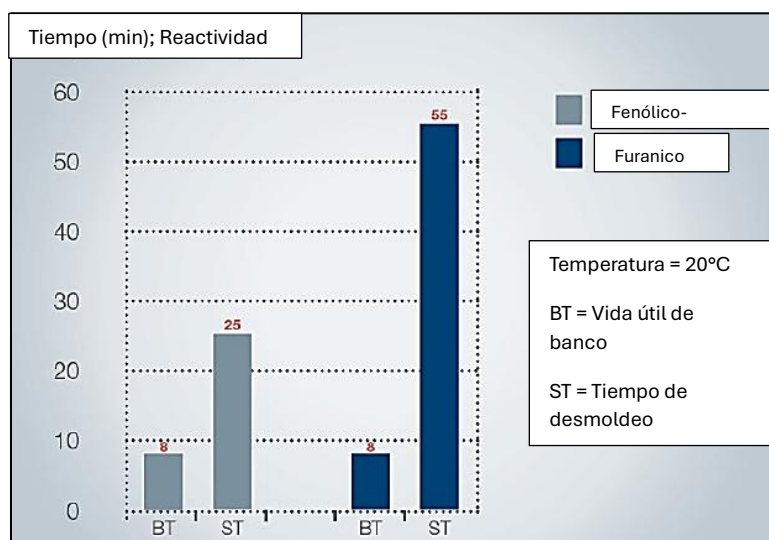


Figura 9. Grafica de endurecimiento del sistema fenólico uretano comparado con el sistema furánico [26].

Si hacemos una comparación contra el moldeo en arena en verde tenemos otra ventaja la cual es el contacto completo de la arena contra el modelo y caja de moldeo, lo que ayuda a aumentar la precisión y los detalles de cada parte para que al momento de que entra el metal líquido al molde este llegue y adopte la forma del modelo. También cabe destacar que la recuperación de la arena es adecuada y fácil de llevarse a cabo [8].

Las empresas de fundición principalmente buscan reutilizar la arena en gran medida ya que la arena utilizada representa entre 65 a 90% en peso del total de residuos generados en la fundición [25]. La recuperación de arena se basa en tres tipos: recuperación mecánica en seco, recuperación mecánica en húmedo y recuperación térmica [26]. En particular cuando se utilizan moldes aglomerados con sistemas autofraguantes la recuperación térmica de arena es más eficiente ya que a temperaturas elevadas se volatilizan los contenidos de aglutinantes orgánicos que se emplean [11].

Una de las desventajas principales del sistema fenólico uretano es la emisión de COV (Compuestos Orgánicos Ambientales), lo cual genera gases durante el vaciado del metal. Estos gases se producen debido a la amina que está contenida en el catalizador [8, 24]. Debido a lo anterior se recomienda tener cuidado y un control con los reactivos y por lo tanto es necesario que al trabajar con este tipo de sistema de molde se haga uso de todo el equipo de seguridad y que el espacio de trabajo cuente con sistema de ventilación.

Los sistemas de resina fenólica-uretánica se diluyen (extienden) con un disolvente y, por lo tanto, presentan una viscosidad muy baja. Cuando se utilizan a los niveles bajos

recomendados, se aplica una capa mínima sobre los granos de arena. Dado que parte del disolvente se evapora después de recubrir la arena, el ya bajo porcentaje de resina que debe eliminarse de la arena se reduce aún más. Este tipo de recubrimiento también es bastante frágil, por lo que se desprende fácilmente de la superficie del grano de arena. La combinación del contenido bajo de aglutinante y la fragilidad del recubrimiento hace que este grupo de resinas sea fácil de recuperar mediante técnicas de recuperación térmica o mecánica [5].

En la **Tabla 4**, se describen las principales características de los sistemas autofraguantes, resaltando las ventajas que tiene el uso del sistema fenólico uretano y por las cuales se ha decidido utilizar este sistema en este proyecto [18].

Tabla 4. Principales características de los sistemas autofraguantes.

CARACTERÍSTICAS	FENÓLICO ALCALINO	FURÁNICO	FENÓLICO URETANO
Productividad	Deficiente	Moderada	Altamente deseable
Calidad de la fundición	Moderada	Deseable	Altamente deseable
Recuperación de la arena utilizada (%)	70- 85	90	80- 90
Resistencia a la compresión (MPa)	0.12	0.21	5

Capítulo 2

Escorias de horno de arco eléctrico.

2.1 Introducción.

El proceso de fabricación de acero es una de las actividades productivas que más contamina, ya que además de la generación de diversos gases, también se desechan productos que no son reutilizados, por ejemplo, la escoria de horno de arco eléctrico (EHAE). Hasta el momento los usos que se le han dado a este tipo de residuos son como agregados en la elaboración de pavimento, limpieza de aguas residuales y en la recuperación de acero. Actualmente, se busca darle nuevos usos a las EHAE, siendo una alternativa atractiva su posible reutilización para fabricar moldes para fundición. Por lo tanto, en este trabajo se evalúa la posibilidad de la sustitución parcial de arena por EHAE para fabricar moldes para el vaciado de piezas de aluminio.

2.2 Características de las escorias de horno de arco eléctrico.

Uno de los principales desechos que se generan en gran cantidad en la industria de la fabricación del acero, son las escorias, las cuales son mezclas formadas principalmente por óxidos (SiO_2 , CaO , FeO , Al_2O_3 , MgO y MnO). Existen diferentes tipos de escoria de acero dependiendo del tipo y método de obtención, como se esquematiza en la **Fig. 10**.

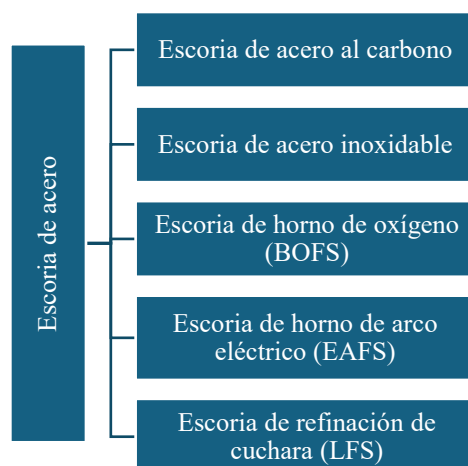


Figura 10. Clasificación de los tipos de escoria generados durante la producción de acero.

De las escorias anteriores, el mayor porcentaje (70-80% en peso%), corresponde a escorias de hornos de arco eléctrico (EHAE), la cual se genera en el proceso de la fabricación de acero, en donde la materia prima es chatarra de acero que se funde mediante el calor generado

por una corriente eléctrica que pasa por tres electrodos de grafito [27]. Para que el acero fundido pueda ser vaciado es necesario primero retirar la escoria, la cual posteriormente se deja enfriar de forma natural. Sin embargo, si se desea utilizar la escoria, es necesario procesarla para tome la forma granular y con una distribución de tamaño específica.

Dependiendo de la etapa de donde se retire la escoria, se generan dos tipos de escoria de horno eléctrico:

1. *Escorias básicas negras*: se caracterizan por tener contenidos de CaO menores al 40% y se producen durante la carga en frío de chatarra.
2. *Escorias básicas blancas*: estas tienen contenidos de CaO superiores al 40%, se producen en la afinación del metal fundido, el contenido elevado de CaO se debe a la necesidad de eliminar azufre y fósforo [28].

2.2.1 Procesamiento de las escorias de horno de arco eléctrico.

Aunque en muchos países las escorias son consideradas un desecho, en algunos otros se les da un procesamiento para poder almacenarlas o darles un uso posterior. Por ejemplo, en Reino Unido desde el 2015 se autorizaron una serie de normas para el procesamiento de las escorias de horno de arco eléctrico por ser consideradas como un subproducto y no un desecho [29]. Cuando se retira la escoria del metal fundido esta se encuentra a la temperatura del metal de 1300°C a 1700°C y para poder enfriarla se recurre a implementar procesos eficientes para no solo enfriarla mediante aire. Algunos de los procesos de enfriamiento son:

1. *Proceso de granulación en el aire*: la escoria se somete al soplo de gas a presión para solidificarla y granularla.
2. *Proceso ISC*: la escoria se vacía en un contenedor de acero donde se realiza aspersión de agua para que se enfríe y solidifique.
3. *Proceso de enfriamiento rápido*: la escoria se vacía en un contenedor especial y se enfría mediante aspersión de agua.

Para poder manipularla después del enfriamiento y solidificación, la escoria se tritura y se le hace una separación magnética para recuperar el Fe, ya que la escoria contiene entre 10% y 40% de Fe. Este último proceso se repite las veces que sea necesario hasta lograr recuperar la mayor cantidad de residuos de Fe. Para que la escoria pueda ser comercializada para usos posteriores es necesario que pase por procesos de trituración y cribado para tener un ajuste en el tamaño de esta. Como último paso la escoria se somete a un tratamiento que consiste en desactivar los compuestos de cal y magnesia libres, ya que si estos están activos reaccionan con el agua y provocan una expansión volumétrica debido a la hidratación. Lo que se realiza en este tratamiento es someter a la escoria a tratamiento con agua caliente para que ocurra la reacción de hidratación en tiempos menos prolongados.

El procesamiento de escorias se aplica principalmente a las que están destinadas a darles uso posterior, especialmente cuando se destina a aplicaciones para carreteras en donde la expansión volumétrica puede ser un problema. Sin embargo, la mayoría de las escorias únicamente son desechadas sin darles tratamiento ni uso posterior [30].

2.2.2 Composición y propiedades de las escorias de horno de arco eléctrico.

En la **Tabla 5** se describe la composición química típica de la escoria de horno de arco eléctrico. Esta composición generalmente se presenta en términos de óxidos, los cuales se determinan mediante un análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF) [31, 32].

Tabla 5. Composición química típica de una escoria de horno de arco eléctrico (EHAE) [32].

% Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅
EAFS	30-50	11-20	10-18	5-6	8-22	8-13	5-10	2-5

Las características topográficas y morfológicas de la escoria se pueden determinar en un microscopio electrónico de barrido (SEM) usando la señal de electrones retrodispersados (BSE). En la **Fig. 11**, se muestra un ejemplo de una micrografía obtenida mediante esta técnica, donde se puede observar las áreas claras que contienen en su mayoría Fe, Mg, Mn y Al, y las zonas más oscuras representan contenidos de Ca y Si [31, 33].

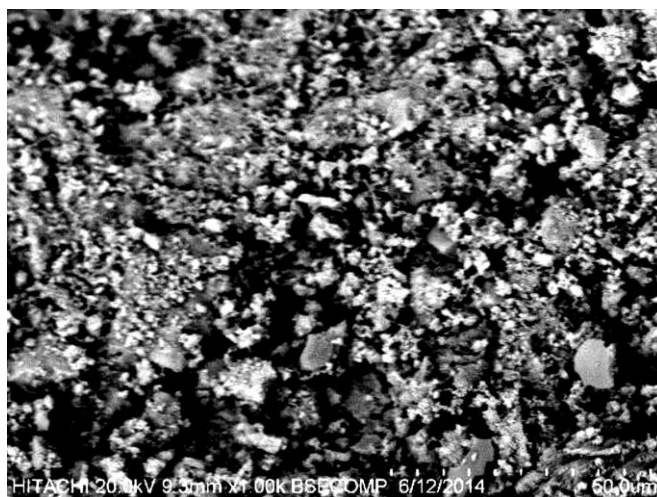


Figura 11. Micrografía de la escoria de horno de arco eléctrico obtenida mediante SEM a 1000x [33].

La composición química de las escorias puede ser muy variable, debido a esto la mayoría de los autores mencionan únicamente los compuestos principales de las escorias, los cuales son CaO, FeO, MgO y SiO₂ [29, 34]. Para la fusión del acero se hace uso de fundentes los cuales crean una protección a la oxidación del metal líquido, controlan la basicidad de la escoria y también se añaden para proteger el material refractario del horno. Los fundentes comúnmente

utilizados son cal apagada y/o dolomita (CaO - MgO producto de la calcinación de dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La disolución de estos fundentes lleva a la formación de fases mineralógicas en la escoria las cuales se listan en la **Tabla 6** [29, 35].

Tabla 6. Fases mineralógicas comúnmente encontradas en la escoria de horno de arco eléctrico [29].

Fase mineral	Contenido en % en peso
Silicato tricálcico (C_3S) Ca_3SiO_5	0-20
Silicato dicálcico (C_2S) Ca_2SiO_4	30-60
Magnesiocalciowustita (RO) (Fe, Mn, Mg, Ca) O	15-30
Alumino ferrita dicálcica (RF) $\text{Ca}_2(\text{Fe, Al, Ti})_2\text{O}_5$	10-25
Magnetita (R_3O_4) (Fe, Mn, Mg)$_3\text{O}_4$	0-5
Cal (Ca, Fe) O	0-15
Periclasa (Mg, Fe) O	0-5

La escoria tiene una densidad de 3.3 a 3.6 g/cm^3 , debido a los contenidos de Fe, es un material resistente y tiene un índice de moliendabilidad de 0.7, que es menor en comparación con la escoria de alto horno la cual tiene un índice de 0.96 y de la arena estándar, que tiene un índice de 1.0 [36]. Este tipo de escorias se clasifican como básicas, ya que se obtienen de un proceso de fusión de hierro y acero. Existe también un índice que representa la basicidad o acidez de las escorias y para las escorias de horno de arco eléctrico se puede calcular con la relación de óxidos básicos y ácidos. Para este tipo de escorias los compuestos predominantes son la cal y sílice, pero la basicidad total se considera como: $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$ [29].

La escoria también presenta buenas propiedades mecánicas, tiene resistencia a la abrasión, tiene buena durabilidad y alta resistencia a la carga. En cuanto a propiedades térmicas tiene alta capacidad calorífica, es decir conserva el calor un tiempo considerablemente mayor que los agregados naturales [31]. Esta última característica es ventajosa, ya que se puede dar un nuevo uso dentro de la industria de la fundición, específicamente en el moldeo.

2.3 Aplicaciones de las escorias de horno de arco eléctrico.

En general las EHAE presentan propiedades físicas y químicas que las hacen atractivas para usos posteriores. En la **Tabla 7** se listan la relación entre las características que debe de tener la escoria para que pueda ser aplicada en cada uno de los sectores descritos a continuación [32].

Tabla 7. Características de las escorias de horno de arco eléctrico para aplicaciones específicas [32].

Características	Aplicaciones
Dura, resistente al desgaste, adherente, rugosa	Agregados para construcción vial e hidráulica
Porosa, alcalina	Tratamiento de aguas residuales
Componentes de Fe_3O_4, Fe	Recuperación de hierro
Componentes de CaO, MgO, FeO, MnO	Agente fundente
Componentes cementantes (C_3S, C_2S y C_4AF)	Producción de cemento y concreto
Componentes de CaO, MgO	Captura de CO_2 y desulfuración de gases de combustión

2.3.1 Recuperación de residuos de acero.

Mediante procesos de trituración, molienda, clasificación magnética y cribado se recupera el acero residual de la escoria, ya que esta contiene aproximadamente un 10% de acero. Aunque este tipo de recuperación se remonta desde los años setenta en países desarrollados, en la actualidad la tasa de recuperación de acero en la escoria sigue siendo baja debido a la deficiencia de tecnologías que permitan recuperar estos residuos de manera eficiente [32].

2.3.2 Agregado para la industria de la construcción.

Muchas investigaciones se han centrado en utilizar la escoria como material para suelos y construcción de carreteras debido a su alta resistencia, durabilidad, alta densidad, alta resistencia a la abrasión y textura rugosa [32], además tiene la ventaja de ser menos costosa y fácil de reciclar. Sin embargo, debido a que es un material con composición química y propiedades físicas complejas es necesario evaluarlas antes de ser utilizadas. Diversos investigadores han demostrado que el uso de escorias en la construcción tiene la desventaja de ser inestables volumétricamente y tienen una durabilidad reducida, por lo que se recomienda que se dé un tratamiento térmico y envejecimiento antes de utilizarla [37]. Investigadores analizaron la composición química de la escoria de alto horno y encontraron que esta contiene óxidos libres, por ejemplo CaO y MgO, los cuales al hidratarse afectan la durabilidad y estabilidad volumétrica del concreto [38, 39].

2.3.3 Filtro para tratamiento de aguas residuales.

Otro uso que se da a la escoria de horno de arco eléctrico es como filtro para tratamiento de agua residuales. Debido a que la escoria tiene una estructura porosa y capacidad de absorción, puede eliminar elementos nocivos en el agua [38]. Estudios realizados con escorias en agua de mar que contiene mercurio demostraron que la escoria tiene alta capacidad de adsorción de mercurio [35]. Existen investigaciones donde la escoria de horno de arco eléctrico se utilizó para eliminar fósforo del agua residual y se encontró una eficiencia cercana al 100% siguiendo un mecanismo de absorción y precipitación, sin embargo, también se encontró la desventaja de que la escoria tiene sitios de adsorción limitados, lo cual no permite utilizarla durante periodos prolongados [38, 40]. La escoria además de tener propiedades de absorción

también reduce la acidez en las aguas residuales, ya que contiene elementos como Fe y Ca que reaccionan con SO_4 y logran formar yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [38].

2.3.4 Aplicación en la agricultura.

Los compuestos de CaO, SiO_2 , FeO, P_2O_5 y MgO contenidos en la escoria son óptimos para utilizarla como fertilizante porque estos compuestos ayudan a controlar la acidez del suelo. En países desarrollados como por ejemplo China, Alemania y Estados Unidos, ya se realizan fertilizantes a base de escorias; los fertilizantes que se elaboran son silíceos, fosfatados y fertilizantes de micronutrientes [36].

2.3.5 Material para sinterización.

Cuando el contenido de CaO en la escoria es superior al 50%, se puede utilizar como fundente reemplazando a la cal comercial [36]. Al añadir escoria se puede mejorar la basicidad y consumir menos combustible por la reacción que ocurre de Fe y FeO [41]. Diversas compañías industriales de países desarrollados hacen uso de la escoria como material de sinterización, logrando reutilizar cantidades de hasta 15,000 toneladas por año [42]. Sin embargo, estas cantidades dependen del contenido de fósforo en el metal fundido [36, 43].

2.3.6 Sustituto parcial del cemento Portland.

La escoria de horno de arco eléctrico puede utilizarse como sustituto parcial en el cemento Portland, ya que tiene compuestos como C_3S ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_4AF ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$) y C_2F ($2\text{CaO} \cdot \text{FeO}$), los cuales proveen propiedades cementantes a la escoria, sin embargo, el contenido de C_3S es menor en comparación con el Clinker regular, para que se pueda sustituir en su totalidad. Según diversas investigaciones, además de tener la ventaja que se puede sustituir parcialmente en el cemento Portland, otra ventaja que muestra la escoria es la reducción energética en la producción de dicho cemento, ya que la calcinación se realiza a temperaturas más bajas [38, 44, 45]. Otros investigadores han establecido que únicamente se puede sustituir de 5 a 10% en peso de escoria en el cemento Portland para obtener buena resistencia a la compresión, ya que si se aumenta hasta el 20% esta resistencia disminuye [38, 46].

2.4 Problemas ambientales relacionados con las escorias de horno de arco eléctrico.

En la actualidad el manejo o disposición de la escoria de horno de arco representa un problema de índole ambiental que además implica un incremento adicional a los costos de producción, y más porque estas escorias se generan en cantidades considerables, ya que por cada tonelada de acero que se produce se desechan de 110 a 150 kg de escoria [47]. Como se mencionó anteriormente, este desecho ya tiene usos posteriores en diversos sectores, como se puede observar en el gráfico de la Fig. 12, siendo el sector de la construcción de carreteras el de mayor uso de este desecho, hasta un 46 a 48%, aunque presente desventajas [29, 31].

Se mencionó también todo el proceso que conlleva acondicionar a la escoria para que no se considere como desecho, si no como un subproducto. Sin embargo, dichos procesos no se realizan en la mayoría de las industrias debido a la demanda de tecnología y tiempo.

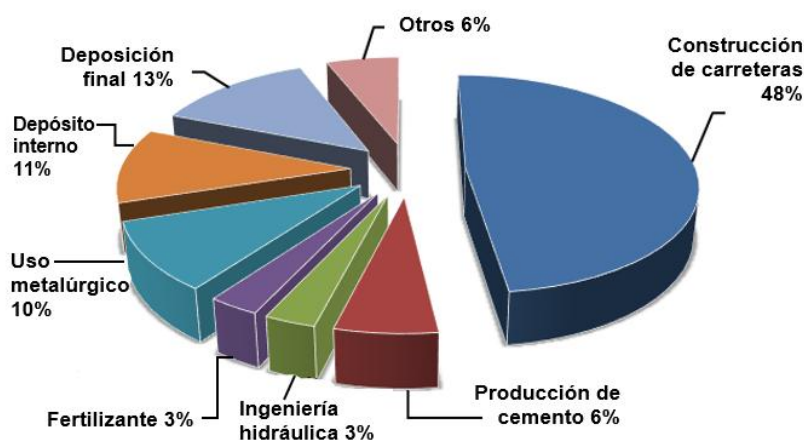


Figura 12. Estadística del uso posterior a la escoria de horno de arco eléctrico [31].

Debido a este tipo de desechos y demás de la industria que provocan un cambio de clima significativo, en el 2015 se creó la Agenda 2030 la cual contiene 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para promover acciones que ayuden a la situación crítica ambiental y para la humanidad [46]. Al reutilizar la escoria estamos contribuyendo al ODS 12, específicamente a la meta 12.5 la cual señala el poder reducir considerablemente los desechos promoviendo actividades de reciclaje, reutilización y reducción. Secundariamente también se abarcan los ODS 9, 11 y 13, ya que estos tratan de promover industrias sostenibles y reducir los efectos del cambio climático [48].

El uso de este desecho como sustituto parcial del moldeo en arena con un sistema autofraguante es una idea innovadora, ya que existen pocas investigaciones, las cuales además están centradas únicamente en establecer si es posible o no utilizar escorias de diferentes tipos de hornos con sistemas de moldeo de arena en verde o silicato de sodio. Además, en este trabajo se explora una alternativa para la disminución del uso de la arena de sílice que es un recurso natural. De esta manera se recicla un desecho y se disminuye el uso de recursos naturales.

En la **Tabla 8**, se describen las principales propiedades físicas y térmicas a considerar, que tienen las EHAE en comparación con la arena de sílice. Estas propiedades son las más importantes para poder aplicar parcialmente la EHAE como material de moldeo. Las dificultades o riesgos posibles al hacer uso parcial de la EHAE serían, debido a su densidad alta puede afectar el manejo de los moldes realizados, el calor específico de la escoria es

menor en comparación con el de la arena de sílice, por lo que, tiene menor capacidad de mitigar los cambios de temperatura durante el proceso de fundición, sin embargo, por su contenido de SiO₂ se mejoran las propiedades refractarias si se utiliza como material para moldeo en conjunto con la arena de sílice [9, 29].

Tabla 8. Propiedades físicas y térmicas de la EHAE en comparación con la arena de sílice.

PROPIEDAD	ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	ARENA DE SÍLICE
Contenido de SiO ₂ (%)	11- 20	97.91
Densidad (g/cm ³)	3.3- 3.6	2.65
Calor específico (J/kgk)	700	1170
Coefficiente de conductividad térmica (W/mK)	0.85- 1.7	0.5- 0.8

Capítulo 3

Metodología para evaluar el moldeo autofraguante utilizando escorias de horno de arco eléctrico.

3. 1 Introducción.

Debido a las propiedades físicas y químicas de la escoria similares a la arena de sílice, en el presente trabajo de investigación se propuso evaluar la factibilidad del uso de las EHAE como sustituto parcial para el moldeo en verde de piezas vaciadas en aluminio, utilizando el moldeo con el sistema fenólico- uretano. La parte experimental de esta investigación se dividió en 4 etapas principales como se muestra en la **Fig. 13**. Con este estudio se espera determinar una alternativa para reducir la contaminación provocada por este desecho, utilizando un sistema de moldeo que permita bajos tiempos de producción y un mejor acabado en las piezas fundidas. En la **Fig. 14**, se observa el diagrama de flujo que se siguió para realizar la metodología experimental.



Figura 13. Etapas para la experimentación de este proyecto.

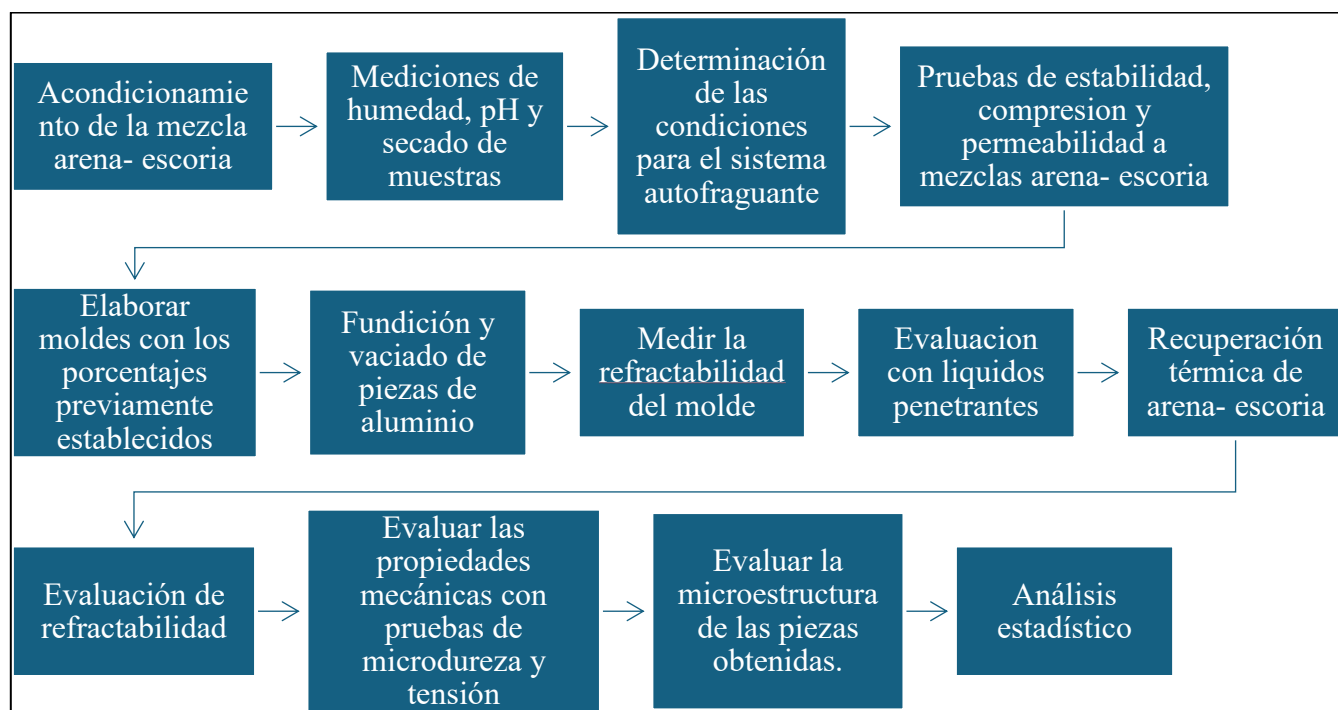


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso experimental.

3. 2 Pruebas de acondicionamiento para el sistema autofraguante.

3. 2. 1 Acondicionamiento de las mezclas de arena-escoria.

Se acondicionaron 27 diferentes mezclas de arena sílice usada y escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) provenientes de un trabajo previo donde se utilizaron en la elaboración de moldes en arena en verde para vaciar piezas de aluminio [49]. En dicho trabajo previo se evaluó el efecto de variar la cantidad de escoria, la granulometría y el porcentaje de bentonita en las mezclas según lo descrito en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Variables de estudio para el trabajo previo.

PORCENTAJE DE ESCORIA EN LA MEZCLA	GRANULOMETRÍA	PORCENTAJE DE BENTONITA EN LA MEZCLA
A = 10%	F = Finos (120AFS)	1 = 4%
B = 30%	M = Medios (90 AFS)	2 = 6%
C = 50%	G = Gruesos (60 AFS)	3 = 8%

Cada mezcla estaba en forma de terrones, por lo que se tuvieron que fracturar como se muestra en la **Fig. 15**. Después de este proceso se homogeneizo cada mezcla mediante tapeteo, el cual es un método para mezclar homogéneamente cierta cantidad de material con ayuda de un tapete. Posteriormente se sacó una muestra representativa de 500 g para pruebas posteriores.



Figura 15. Acondicionamiento de mezclas para ser nuevamente procesadas.

3. 2. 2 Mediciones de porcentaje de humedad y secado de mezclas.

Debido al proceso de almacenamiento, las muestras contenían humedad. Para medir el porcentaje de humedad en las mezclas se utilizó el equipo de infrarrojo que se muestra en la **Fig. 16**. Para este procedimiento primero se pesan 5 gramos de la muestra, y posteriormente se meten al equipo durante 5 minutos para obtener el porcentaje de agua contenida en esa mezcla. Para que el sistema de moldeo autofraguante funcione correctamente, es necesario

que la mezcla quede libre de agua, por lo que cada una de las muestras se secó en una mufla a 150°C durante una hora. En el moldeo con el sistema fenólico uretano, tanto la arena como los aglutinantes deben estar secos, por lo que se debe vigilar el contenido de humedad atmosférica, ya que el agua reacciona con el isocianato y retarda la reacción del uretano [20].

3. 2. 3 Medición de pH a las mezclas.

Esta prueba se realizó con ayuda de un medidor de pH (pH metro) como el que se muestra en la **Fig. 17**. Primero se metió el electrodo en agua desionizada para tener una medición estándar y calibrar el equipo, después se ponen 5 gramos de la muestra en 100 ml de agua y se agita, una vez que esté completamente agitada la mezcla, se introduce el electrodo del medidor de pH y se registra la medición que arroje el equipo. Después de cada medición es necesario volver a calibrar el equipo con el agua desionizada. En las arenas de moldeo que se utilizan con sistemas autofraguantes, específicamente los de fraguado en frío, es importante conocer el pH ya que este valor, que depende de la composición de la arena, influye en la cantidad de catalizador necesaria. Cuando una arena de moldeo tiene componentes alcalinos, estos absorberán el catalizador, por lo que será necesario ajustar las cantidades de este [1].



Figura 16. Equipo de infrarrojo KETT



Figura 17. Medidor de pH digital.

3. 2. 4 Determinación de las condiciones para el sistema autofraguante.

Para este proyecto se contaba con una resina (formada por una parte 1 y una parte 2) y dos tipos de catalizador del sistema fenólico uretano (3501 y 3451), ambos donados por la empresa ASK Chemicals. En cuanto a las pruebas iniciales para establecer la relación entre ambas partes de resina a utilizar, primero se realizaron probetas con arena nueva, utilizando 2% en peso de resina con respecto al peso de la arena (porcentaje recomendado en procesos industriales), así como valores para la relación entre la resina parte 1 y parte 2 de 60/40, 50/50 y de 55/45. Para establecer el tipo y el porcentaje de catalizador, se hicieron pruebas con dos

tipos de catalizador y con cantidades de 6% y 8% en peso respecto al porcentaje en peso de la resina parte 1. Para cada prueba se midió el tiempo de fraguado o endurecimiento de la probeta.

Una vez que se comprobó el desempeño del sistema autofraguante en arena nueva y se determinó la relación para la resina, el tipo y cantidad de catalizador óptimos, se elaboraron probetas utilizando mezclas de arena con diferentes porcentajes de escoria (10%, 30% y 50%), variando la cantidad de resina hasta obtener probetas completamente endurecidas. Con estas pruebas se establecieron los porcentajes de resina a utilizar para el moldeo autofraguante en la presente investigación. Las otras dos variables que se estudiarán serán las cantidades de escoria y la granulometría de las mezclas, las cuales fueron establecidas en un trabajo previo.

3. 3 Evaluación de las mezclas de moldeo y vaciado de piezas

3. 3. 1 Pruebas de estabilidad a mezclas arena- escoria.

Para realizar la prueba de estabilidad de las mezclas de moldeo de arena usada y escoria endurecidas mediante el sistema fenólico uretano, se elaboraron probetas de 50 mm de diámetro y 50 mm de alto como las que se observan en la **Fig. 18**, la cual también presenta el equipo de tamizado utilizado para esta prueba. Se elaboraron probetas para cada una de las mezclas arena- escoria y se registró el peso inicial de cada probeta antes y después de colocarse en el tamizador en una malla abierta durante 5 min. La medida de estabilidad se representa como una diferencia en porcentaje de los pesos antes y después de la agitación mecánica.



Figura 18. Probetas elaboradas para la prueba de estabilidad y equipo utilizado para la prueba.

3. 3. 2 Pruebas de compresión a mezclas arena- escoria.

La prueba de compresión a probetas elaboradas con el sistema autofraguante permite medir la resistencia mecánica que se origina a partir del enlace de la arena con el aglutinante. Es

importante conocer esta propiedad para tener la certeza de que el molde soportará el proceso de vaciado sin tener afectaciones en la pieza. Para realizar esta prueba se hicieron probetas por duplicado de 50 mm de diámetro y 50 mm de alto, después se sometieron a una prueba de compresión en una máquina universal marca Shimadzu modelo AG-KN 100 con 10 toneladas de capacidad y utilizando una velocidad de cabezal de 5 mm/seg, como se observa en la **Fig. 19**. Para cada mezcla evaluada se reportó el promedio de los dos ensayos.



Figura 19. Ensayo de compresión.

3. 3. 3 Pruebas de permeabilidad a mezclas arena- escoria.

La permeabilidad es una medida que permite conocer la cantidad de gas que puede pasar a través del molde durante el proceso de vaciado; el origen de estos gases proviene principalmente de la descomposición de los aglutinantes y del metal líquido. Es importante controlar la permeabilidad ya que si es baja se originan defectos superficiales e internos en la pieza vaciada. Esta prueba se realizó en un permeámetro como el que se muestra en la **Fig. 20**, colocando la probeta elaborada con las mismas especificaciones de las anteriores pruebas en el cilindro y dejando pasar gas, para posteriormente registrar la cantidad que pasa.



Figura 20. Permeámetro DISA para medición de permeabilidad de probetas elaboradas con sistema autofraguante fenólico- uretano.

3. 3. 4 Elaboración de moldes

Para la elaboración de cada uno de los moldes se pesaron 450g de la mezcla arena- escoria y las cantidades de resina y catalizador correspondientes a los valores determinados previamente. Una vez pesado el catalizador, este se mezcló con la parte 1 de la resina. Posteriormente se colocó el modelo de la pieza a reproducir en el interior del molde (yunque) y se recubrió con pintura desmoldante. Para hacer la mezcla, primero se adicionó la resina parte 1 junto con el catalizador a la mezcla de arena- escoria y se revolvió hasta que la mezcla se humedeció uniformemente. Después se adicionó la resina parte 2, se mezcló y se vertió rápidamente dentro de la caja de moldeo, donde previamente se puso el modelo. Después de transcurridos 5 minutos de haber terminado el molde, se volteó la base y se colocó la tapa de la caja de moldeo. Se repitió el proceso anterior únicamente haciendo la consideración de poner el alimentador y también dos orificios para los dos termopares. El proceso descrito anteriormente se puede observar en la **Fig. 21**. El moldeo se hizo por duplicado, ya que además de moldear piezas se moldearon probetas que servirán para la evaluación mecánica.

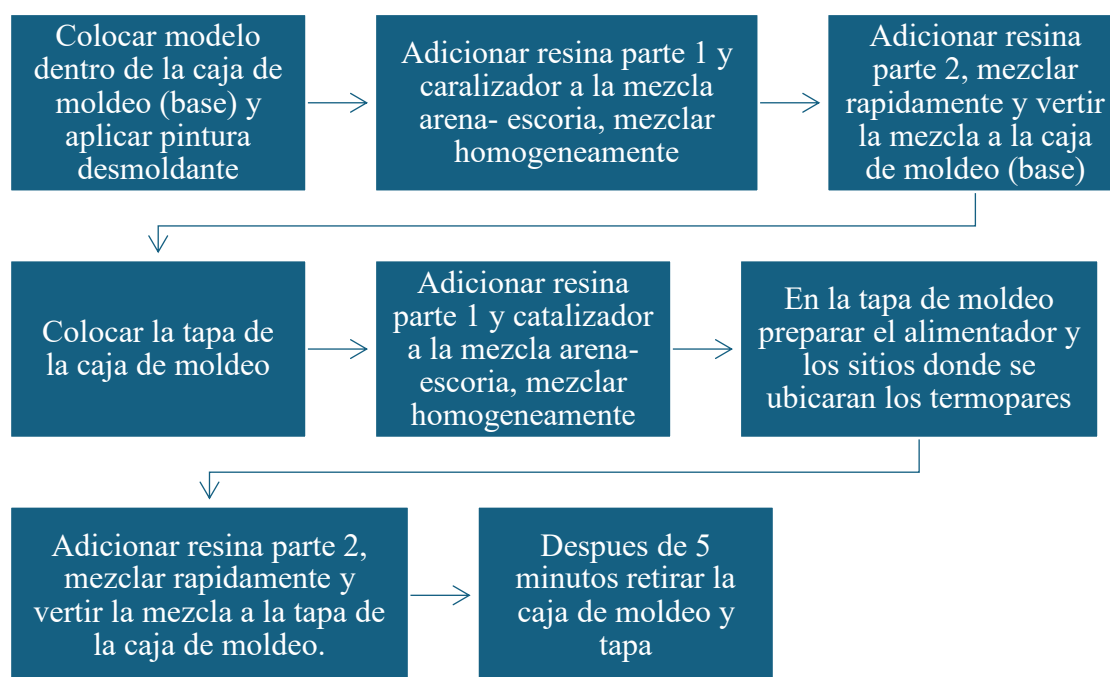


Figura 21. Proceso de moldeo autofraguante de las piezas utilizando mezclas de arena y escoria.

3. 3. 5 Vaciado y medición de refractabilidad de los moldes.

Para el vaciado de las piezas se utilizó aluminio 1100, el cual fue fundido en un horno de gas con capacidad de 4 kilogramos. El horno se precalentó a 250°C y se vació a la temperatura de 750°C. Para medir la refractabilidad de los moldes se utilizó un termopar como el que se muestra en la **Fig. 22a**, el cual tiene dos sensores que se colocaron a una profundidad de 2

cm dentro del molde en las posiciones descritas también en la **Fig. 22b** en el molde de la pieza para la medición de la temperatura. La medición se realizó desde que el metal entró a cada molde y hasta pasadas dos horas del momento del vaciado.

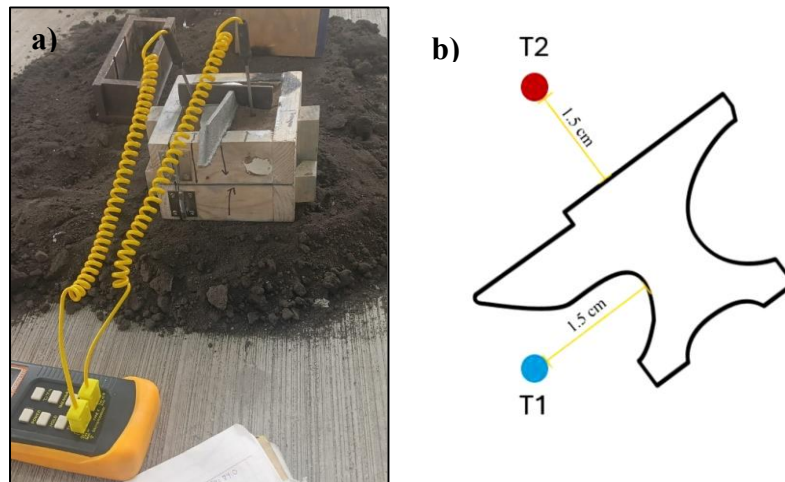


Figura 22. a) Termopar para la medición de la temperatura en el molde con mezcla de arena-escoria y b) Esquema de las posiciones de cada termopar, siendo T1 el termopar 1 y T2 el termopar 2.

3. 3. 6 Evaluación de piezas vaciadas mediante líquidos penetrantes.

La prueba de líquidos penetrantes es un ensayo no destructivo que proporciona información acerca de los defectos superficiales de la pieza, por ejemplo, poros, grietas o contracciones. Esta técnica consiste en los siguientes pasos:

1. Rocíar el líquido limpiador sobre la pieza a analizar y con una franela limpiar para remover toda clase de polvo o impureza.
2. Después aplicar el líquido penetrante aproximadamente a 20 cm de distancia y esperar 5 minutos para que este líquido, como su nombre lo indica, penetre la pieza. Después se remueve con una franela limpia.
3. Por último, se aplica el líquido revelador, el cual hará emerger al líquido penetrante para revelar de manera clara los defectos en la pieza.

La técnica de líquidos penetrantes se aplicó a cada una de las piezas obtenidas después del proceso de desmoldeo para evaluar la calidad superficial de las piezas.

3. 3. 7 Pruebas de recuperación térmica de las mezclas arena-escoria.

Con el fin de establecer la factibilidad de recuperar las mezclas de arena y escoria posterior a su uso para el moldeo y vaciado de piezas de aluminio utilizando el sistema autofraguante, se realizaron algunas pruebas de recuperación térmica a muestras seleccionadas. Las pruebas

consistieron en la calcinación en una mufla de muestras representativas de 5g de la mezcla arena-escoria obtenidas después del desmoldeo de las piezas. Se hicieron pruebas a 500°C, 600°C y 700°C durante 15, 30 y 60 min. Para evaluar la efectividad del proceso de recuperación térmica, se realizó la determinación de las pérdidas por ignición (LOI) antes y después de cada prueba de recuperación. Este análisis consiste en mantener una muestra de 5g a una temperatura de 900°C durante 1 hora. Transcurrido este tiempo la muestra se enfría y se pesa. La cantidad del peso perdido refleja el % de materia orgánica volátil.

3.4 Evaluación mecánica y microestructural de piezas vaciadas

3.4.1 Evaluación de refractabilidad.

Para realizar la evaluación de la refractabilidad se partió de las gráficas de temperatura en función del tiempo obtenidas a partir de las mediciones de temperatura en función del tiempo con dos termopares hechas en los moldes durante el proceso de solidificación de las piezas. De estas gráficas se tomaron los datos en los puntos máximos, medios y mínimos para obtener el valor de la difusividad térmica α utilizando la ecuación (1). Posteriormente se utilizó el valor de α para obtener el coeficiente de conductividad térmica k con la ecuación (2) para cada una de las 27 recetas de moldeo evaluadas. Los resultados de los valores de k se promediaron tomando los valores medios y mínimos de los dos termopares.

Además, se calculó el tiempo de solidificación de las 27 muestras con la ecuación (8), en donde para obtener el C_p de la mezcla arena-escoria se utilizaron los valores reportados en la literatura, los cuales indican un C_p para la arena sílice de 1170 J/kgK y para la escoria de 700 J/kgk. Con estos valores se calculó, mediante la regla de las mezclas, el C_p de la mezcla. De la misma manera se calculó la densidad de la mezcla con valores reportados en la literatura de 2.65 g/cm³ para la arena sílice y de 3.75 g/cm³ para la escoria [29, 50, 51].

3.4.2 Pruebas de microdureza a piezas vaciadas.

Se utilizó el ensayo de microdureza Vickers, el cual consiste en realizar indentaciones aplicando carga a un indentador con punta de diamante en forma de pirámide cuadrangular utilizando un microdurómetro. Para calcular la dureza primero se miden las diagonales de la indentación generada y se aplica la ecuación (9). Donde F es la carga aplicada y d es la medida de la longitud de la diagonal [52, 53]. Para cada pieza se realizaron 10 indentaciones en forma de cruz con una carga de 500 gr y 15 segundos de ensayo.

$$H_v = 1854.4 \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad (9)$$

3. 4. 3 Preparación metalográfica, caracterización microestructural y medición de tamaño de grano.

Para la preparación metalográfica se cortaron las piezas y se desbastaron utilizando una desbastadora y lijas de carburo de silicio de tamaño 220, 320, 400, 600, 1000 y 2000. Para el pulido se emplearon dos paños, utilizando en el primero, pasta de diamante de 3 micras y en el segundo de 1 micra, con los cuales se pulió cada muestra durante 60 minutos hasta obtener un acabado tipo espejo. El ataque químico se realizó con el reactivo Keller, el cual se preparó con las siguientes especificaciones:

- 2 ml de HF
- 3 ml de HCl
- 5 ml de HNO₃
- 190 ml de agua

Cada una de las muestras fue atacada durante 90 segundos e inmediatamente lavada y secada. Después del ataque se tomaron fotografías a 5X, 10X y 20X a cada muestra preparada utilizando un microscopio óptico marca Carl Zeiss modelo Axio Vert A1. La medición de tamaño de grano se llevó a cabo mediante el método de intersección lineal de acuerdo con la norma ASTM E112 [54]. Para este método se trazaron 5 líneas rectas de 10cm para obtener una longitud total de 500mm. Para cada condición se realizó el conteo de límites de granos interceptados en un total de 25 campos y con la información obtenida se calculó la longitud media de intersección para después calcular el tamaño de grano con las ecuaciones (10) y (11) respectivamente [54].

$$P_L = \frac{P_i}{L/M} \quad (10)$$

$$G = (6.643856 \log P_L) - 3.288 \quad (11)$$

3. 4. 4 Maquinado y pruebas de tensión a probetas vaciadas.

Para cada condición de mezclas arena- escoria se moldearon y vaciaron dos cilindros, a partir de los cuales se maquinaron probetas de tensión de acuerdo con la norma ASTM E8 [55]. Primero se redujo el diámetro de la probeta a 8 mm, después se redujo el diámetro sobre la longitud calibrada manteniendo una relación 4:1 entre la longitud calibrada y el diámetro. Finalmente se realizó el radio de las probetas el cual fue de 4 mm. La longitud calibrada de cada probeta fue de 24mm. El maquinado de las probetas se realizó en un torno marca DMTG modelo CDL6251.

Para el ensayo de tensión se utilizó una máquina de ensayos universales mostrada en la **Fig. 18**. Las probetas se colocaron de manera vertical y se sujetaron para después ensayarse a una velocidad de 5mm/seg hasta llegar a la fractura según lo establecido en la norma ASTM E8 [55]. Para cada condición se realizó el ensayo por duplicado. Los datos de cada ensayo se procesaron con el software Trapezium y para cada condición evaluada se determinó el esfuerzo máximo, reportándose el promedio de los dos ensayos.

3.5 Análisis estadístico.

Se analizó el proceso de moldeo autofraguante mediante el sistema fenólico uretano para determinar los factores que podrían condicionar la calidad del producto final en términos de microestructura de solidificación, propiedades mecánicas y acabado de las piezas vaciadas. Los factores encontrados fueron: la cantidad posible de escoria a usar, la granulometría de la mezcla y la cantidad de resina en el sistema autofraguante. El diseño factorial que se utilizó para esta investigación fue de tipo 3^3 , lo que significa que se tendrán los tres factores anteriores en tres niveles. Se utilizaron tres cantidades de escoria: 10%, 30% y 50%, tres granulometrías: finos (120AFS), medios (90AFS) y gruesos (60 AFS), así como también tres niveles de aglutinante: 6%, 7% y 7.5%. Con las cantidades anteriores se realizaron 27 experimentos evaluando las propiedades de moldeo de las mezclas: resistencia a la compresión, estabilidad y permeabilidad; la refractabilidad de los moldes; el tamaño de grano y las propiedades mecánicas mediante pruebas de tensión y de dureza. Finalmente, se utilizó el software Minitab para realizar el análisis estadístico y así determinar los efectos principales y combinados de los factores evaluados sobre las propiedades anteriormente señaladas.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4. 1 Introducción.

En esta sección se presentarán y discutirán los resultados obtenidos del acondicionamiento de las mezclas iniciales y de las pruebas para establecer las cantidades de resina y catalizador a utilizar del sistema fenólico uretano. Posteriormente se discutirán los resultados de la evaluación de las mezclas arena-escoria con diferente granulometría, porcentaje de resina y porcentaje de escoria de horno de arco eléctrico. También se discuten los resultados del proceso de moldeo, vaciado e inspección mediante líquidos penetrantes de piezas terminadas, así como de las pruebas de recuperación térmica de las mezclas arena-escoria utilizadas.

De igual manera se presentan los resultados de la evaluación de la refractabilidad de moldes hechos con las diferentes mezclas de moldeo, para lo cual se utilizaron los datos de las curvas de temperatura en función del tiempo. Así mismo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de microdureza de las piezas, mediciones de tamaño de grano y determinación de esfuerzos máximos en tensión junto con su correspondiente análisis estadístico.

4. 2 Resultados de acondicionamiento para el sistema autofraguante.

4. 2. 1 Resultados del porcentaje de humedad y mediciones de pH.

Inicialmente, las mezclas de arena- escoria que provenían de un proceso de moldeo y vaciado en arena en verde de un estudio previo [49], se pesaron para calcular el tamaño adecuado de las cajas de moldeo para pieza y probetas a vaciar. La nomenclatura de las muestras iniciales se basó en la **Tabla 10**, que describe las tres variables y los niveles usados.

Tabla 10. Variables y niveles usados en un trabajo previo de moldeo en arena en verde.

PORCENTAJE DE EHA	GRANULOMETRÍA	PORCENTAJE DE BENTONITA
A=10%	Finos (F)= 120 AFS	1= 3%
B=30%	Medios (M)= 90 AFS	2= 4%
C=50%	Gruesos (G)= 60 AFS	3= 5%

Dichas mezclas contenían un porcentaje de agua, el cual para un moldeo en arena en verde va de 1.5 y 8% [8], por lo cual se secaron para poder ser utilizadas para un moldeo mediante el sistema fenólico uretano. Es importante evitar la presencia de humedad en estas mezclas para evitar la pérdida de fuerza entre sus enlaces de la cadena del polímero, que es corta y poco reticulada debido a la velocidad del catalizador, la cual para este sistema es de una

velocidad rápida [56]. Otro efecto significativo es que la presencia de humedad disminuye la resistencia del molde y acorta la vida útil de banco. A temperatura ambiente solo es aceptable un 0.2% de humedad en la arena para que el sistema funcione correctamente; para una temperatura mayor, la cantidad máxima es de 0.1% [22].

Se midieron los porcentajes de humedad inicial de cada muestra y los resultados, que se presentan en la **Tabla 11**, muestran que las mezclas que contenían mayor humedad fueron principalmente de granulometría fina, con 30% y 50% de escoria y con porcentajes de bentonita de 6% y 8%. Las mezclas que tenían menor humedad se caracterizan por tener granulometrías gruesas y medias, con cantidades de 10% y 30% de escoria. De acuerdo con los resultados se aprecia que en general las mezclas tuvieron una pérdida de humedad de alrededor del 7%, lo cual fue benéfico para minimizar los tiempos de secado de las muestras. Basado en estos resultados el proceso de secado se realizó en una mufla a 150°C por 1 hora. Posteriormente se evaluó la cantidad de humedad en cada una de las muestras, resultando en todos los casos un valor menor a 0.1%.

Tabla 11. Resultados del porcentaje de humedad inicial de las 27 muestras originales.

MUESTRA	HUMEDAD (%)	MUESTRA	HUMEDAD (%)	MUESTRA	HUMEDAD (%)
AG1	0.85	BG1	0.60	CG1	0.80
AG2	0.90	BG2	0.85	CG2	0.73
AG3	0.92	BG3	1.01	CG3	1.20
AM1	0.60	BM1	0.80	CM1	0.50
AM2	0.78	BM2	1.10	CM2	1.20
AM3	0.83	BM3	1.20	CM3	1.20
AF1	1.00	BF1	1.20	CF1	2.00
AF2	1.22	BF2	3.70	CF2	2.80
AF3	2.40	BF3	3.80	CF3	3.40

El pH es un indicador del grado de acidez o alcalinidad de una muestra y se mide en una escala, donde valores de 1 a 7 son condiciones ácidas y de 8 a 14 condiciones alcalinas [8]. En cuanto a los tiempos de moldeo y desmoldeo, cuando se tiene una arena alcalina, estos tiempos se incrementarán y con una arena ácida sucede lo contrario [56]. Los resultados de las mediciones de pH de las mezclas arena-escoria representativas de cada grupo se presentan en la **Tabla 12**. Estas mezclas se seleccionaron considerando principalmente la cantidad de escoria y las granulometrías.

Tabla 12. Resultados de las mediciones de pH en mezclas representativas.

MEZCLA	pH	MEZCLA	pH	MEZCLA	pH
AF2	9.54	BF1	9.45	CF3	9.72
AM3	9.19	BM2	9.63	CM1	9.43
AG1	9.33	BG3	9.44	CG2	9.45

Como se observa en los resultados, las muestras caen en la escala de condición alcalina. Las muestras que tienen un valor de pH más alto fueron 9.54 para AF2, 9.63 para BM2 y 9.72 para CF3. De acuerdo con los valores anteriores, la mezcla CF3 registro el valor más alto de pH ya que tiene mayor cantidad de escoria y, por lo tanto, mayor cantidad de CaO, esto lo vuelve una mezcla de arena- escoria más alcalina.

4. 2. 2 Resultados de determinación de las condiciones para el sistema autofraguante.

Como se ha mencionado el sistema fenólico uretano requiere del empleo de un catalizador que ayuda a acelerar la reacción. En este caso se contaba con dos tipos de catalizadores los cuales eran catalizador: 3501 y el catalizador 3451. La cantidad de catalizador que se utiliza es de 6% a 8% en relación con el peso de la resina parte 1, por lo que se realizaron experimentos con esas cantidades para comprobar su efectividad. La proporción utilizada entre las partes 1 y 2 de resinas para sistema fue de 60/40 y la cantidad de resina total fue del 2% con respecto peso de la arena, que es la comúnmente la cantidad utilizada, aunque algunos especialistas modifican esta proporción para fines específicos [22].

Los resultados de estas pruebas se muestran en la **Tabla 13**, y de acuerdo con ellos, el catalizador más rápido fue el 3501 con tiempos de fraguado menores de 5 y 6 minutos. En cuanto a la cantidad de catalizador a utilizar, no hubo gran diferencia, por lo que se optó por utilizar el 6% de catalizador. El criterio que se siguió para saber si estaba completamente fraguada la probeta, fue el de tiempo de desmolde T_s ; el cual es de 5 a 8 minutos, y se define como el tiempo en el que la mezcla de moldeo alcanza la resistencia a la compresión para que pueda ser desmoldada sin dañarse [1].

Tabla 13. Resultados del tiempo de endurecimiento para cada tipo de catalizador.

CANTIDAD DE CATALIZADOR (%)	TIPO DE CATALIZADOR	TIEMPO DE ENDURECIMIENTO (min)
6%	3501	5
	3451	23
8%	3501	6
	3451	11

Para evaluar todas estas cantidades se realizaron probetas de arena, las cuales se muestran en la **Fig. 23**. En la **Fig. 23 C)** y **D)**, se observa que las probetas hechas con el catalizador 3451 presentaron una superficie que se desintegraba al manipularlas, lo cual indicaba que aún no estaban completamente fraguadas debido a que la reacción fue demasiado lenta.



Figura 23. Probetas A) y B) hechas con catalizador 3501, y C) y D) hechas con catalizador 3451.

Para comprobar la cantidad de resina que se debe de agregar para que el sistema funcione correctamente, se realizaron probetas comenzando con el nivel más alto de uso del sistema, que es 2%, pero este no funcionó, por lo que se requirió aumentar más el nivel del sistema llegando hasta las cantidades de 6.5, 7.0 y 7.5% de resina total. Debido a que la escoria contiene 30-50% de CaO, se necesitó triplicar el nivel del sistema aglomerante, ya que este mineral provoca un aumento en la demanda de aglutinantes [18, 21, 32]. Estos niveles de resina son altos, pero se espera que el moldeo sea eficiente y se logren piezas con un acabado superficial adecuado. Las probetas realizadas se muestran en la **Fig. 24**, las mezclas elegidas para realizar estos experimentos fueron las que tenían mayor porcentaje de escoria, ya que era el principal factor de riesgo, debido a que la escoria contiene diferentes tipos de óxidos además de SiO₂, por lo que debía de cerciorarse que el sistema de moldeo endureciera completamente.

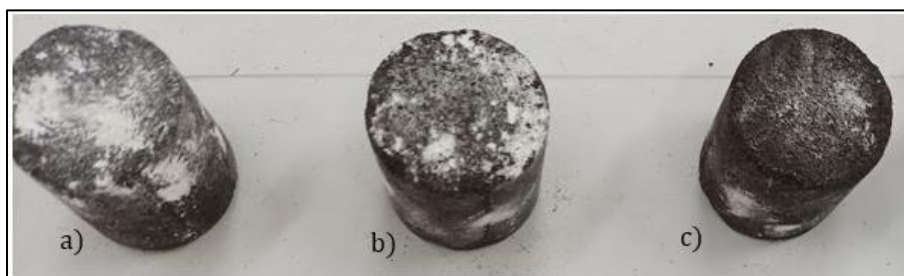


Figura 24. Probetas realizadas con mezclas arena- 50% escoria con los siguientes porcentajes de resina a) 6.5%, b) 7% y c) 7.5%.

Considerando lo anterior, las variables y niveles utilizados en el diseño experimental del presente trabajo se muestra en la **Tabla 14**. En general los resultados de la elaboración de moldes con las mezclas de arena- escoria demostraron que, para las mezclas de tamaño grueso, las probetas quedan más compactadas, mientras que para las de granulometría fina sucedía lo contrario. En cuanto a la cantidad de escoria en la mezcla, se observó que, a mayor cantidad de escoria, la aglomeración o resistencia del molde tiende a disminuir.

Tabla 14. Variables de estudio para la elaboración de los moldes en el presente trabajo.

PORCENTAJE DE EHAE	GRANULOMETRÍA	PORCENTAJE DE AGLUTINANTE
A=10%	Finos (F)=120AFS	1=6.5%
B=30%	Medios (M)= 90AFS	2=7.0%
C=50%	Gruesos (G)= 60 AFS	3=7.5%

4. 3 Resultados de evaluación a las mezclas de moldeo y vaciado de piezas.

4. 3. 1 Resultados de estabilidad, compresión y permeabilidad de mezclas arena- escoria.

Los resultados de las pruebas de estabilidad se muestran en la **Fig. 25**, agrupadas según las diferentes cantidades de escoria en las mezclas. La estabilidad se midió como la diferencia de pesos de probetas sometidas al movimiento del Ro-tap (ver **Fig.17**), el cual es un movimiento mecánico de rotación con golpes verticales y se representa en porcentaje.

Se observa que para las muestras de arena- 10% escoria de horno de arco eléctrico, los resultados entre las 3 granulometrías no fueron variables, las muestras que destacan son las que contienen 6% de aglutinante y de granulometría de fina y media. En esta misma figura se observa que a mayores cantidades de escoria, el porcentaje de estabilidad disminuye, esto se debe a la forma irregular de los granos de escoria, los cuales provocan que se tengan superficies sin enlaces químicos. Cabe señalar que la cantidad de aglutinante no muestra afectaciones en los resultados, a diferencia de la granulometría y de la cantidad de escoria.

Los resultados de las pruebas de compresión se muestran en la **Fig. 26**, en función de la cantidad de EHAE. En el caso de las mezclas que contienen arena- 10% escoria, se observa que conforme aumenta la granulometría, el esfuerzo máximo de compresión aumenta únicamente para niveles de aglutinante de 7.0 y 7.5%. Se observa que las muestras hechas con arena- 10% escoria tuvieron resultados más altos en comparación con los otros dos porcentajes de escoria en la mezcla. Conforme aumenta la cantidad de escoria en la mezcla disminuye el esfuerzo máximo y del mismo modo con menores niveles de aglutinante. Sin embargo, es óptimo utilizar de 10 a 30% de escoria en la mezcla, con granulometría media a gruesa y niveles de aglutinante de 7.0 y 7.5% para obtener valores de esfuerzo de compresión máximos y de esta manera el molde pueda soportar el peso del metal fundido. Cabe señalar

que la granulometría fue el principal factor que influyo en los resultados del esfuerzo máximo, ya que conforme se aumentó el tamaño de las partículas, el esfuerzo aumento.

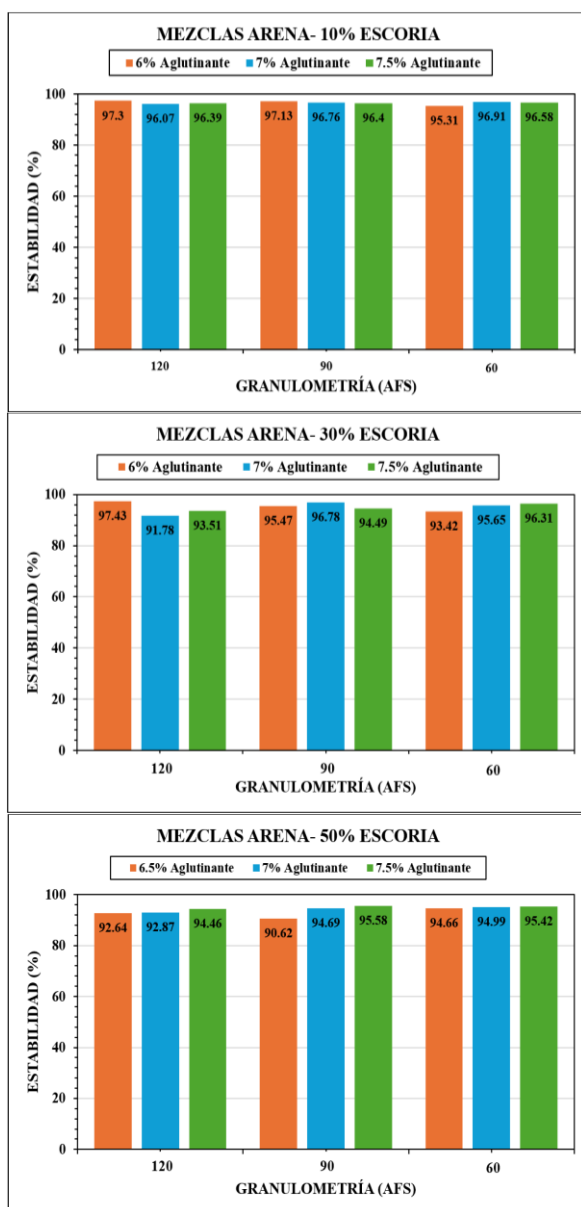


Figura 25. Resultados de estabilidad en función de granulometría y cantidad de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.

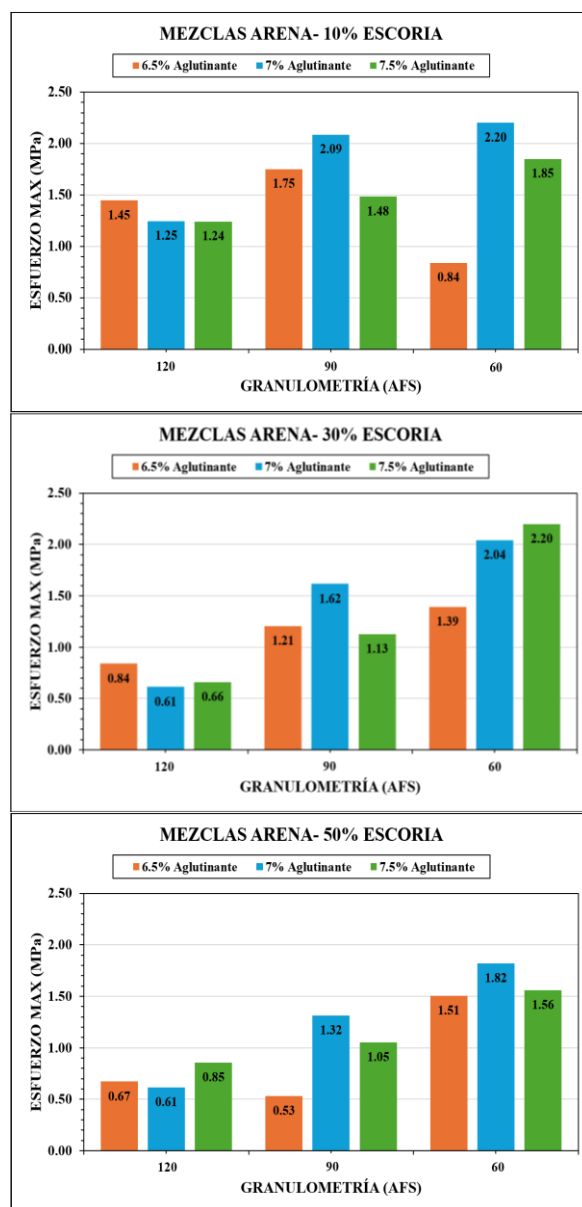


Figura 26. Resultados de compresión en función de granulometría y cantidad de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.

Debido al uso de un sistema de moldeo autofraguante fue necesario realizar pruebas de permeabilidad de todas las mezclas arena- escoria, ya que el valor de esta propiedad es clave para obtener piezas de calidad. Los resultados de la evaluación de la permeabilidad se

muestran en la **Fig. 27** para cada grupo de mezclas en función del porcentaje de escoria. La permeabilidad es un número adimensional de acuerdo con el método estándar por la *American Foundry Society* [57]. En cada una de las gráficas se muestra el rango de permeabilidad para el sistema autofraguante fenólico uretano en probetas hechas únicamente con arena de sílice, el cual es de 160 a 175 [58].

Para el caso de las muestras con arena- 10% escoria, se observa que se obtuvieron permeabilidades más bajas en comparación con los valores registrados en la literatura, los cuales son de 165 a 170 y este rango de valores se denota con líneas punteadas rojas en la **Fig. 28** [58]. Las muestras con arena- 30% escoria y arena- 50% escoria dieron resultados más cercanos a los valores de la literatura, sin embargo, las muestras que son óptimas para obtener valores de permeabilidad adecuados son con granulometría gruesa, nivel bajo de aglutinante y con relación de arena- 30% escoria. Para el caso de la relación arena- 50% escoria se debe utilizar nivel bajo de aglutinante y granulometría fina o gruesa. Existe otra posibilidad para el caso de utilizar la relación arena- 50% escoria, pero con granulometría y nivel medios de aglutinante.

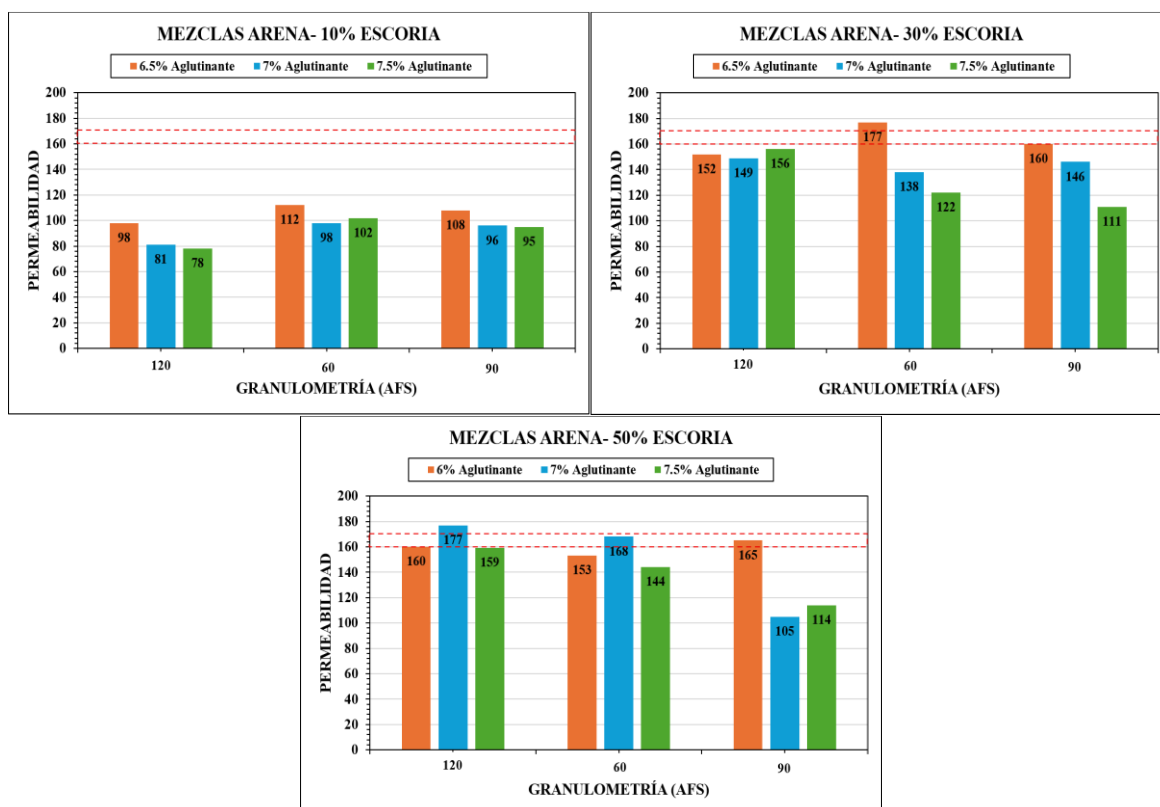


Figura 27. Resultados de permeabilidad en función de la granulometría y nivel de aglutinante para los tres grupos de % de EAHE.

Cabe señalar que la permeabilidad es la capacidad de flujo de los gases generados durante el vaciado en el molde, y cuanto menor sea la permeabilidad será más difícil que los gases salgan, afectando así la calidad de la pieza. Las muestras con arena- 10% escoria en las tres granulometrías mostraron los valores más bajos de permeabilidad, conforme aumento la cantidad de escoria también aumento el valor de permeabilidad, además también se observa que para granulometría fina la permeabilidad disminuye y para granulometría media y gruesa aumenta la permeabilidad, debido a que se tiene una estructura porosa y los gases generados salen con facilidad.

Otro factor que influye también es el contenido de aglutinante, se observa que para las tres granulometrías la permeabilidad disminuye conforme aumenta la adición de aglutinante; esto se debe a que al tener más cantidad de aglutinante se generan más enlaces de unión entre cada grano de la mezcla y estos tapan los poros o huecos para que los gases puedan salir. El empleo de un sistema autofraguante fenólico uretano resulta ser conveniente, debido a que no se generan subproductos cuando sucede la reacción con el metal fundido, únicamente se generan gases de descomposición de los aglutinantes, en comparación con otros tipos de moldeo, por ejemplo, el moldeo en verde, en donde la humedad en esos moldes disminuye la permeabilidad ocasionando más defectos en la pieza [59].

4. 3. 2 Resultados de la medición de refractabilidad de los moldes.

Inicialmente se elaboraron dos moldes para tener una referencia de los procesos de moldeo convencional, así como de los tiempos de moldeo y facilidad para moldear. El primer molde que se realizó fue de arena sílice nueva con una granulometría media, para el cual solo se requirió el 2% del sistema de resina para que el molde quedará completamente endurecido. El segundo molde que se elaboró fue de arena sílice nueva con un 30% de escoria de horno de arco eléctrico (EHAE); en este caso la arena era nueva y no contiene bentonita de algún proceso anterior. Este molde se realizó utilizando una granulometría gruesa en la mezcla y un 7% de resina en el sistema.

Para las mediciones de refractabilidad se utilizaron dos termopares situados a una profundidad de 2.0 cm dentro del molde en las posiciones descritas en la **Fig. 22b**, ya que, como se trata de una pieza con diferentes espesores (yunque), es importante conocer como es el flujo de calor en las direcciones principales de la pieza. La medición de temperaturas se realizó en función del tiempo para cada uno de los dos moldes fabricados con el objetivo de evaluar, en el primer caso, como influyen las diferentes variables estudiadas en la refractabilidad de la mezcla de moldeo; y en el segundo caso, para investigar si la presencia de bentonita que estaba contenida en las mezclas originales de estudio podría tener algún efecto sobre la refractabilidad de los moldes. Las mediciones se realizaron a partir de que se terminó de vaciar cada molde con la aleación de aluminio previamente fundida en un horno de gas.

En la **Fig. 28 a)**, se muestran las dos temperaturas registradas para el molde que se realizó completamente de arena y en la **Fig. 28 b)** para un molde con arena- 30% de escoria. En el primer caso se observa que ambos termopares registraron un incremento inicial de la temperatura hasta alcanzar un máximo, que fue mayor para el caso del termopar 2, seguido de una caída gradual que fue más lenta para el caso del termopar 1. Este comportamiento es el esperado para este tipo de moldes, en donde la pendiente en el descenso de la temperatura puede tomarse como una medida de la refractabilidad del molde, siendo esta mayor cuanto menor sea dicha pendiente. Los cambios entre ambos termopares son producto de las formas de las intercaras molde metal, siendo las líneas de flujo de calor divergentes en el molde las que muestran mayores restricciones para su paso a través del molde, es decir representan una mayor refractabilidad; al contrario de las intercaras con líneas de flujo de calor unidireccionales o líneas de flujo de calor convergentes [16].

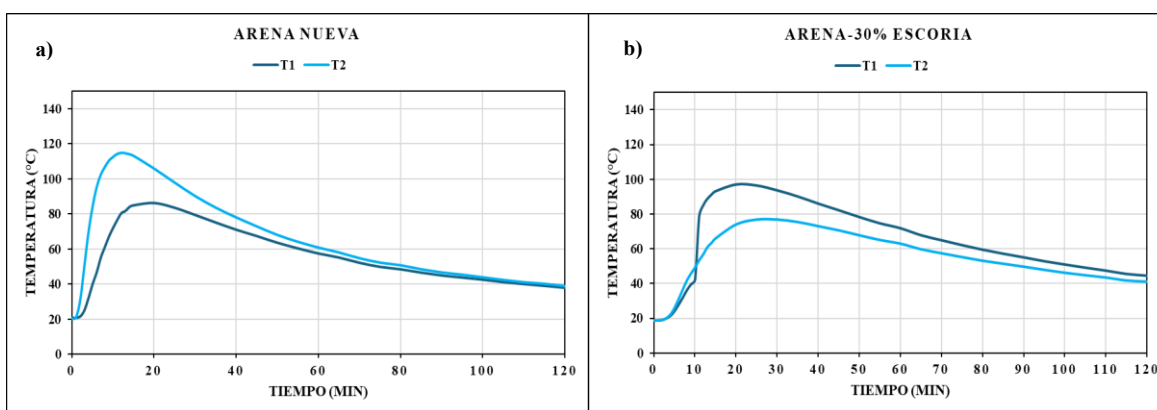


Figura 28. Curvas de temperatura en función del tiempo, a) para un molde con arena nueva y b) para un molde con arena nueva- 30% escoria.

Para el molde con arena-30% escoria se observó un comportamiento similar, sin embargo, existe un retraso en el incremento inicial de la temperatura, lo cual sugiere una mayor refractabilidad inicial del molde, además de que la caída de las curvas es más atenuada, por lo que se concluye que es mejor la refractabilidad de este molde. También se observó que la temperatura máxima registrada fue menor con respecto al molde fabricado solo con arena y que correspondió al termopar 1, mientras que el termopar 2 registró una menor temperatura, lo cual se interpreta como una reducción en la velocidad de transferencia de calor en las intercaras molde metal con líneas de flujo unidireccionales.

Para el caso de las 27 mezclas de moldeo evaluadas se registraron también las curvas de temperatura vs tiempo, las cuales se presentan en las **Figs. 29, 30 y 31** agrupadas en función de las diferentes cantidades de escoria respectivamente e incluyendo las curvas del molde estándar realizado con arena de sílice nueva. De manera general todas las curvas mostraron un comportamiento similar al descrito para el molde con 30% de escoria de la **Fig. 28**,

mostrando diferencias en la temperatura máxima alcanzada y en la caída de la temperatura para las distintas combinaciones de granulometrías y cantidad de resina en las mezclas.

Específicamente en la **Fig. 29**, el molde AG2, el cual contiene 10% de EHAE, granulometría gruesa y 7% de resina, fue el que tuvo una refractabilidad mayor, ya que fue el que registro menores temperaturas en sus dos termopares. Los moldes que registraron menor refractabilidad fueron el molde AG1 y AG3 en los termopares T2 y T1 respectivamente. Se muestran también las curvas de temperaturas para los moldes con granulometría media y 10% de escoria. Para el caso del molde AM2 los termopares registraron menores temperaturas en comparación con los moldes AM1 y AM3, específicamente en los termopares que registraron la temperatura T2 los cuales marcaron temperaturas más altas.

En el caso de las curvas de enfriamiento para los moldes con granulometría fina y 30% de escoria, la mayoría de las curvas coinciden entre sí, únicamente destacan las curvas del molde AF2 en el cual los termopares tuvieron mucha diferencia de temperatura por lo cual se puede inferir que en el proceso de moldeo, éste no quedo compactado uniformemente y se crearon espacios por los que el calor de la pieza saliera de esta, creando una solidificación de la pieza más rápida en ciertas partes de esta. En cuanto al molde AF3, el cual tiene 7.5% de resina se observa que sus curvas de enfriamiento coinciden más los valores entre sí y tienen una caída más baja, por lo que es una buena receta para lograr un molde con la capacidad de refractabilidad más alta y además permite que la pieza solidifique de manera homogénea.

La **Fig. 30**, muestra las curvas de temperaturas registradas para los moldes hechos con arena-30% de escoria de granulometría gruesa, media y fina. Para este caso de curvas todas siguen un patrón similar, siendo el molde BG3 el que muestra un comportamiento más refractario en comparación a todos los demás, ya que llego hasta los 90°C a un tiempo más largo. Para el caso de los moldes con granulometría media, es muy notorio los cambios de temperaturas en estos moldes siendo el molde BM1 el más refractario y con un enfriamiento del molde más homogéneo, como se puede observar por la coincidencia de las curvas de los dos termopares en este molde, el cual tenía 6.5% de resina. Las curvas de enfriamiento para los moldes hechos con granulometría fina muestran un comportamiento más irregular en el aumento de temperatura, específicamente para los moldes BF3 y BF2. Para este grupo el molde BF1 mostró menos propiedades de refractabilidad.

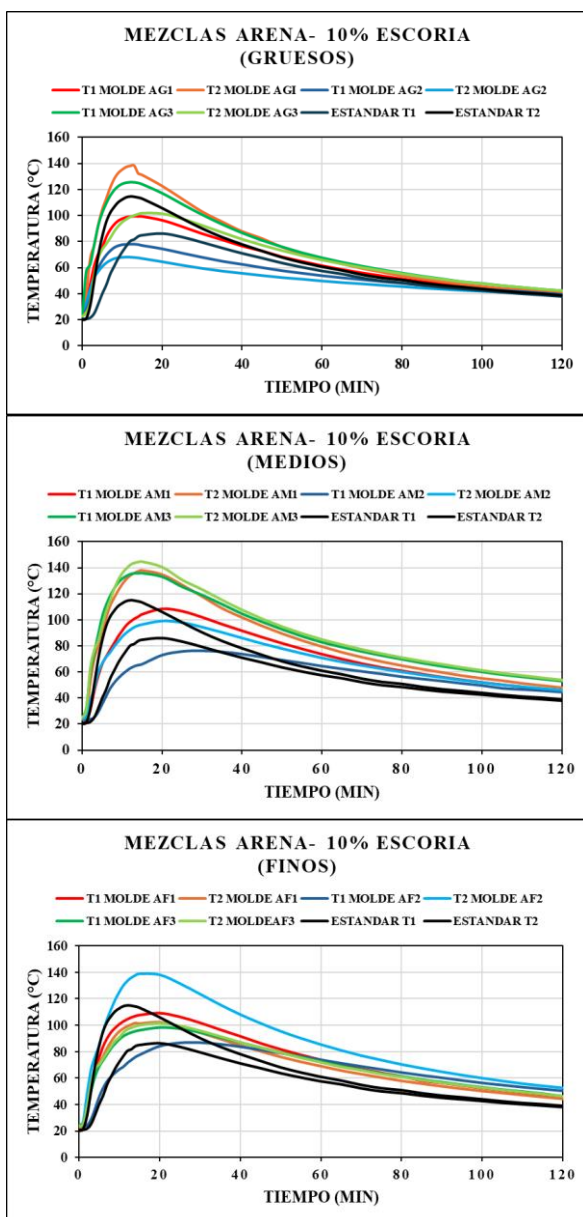


Figura 29. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 10% escoria.

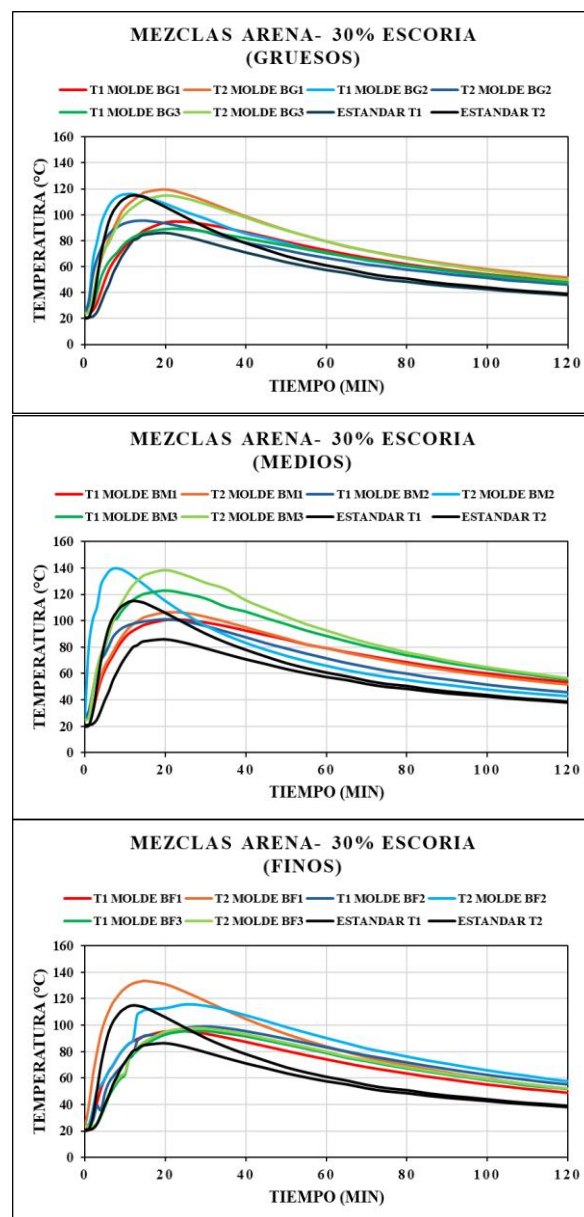


Figura 30. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 30% escoria.

La **Fig. 31** muestra las curvas de enfriamiento registradas para los moldes hechos con arena- 50% de escoria y diferentes combinaciones de granulometría y cantidad de resina. De manera general este grupo de moldes presentaron mejores características de refractabilidad, las cuales se asocia a la cantidad de EHAE utilizada. El molde que destaca en este caso es el CG2, ya que su curva tiene una caída más baja en comparación con el molde CG1. En las curvas para granulometría media, se muestra que las curvas en general tienen una caída más baja en temperaturas, pero aun así los termopares registraron temperaturas diferentes en sus posiciones. Únicamente el molde CM3 mostro menos variación por lo que lo convierte en una receta atractiva en este grupo de moldes. La diferencia de temperaturas entre los

termopares se debe a la geometría de la pieza, debido a que cada termopar se colocó en diferente posición (ver **Fig. 29**). En una superficie cóncava el flujo de calor es más lento, es decir, más refractario por lo que las temperaturas de T1 son menores a T2 [16].

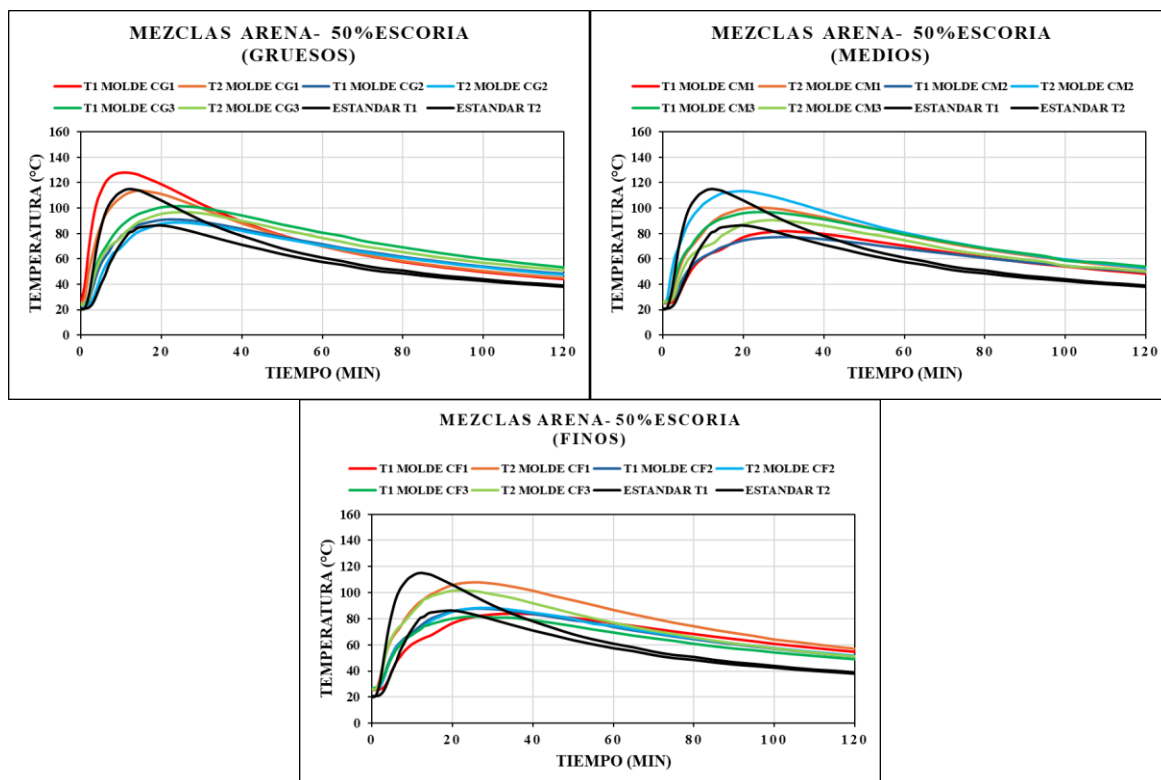


Figura 31. Curvas de temperatura en función del tiempo para mezclas arena- 50% escoria.

En cuanto a la granulometría fina, podemos observar que los moldes fueron más refractarios y que el molde óptimo fue el CF2. Los moldes que se realizaron con 50% de escoria fueron los que presentaron temperaturas más bajas por lo que quiere decir que guardaron mejor el calor de la pieza que se estaba solidificando, siendo más específicos los moldes con granulometría fina y 7.0% de resina los que mostraron mejores propiedades de refractabilidad. La literatura menciona que la refractariedad de un molde es directamente proporcional al porcentaje de SiO_2 que contenga la arena e inversamente proporcional a la cantidad de FeO [18]. Aunque los resultados muestran que al adicionarle escoria de horno de arco eléctrico a la arena se provoque que el molde fuera más refractario, esto puede atribuirse a la presencia de los otros óxidos en la escoria tales como el CaO y el Al_2O_3 y a otro tipo de óxidos de Fe presentes también en la escoria.

Los resultados de la determinación de los coeficientes de conductividad térmica calculados con la ecuación (3) para muestras seleccionadas se presentan en la **Fig. 32**. Los coeficientes reportados representan el promedio de los últimos 4 puntos (ver **Fig. 32**), debido a que al momento de que el metal está en contacto con el molde de arena se generan gases por la descomposición de aglutinantes y humedad residual en la arena, los cuales provocan que la conductividad térmica del molde no sea estable [60]. Para estas gráficas se muestra el valor de coeficiente de conductividad térmica k de los dos termopares en cada molde en función del tiempo; las líneas de color naranja indican los valores para el termopar 1 (T1) y las líneas azules indican los valores para el termopar 2 (T2). En el caso de las curvas para las muestras AG1, BG3 y CG2, los valores tienden a ser cercanos a cero, sin embargo, no son valores negativos.

Se observa que los valores de k al inicio son muy variables para todas las muestras, sin embargo, después de los 4200 segundos de solidificación comenzaron a marcar resultados lineales, excepto la muestra BM2, en la cual podemos observar que los valores entre los dos termopares están distantes, esto puede deberse a que la compactación del molde no fue homogénea. El flujo de calor de una superficie cóncava es más lento y convergente en comparación con una superficie plana, ya que para este último es más rápido el flujo de calor. Lo anterior se puede observar en las curvas de la **Fig. 35**, ya que se observa que el termopar 1 (curva color naranja) fue posicionado en la forma cóncava de la pieza a vaciar y los valores para k fueron menores y para el termopar 2 (curvas de color azul) mostraron resultados más altos después del punto máximo [16].

Después de analizar por separado los valores del coeficiente de conductividad térmica, estos se agruparon de acuerdo con el porcentaje de escoria en la mezcla, como se observa en la **Fig. 36**. Los valores más bajos del coeficiente de conductividad térmica lo obtuvieron mezclas con 10% y 50% de escoria, específicamente con el nivel más alto de aglutinante, (AF3 y CF3). Lo anterior pudo deberse a que las partículas de la mezcla arena- escoria tienen enlaces más fuertes debido al nivel más alto de aglutinante.

En cuanto a muestras con granulometría media, los valores menores los obtuvieron nuevamente en las mezclas con 10% y 50% de escoria. En particular es de notar que, para valores elevados de escoria, la cantidad de aglutinante no parece modificar la capacidad de conductividad térmica de las mezclas evaluadas. Sin embargo, para bajos porcentajes de escoria la cantidad de aglutinante debe de ser de bajo a medio para disminuir los coeficientes de conductividad. También es importante notar que para valores medios de escoria (30%) y de aglutinante se tiene las condiciones de mayor conductividad térmica, tanto para granulometrías finas como para granulometrías medias, lo cual sugiere una combinación que maximiza la capacidad de transferencia de calor de las mezclas de moldeo.

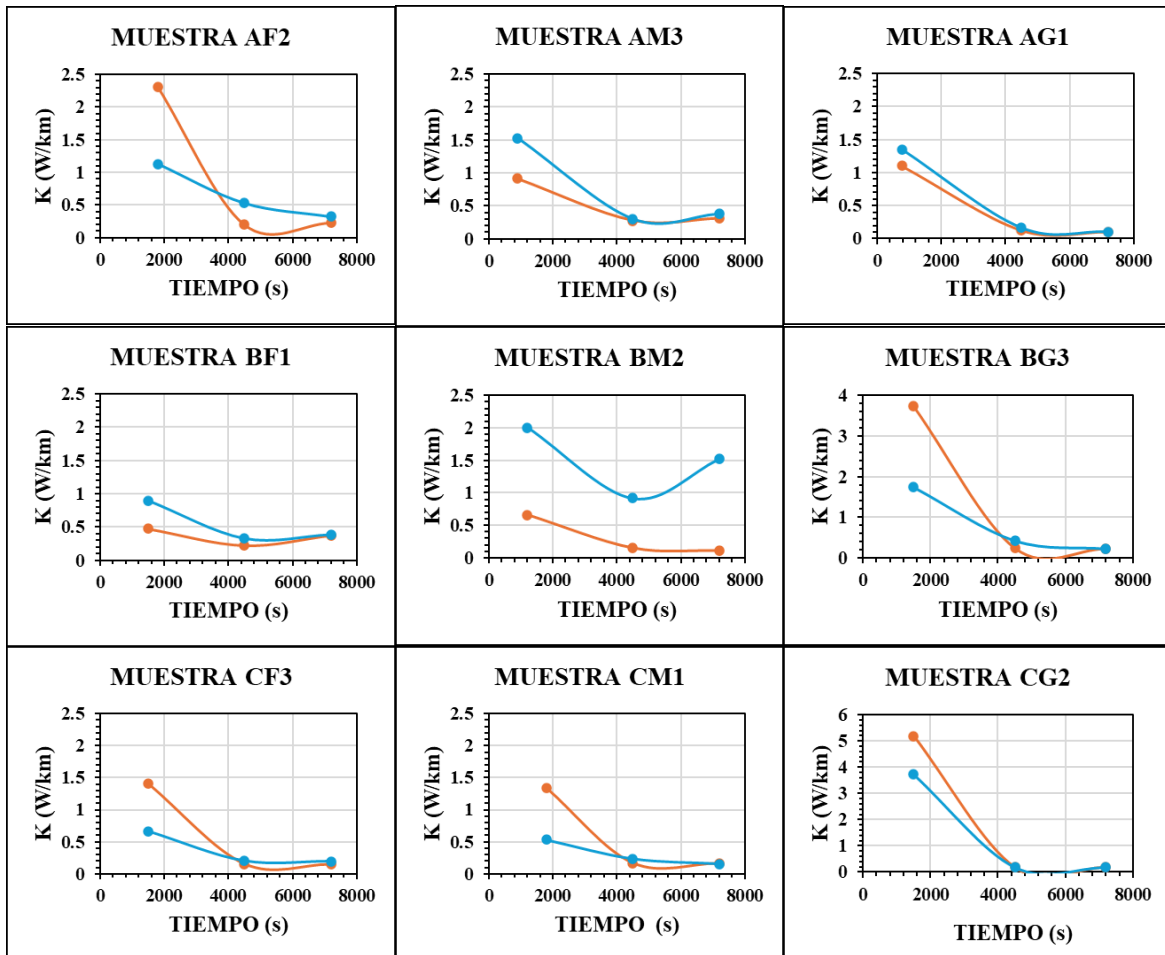


Figura 32. Graficas del coeficiente de conductividad térmica k en función del tiempo para las muestras representativas de cada grupo de % de EHAE.

Es importante notar que, para la combinación de baja escoria y elevado aglutinante, así como para la de alta escoria y bajo aglutinante se obtuvieron valores elevados de k , lo cual pudiera deberse en parte a una mala compactación del molde, debido a que, si se tiene un valor alto de k , significa que el molde es menos refractario. Otro aspecto que puede modificar la capacidad de transferencia de calor en los moldes es la forma de las partículas de escoria, ya que, al no ser angular, esto puede modificar la forma en que se une con la resina, modificando así la capacidad de transferencia de calor.

La microestructura de una pieza de fundición depende de las condiciones en las que fue vaciada, de la limpieza del metal y de las propiedades termofísicas del molde (difusividad térmica y el coeficiente de conductividad térmica) [61]. La teoría señala que, la conductividad térmica de los moldes hechos con moldeo en verde disminuye con contenidos altos de bentonita, debido a que se forman puentes de gotas de agua lo cual provoca la formación de sitios que sean malos conductores de calor [62]. En cambio, cuando se utiliza moldeo con sistemas autofraguantes el calor que se desprende de la pirolisis afecta el estado del molde,

teóricamente se dice que no es posible determinar un valor específico de la conductividad térmica con este moldeo. Sin embargo, aunque es poco investigado se recomienda cambiar la matriz de moldeo por materiales aditivos como es el grafito o escorias de acero, como es el caso de esta investigación [60].

Los valores típicos del coeficiente de conductividad térmica, para moldeo con arena de sílice pura se observan delimitados por la línea punteada roja en la **Fig. 33**, y son del orden de 0.5-0.8 W/mK y dependen del tipo de arena, de la granulometría y de la forma de los granos de arena [63]. Así mismo se ha reportado que para las escorias de horno de arco eléctrico los valores típicos para esta propiedad están en el rango de 0.85 a 1.7 W/mK [50, 64]. En este estudio se encontraron diferencias entre los valores del coeficiente de conductividad térmica para todas las mezclas de arena-escoria evaluadas, lo cual sugiere que cada mezcla representa una condición diferente de refractabilidad en el molde, obteniéndose valores entre 0.12 - 1.80 W/mk.

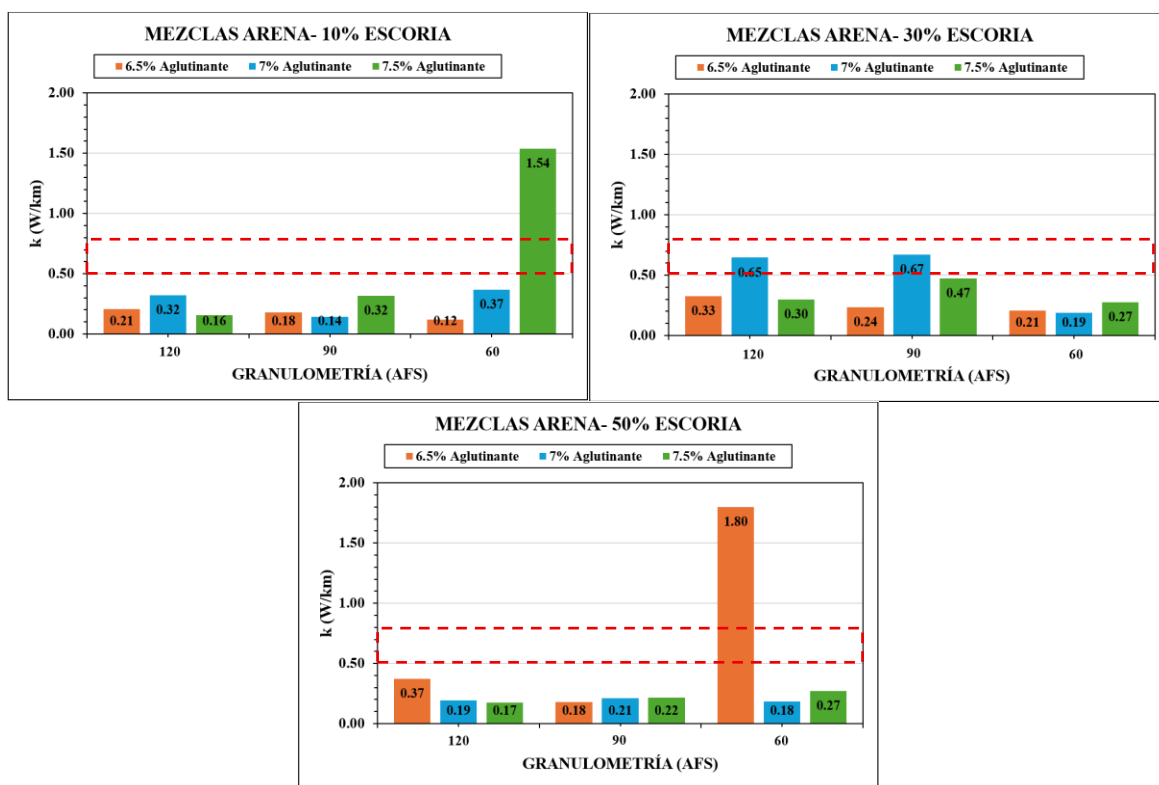


Figura 33. Resultados de los valores del coeficiente de conductividad térmica para mezclas agrupadas en función del porcentaje de EHAE en la mezcla.

A partir de los resultados se observó que 22 de las 27 recetas evaluadas tuvieron valores menores a 0.37 W/mK, lo cual supone valores más bajos a los esperados para las mezclas.

Esto sugiere que dichos valores de k son debido a las cantidades de resina utilizada (6.5 a 7.5% en peso), que representan del orden de 4 a 5 veces lo utilizado para los procesos de moldeo con arena autofraguante [65]. Las elevadas cantidades de resina utilizada son necesarias debido a los elevados contenidos de óxidos de hierro en las mezclas de moldeo, los cuales demandan mayor cantidad de resina para poder obtener buenas propiedades de moldeo [65]. Por lo tanto, se concluye que las grandes cantidades del polímero que recubre a las mezclas son las responsables de los bajos coeficientes de transferencia de calor en los moldes, lo cual provocan que en general los moldes sean más refractarios.

4. 3. 3 Evaluación superficial de las piezas vaciadas

El método de líquidos penetrantes permite examinar de manera profunda la superficie de una pieza fundida para detectar defectos superficiales que no se pueden ver a simple vista. En las **Figs. 34, 35 y 36** se muestran las piezas después de la aplicación de líquidos penetrantes y clasificadas de acuerdo con el porcentaje de escoria en la mezcla de moldeo.

En general se observaron menos defectos en las piezas que fueron moldeadas a partir de mezclas con contenidos de 10% y 30% de EHAE cuando las granulometrías fueron finas y medias. En la pieza BM3 se observan defectos de carbón lustroso, que se presentan en forma de arrugas en la pieza vaciada en exceso, pero cuando se sitúan entre la arena y el metal, mejoran la superficie de la pieza fundida [22]. Para contenidos de 50% de EHAE los mejores resultados se observaron para granulometrías medias y gruesas siendo en particular las piezas CG2 y CG3 las que muestran mejor acabado superficial.

En cuanto a la granulometría, podemos concluir que al utilizar una arena de grano fino se pueden obtener piezas con un acabado superficial más homogéneo, ya que cada grano logra situarse de manera ordenada logrando un mejor recubrimiento de toda la superficie de la pieza, lo cual minimiza los espacios vacíos que pueden generar defectos, por ello que las piezas con granulometría fina mostraron en general menos porosidades.



Figura 34. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 10% escoria.



Figura 35. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 30% escoria.

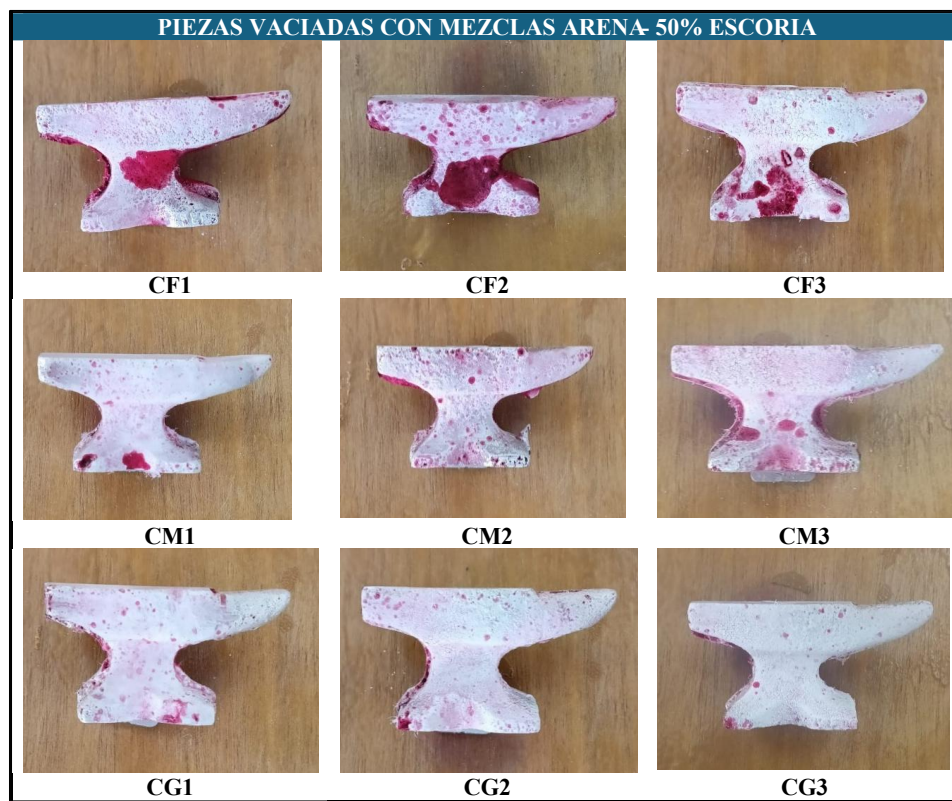


Figura 36. Evaluación con líquidos penetrantes de piezas vaciadas en mezclas arena- 50% escoria.

Aunque las piezas que se vaciaron en moldes con granulometría fina mostraron mejor acabado, también en este grupo hubo piezas que mostraron el peor acabado, por ejemplo, las piezas CF1, CF2, CG3 y AF2 ya que estas tienen poros grandes que abarcan casi la base de la pieza fundida, esto pudo deberse también a que al momento de sacar el modelo del molde este se rompía por la mala adherencia de los granos de la mezcla arena- escoria con el aglutinante. Debido a lo anterior las mezclas con arena-10% escoria y arena-30% escoria son las que dan piezas con mejor acabado superficial y poca presencia de porosidad, con cantidades de 6.5 y 7.0% de resina.

4. 3. 4 Resultados de la recuperación térmica de mezclas arena- escoria.

Para realizar las pruebas de recuperación térmica a las mezclas de arena- escoria, se escogieron las 6 muestras que mostraron los mejores resultados en cuanto a la microestructura de la pieza que se mostraran en la siguiente sección. En la **Fig. 37**, se muestran los resultados de LOI, es decir, la pérdida de peso de las mezclas al ser calentadas a temperaturas elevadas. Se graficaron en función de las temperaturas establecidas para cada recuperación para tres tiempos diferentes; en estas gráficas la línea roja punteada representa el porcentaje máximo aceptable de LOI para que la arena pueda ser utilizada nuevamente, el cual es de 2% [66, 67].

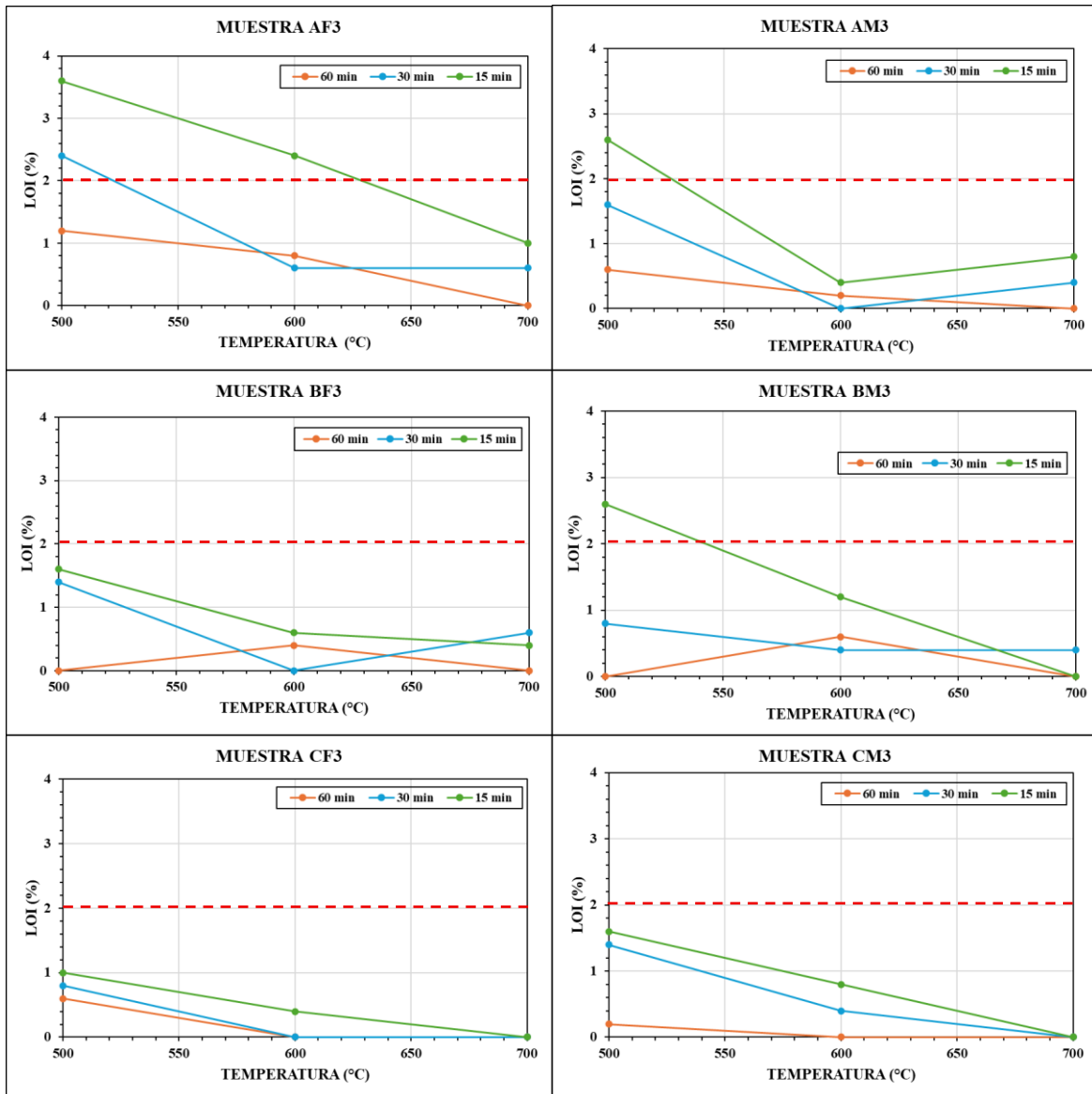


Figura 37. Resultados de LOI en función de la temperatura para diferentes tiempos de calcinación.

Se observa que para menor temperatura el porcentaje de LOI es alto, este sobrepasa el valor óptimo en las mezclas AF3, AM3 y BM3; esto se debe principalmente a que estas muestras contienen el nivel más alto de aglutinante, por lo que, a mayores temperaturas se observa que el valor de LOI disminuyó considerablemente para estas muestras. Conforme aumenta el porcentaje de escoria en la mezcla el valor de LOI es menor, aunque estas muestras sean calcinadas en un tiempo corto y menor temperatura. Investigadores señalan que la temperatura que debe utilizarse es de 800 °C [68], por lo que es posible recuperar las mezclas arena-escoria a temperatura de 500 °C y a tiempos de 15-30 minutos para ahorro energético, además los resultados de LOI son cercanos a 0% en la mayoría de los casos evaluados, por lo que es posible volver a utilizarlas teniendo defectos mínimos en las piezas de fundición debido a gases, específicamente las muestras BF3, CF3 y CM3 [68]. Es importante resaltar

que, aunque el moldeo con las EHAE consume altos valores de resina, es posible recuperar estas mezclas para volver a ser utilizadas, lo cual permite incrementar la rentabilidad del uso posterior de dichas mezclas, pudiéndose además llevar a cabo este proceso de recuperación térmica con tiempos y temperaturas menores a los convencionales, lo cual también podría representar un ahorro energético y de costos.

4. 4 Resultados de evaluación microestructural de piezas vaciadas

La caracterización microestructural se realizó a las 27 piezas fundidas, ya que las piezas se vaciaron en moldes con diferentes condiciones, por lo que algo muy importante es conocer como solidifico la pieza. Los moldes se elaboraron sustituyendo parcialmente arena por EHAE, además se utilizó el sistema autofraguante en tres diferentes niveles y las granulometrías de la arena y escoria que se manejaron fueron gruesos, medios y finos.

Además de elaborar los 27 moldes con las diferentes condiciones, se elaboró un molde con arena nueva sin escoria para tener una referencia de la forma de solidificación de las piezas en las condiciones estándar y así realizar una mejor comparación del efecto de la incorporación de escoria a las mezclas de moldeo. En la **Fig. 38**, se observa la microestructura de la aleación de aluminio vaciada en un molde con arena de sílice nueva. En la **Fig. 38 a)**, a bajos aumentos se observa una estructura dendrítica de α - Al y zonas interdendríticas donde hubo la formación de fases intermetálicas. En la **Fig. 38 b)**, a mayores aumentos se observó el patrón de segregación de soluto en la dendrita y la presencia del intermetálico Mg_2Si con una morfología de tipo esqueleto. Aunque esta morfología no es del todo perjudicial para las propiedades mecánicas, se puede refinar adicionando sodio o estroncio [69].

Es importante señalar que, aunque esta pieza fue vaciada en molde con arena nueva, las condiciones de refractabilidad no fueron las óptimas ya que no se logró formar una microestructura de granos completamente. Cuando un grano tiene morfología equiaxial se relaciona con el crecimiento planar que ocurre en la solidificación columnar, no obstante, pueden tener forma de dendrita inicialmente, con el tiempo se engrosan y se vuelven esféricos. Por ende, la forma final de un grano depende de los procesos de nucleación y crecimiento, además de un control de las condiciones de solidificación y también sobre los materiales de moldeo [70].

En las **Figs. 39, 40 y 41**, se observan las micrografías tomadas a 50X, de todas las muestras agrupadas por la cantidad de escoria en la mezcla. Principalmente observamos que las micrografías de las piezas vaciadas en moldes con arena- 10% escoria (ver **Fig. 39**) se obtuvieron en la mayoría granos, pero para el caso de la muestra AF2 la microestructura es dendrítica. En cuanto a la micrografía AM3 se observa en tonalidad amarilla el cambio de

composición química. Las micrografías de las muestras AM1, AG2 y AG3 presentaron problemas en cuanto a la oxidación de la pieza debido al tiempo de desbaste prolongado.

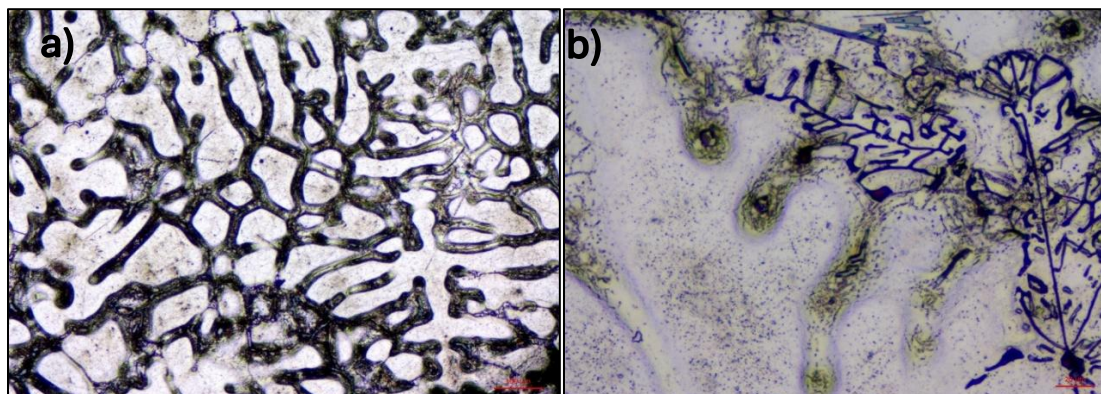


Figura 38. Micrografías de la pieza vaciada en un molde con arena de sílice nueva. a) Micrografía a 50X, b) Micrografía a 200X.

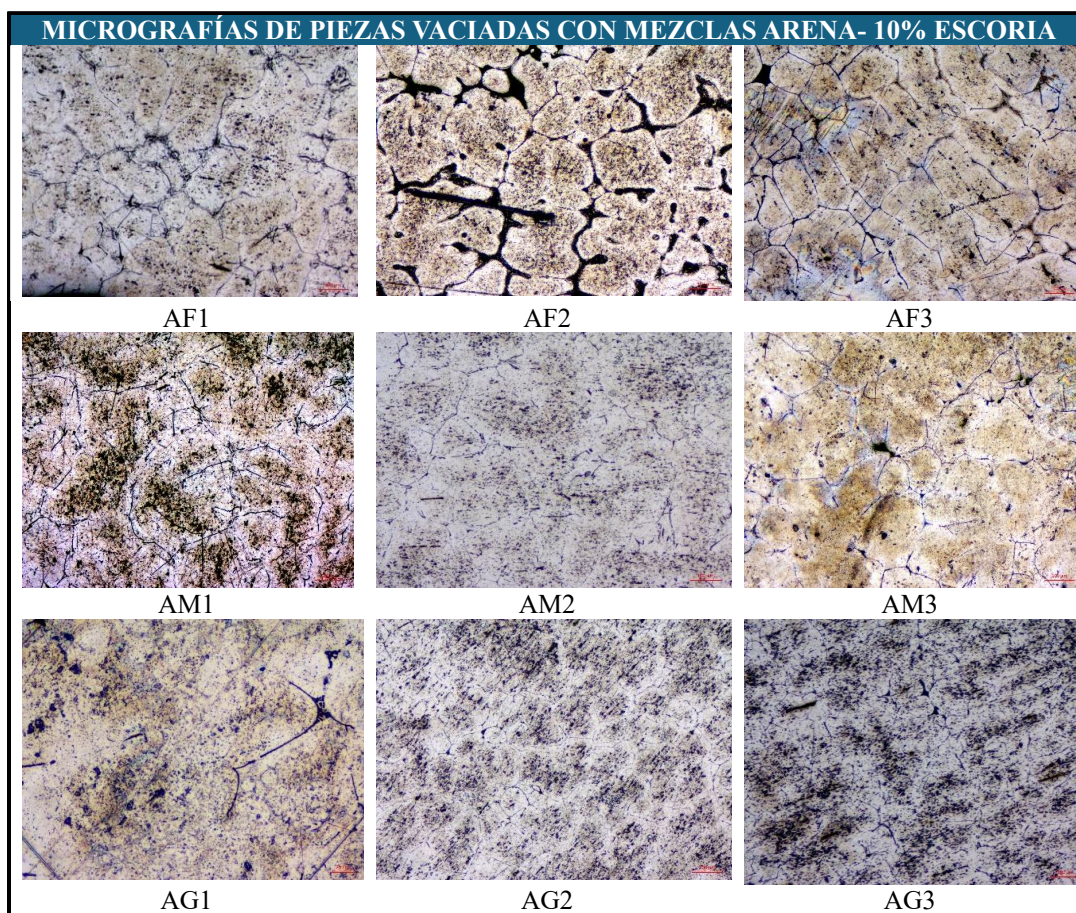


Figura 39. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 10% escoria a 50X.

En el caso de las piezas que se vaciaron con la relación arena- 30% escoria (ver **Fig. 40**) la mayoría de las muestras mostraron una microestructura de granos, aunque su tamaño es variable. Las muestras BF3 y BM1 tuvieron problemas de oxidación. Para las muestras BG1 y BG3 fue necesario atacar por un tiempo más prolongado debido a que la microestructura era difícil de revelar, por lo que la micrografía mostró un sobre ataque. Las micrografías de las muestras BF2 y BM2 revelaron una forma de grano más notoria por lo que son las recetas óptimas para poder tener la formación de granos equiaxiados en una pieza de fundición.

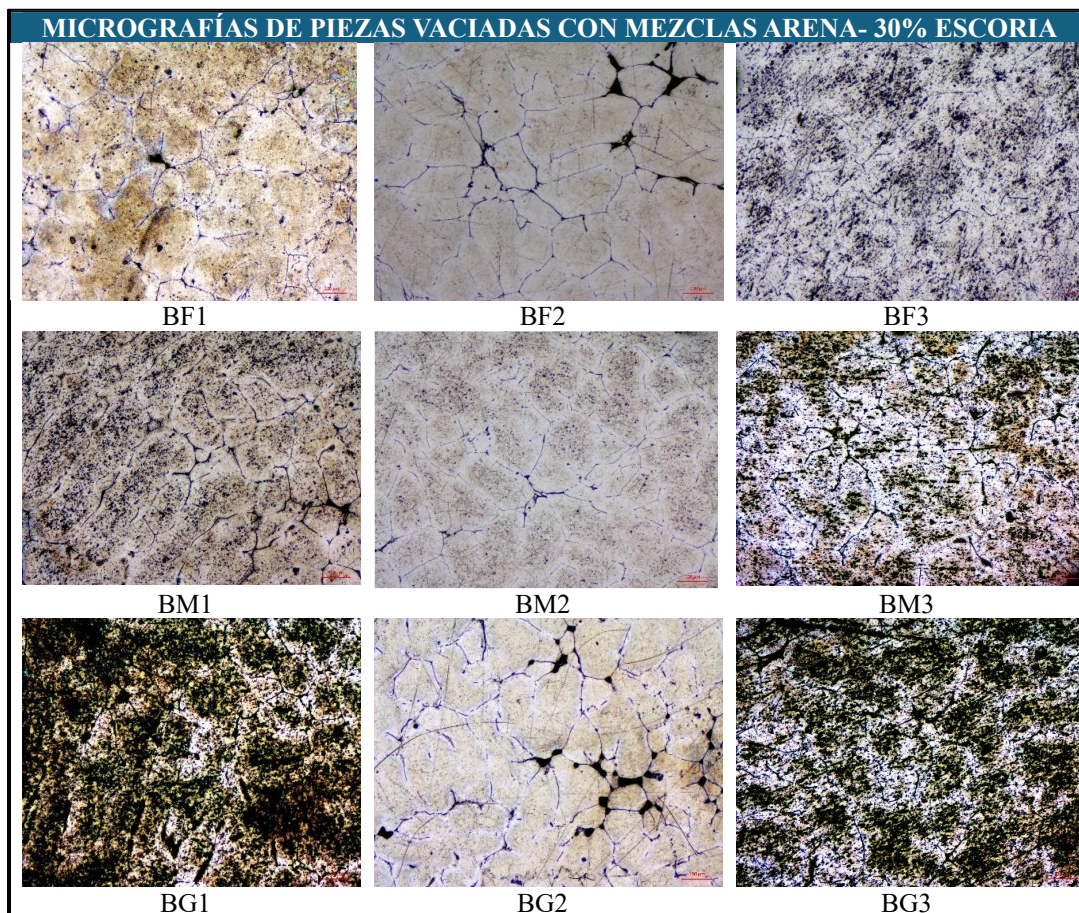


Figura 40. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 30% escoria a 50X.

En las micrografías obtenidas de las piezas vaciadas con la relación arena- 50% escoria (ver **Fig. 41**) se observa una microestructura más oxidada por problemas al desbastarse y además fue más complicado en revelar la microestructura, pero en general hubo formación de granos a excepción de la muestra CG2 en la cual se observa una microestructura dendrítica y entre ella se observan poros negros los cuales se supone asociados al hidrogeno que quedó atrapado. En el caso de la muestra CM1 la microestructura solidifico dendriticamente, CM2

se observa que dentro de los granos y en los límites de estos se formaron precipitados, los cuales pudieran tratarse de precipitados de silicio tipo Mg_2Si , las tonalidades amarillas que tomaron algunas micrografías se deben principalmente al cambio de composición.

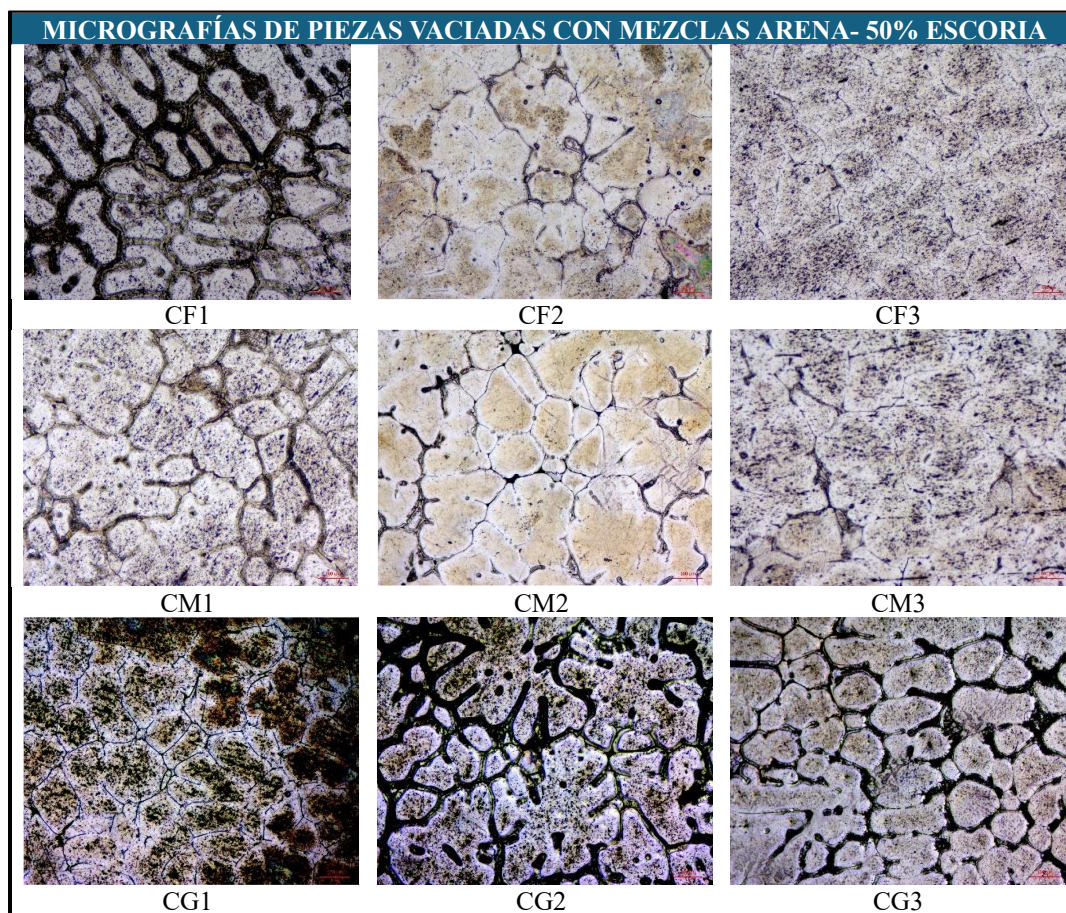


Figura 41. Micrografías de piezas vaciadas con mezclas arena- 50% escoria a 50X.

La solidificación de las aleaciones 6xxx comienza con la formación de dendritas de aluminio primario α -Al y también con la formación del eutéctico que depende de la cantidad de silicio. La presencia de elementos como Cu, Fe o Mg causa la formación de compuestos intermetálicos como fue en el caso de la microestructura de la pieza vaciada en el molde hecho completamente con arena de sílice, en donde el intermetálico se puede observar entre los brazos dendríticos y por su morfología se trata del intermetálico Mg_2Si .

La velocidad de enfriamiento afecta directamente al tamaño, morfología y distribución de los compuestos formados en la microestructura de las aleaciones de Al, al aumentar la velocidad de enfriamiento disminuyen el tamaño de la microestructura formada, el espaciamiento interdendrítico y el tamaño de los compuestos intermetálicos [71].

El efecto de la cantidad de aglutinante puede observarse en la **Fig. 42**, donde se presentan micrografías de las muestras CF1 (**Fig. 42a**) y la muestra CG3 (**Fig. 42b**) las cuales fueron tomadas a 20X. Se observa que, para la primera, el límite de grano es menos definido y presenta incrustaciones de granos de arena fina, los cual se debe a que el molde de esta muestra fue hecho con el nivel más bajo de aglutinante (6.5%), por lo que la unión de los granos de arena tuvo menor fuerza para resistir el metal fundido. Para el caso de muestra CG3 se observa que las incrustaciones de arena fueron menores y el límite de grano es más definido.

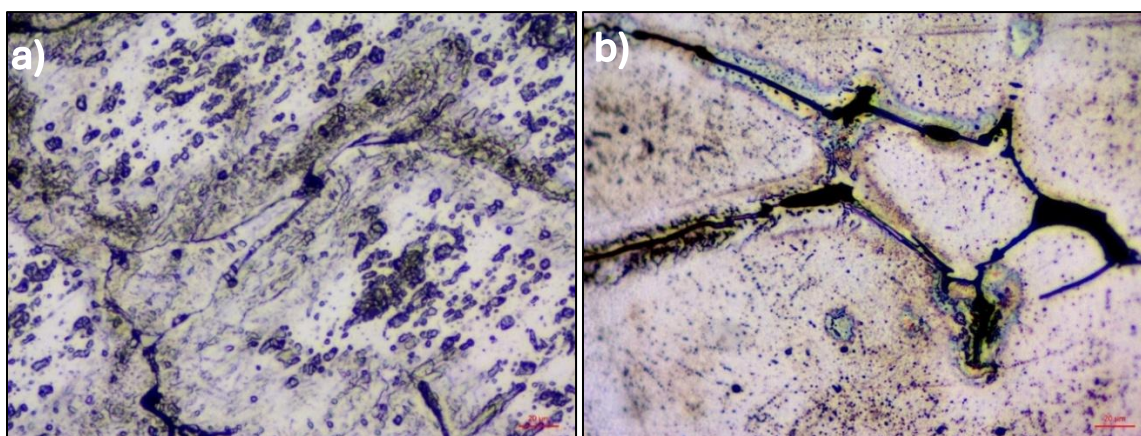


Figura 42. Micrografías obtenidas a 200X de las muestras a) CF1 y b) CG3, se presenta principalmente la diferencia del uso de diferentes niveles de aglutinante.

El análisis del tamaño de grano es uno de los más importantes en piezas de fundición, ya que por lo general las piezas tienen microestructuras heterogéneas que implican propiedades mecánicas bajas o con defectos, por lo que, el objetivo principal de la producción de piezas de fundición es obtener piezas con propiedades mecánicas óptimas, lo cual se puede obtener modificando las propiedades termofísicas del molde y con ello se modifican las condiciones de solidificación de las piezas de fundición.

En la **Figs. 43**, se muestran los resultados obtenidos después de medir el tamaño de grano en μm ; las gráficas están agrupadas de acuerdo con la cantidad de escoria en la mezcla. Se observa que el tamaño de grano más fino se obtuvo en muestras vaciadas con 10% y 30% de escoria en la mezcla, mientras que para 50% de escoria en la mezcla, el tamaño de grano dio valores menores, esta diferencia pudo deberse principalmente a la cantidad de escoria, ya que, al tener óxido de hierro contenido, la escoria disminuye la refractabilidad [18]. Se registraron tamaños de grano más finos para las mezclas que contenían el nivel más bajo y medio de aglutinante, también para cantidades de 10% y 30% de escoria en la mezcla. La muestra CM1 no presentó granos, debido a que la mezcla tenía contenido alto de escoria en la mezcla, por lo que no se registra ningún valor, la muestra CG2 mostró una microestructura

dendrítica, sin embargo, cabe destacar que en la mayoría de las piezas prevaleció la forma de grano equiaxiada.

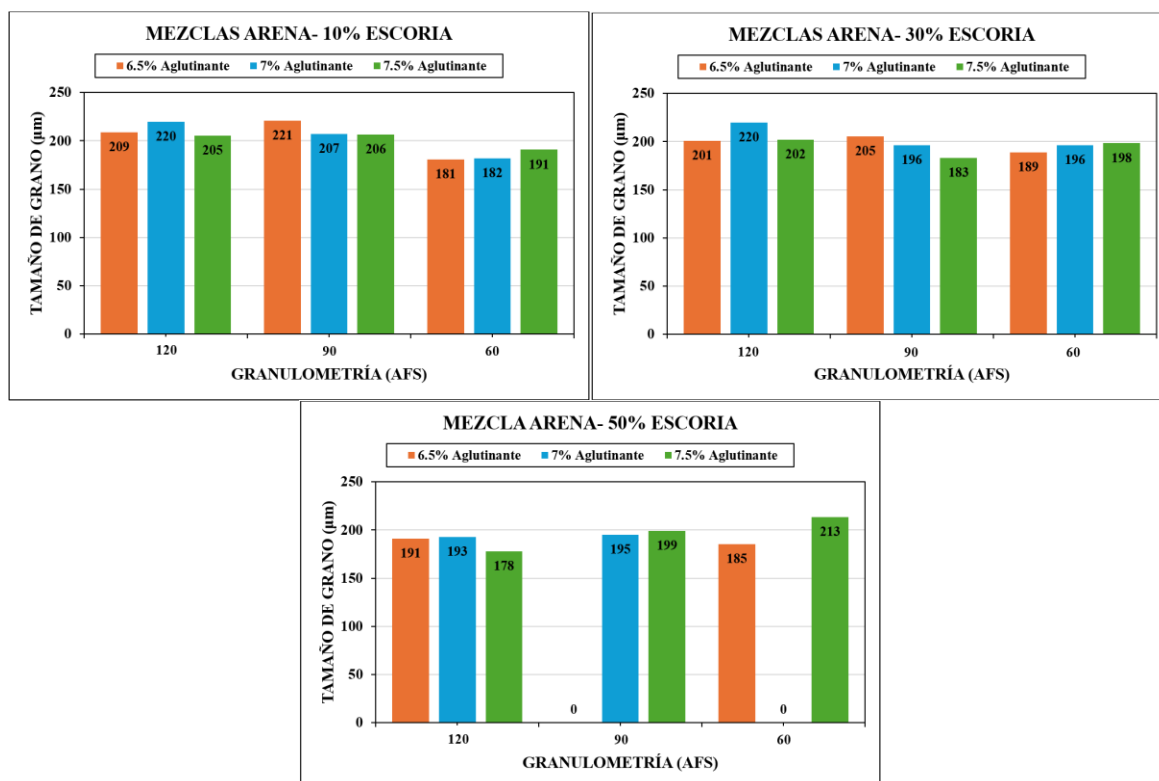


Figura 43. Resultados de los valores de tamaño de grano en función de la granulometría para cada relación arena- escoria.

4. 5 Resultados de evaluación mecánica de piezas y probetas vaciadas.

En la **Fig. 44**, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de microdureza de las 27 muestras vaciadas. Las gráficas están agrupadas de acuerdo con la relación de la mezcla arena- escoria. El promedio de los resultados de microdureza están entre 41 y 63 HV. En cada grafica se muestra el valor de microdureza para una pieza de aluminio serie 6xxx, vaciada en arena de sílice, este valor fue de 47 HV y se marca con la línea punteada roja.

El valor promedio para las fundiciones de aluminio es de 49 HV [72]. Se observa que todos los valores de microdureza obtenidos sobresalen de este rango por lo que las piezas vaciadas en moldes sustituidos parcialmente por escoria demuestran mejor microdureza en comparación con moldes vaciados con arena en verde [73]. En el caso de los resultados de microdureza para las piezas que se vaciaron en moldes con granulometría fina, los valores tuvieron más variabilidad, esto pudo deberse a la solidificación de las piezas, presencia de

porosidades o inclusiones. Las piezas que mostraron los mejores valores de microdureza fueron AF1, BF3 y CF1.

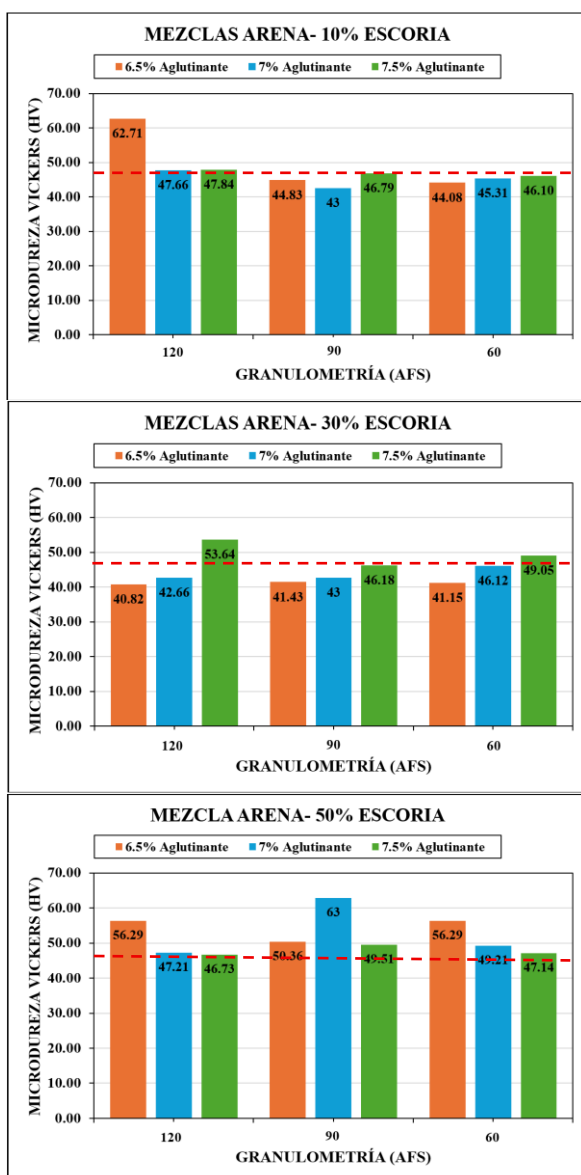


Figura 44. Resultados de microdureza Vickers.

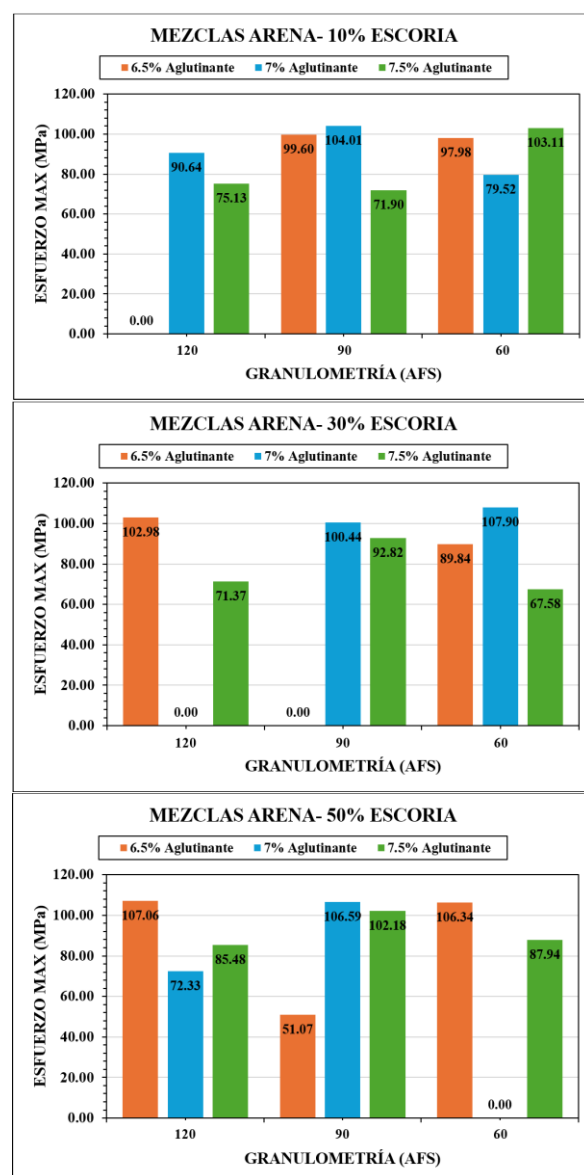


Figura 45. Resultados de pruebas de tensión.

Para el caso de las piezas vaciadas en moldes con granulometría media los resultados de microdureza fueron menos variables, pero con valores menores en comparación con los de granulometría fina. Los valores menores los registraron las piezas vaciadas en moldes con arena- 30% escoria y los valores mayores los registraron las piezas vaciadas con arena- 50% escoria. Con base en los resultados las mezclas CM1, CM2 y CM3 demuestran ser mejores candidatas para el moldeo de piezas de aluminio, ya que se obtienen valores mayores de durezas.

Los resultados de microdureza para piezas que se vaciaron con granulometría gruesa mostraron menos variabilidad, pero los valores son menores en comparación con las demás granulometrías. La muestra que pueden ser candidata para vaciar piezas de aluminio es BG3, en base a esto podemos observar que el principal factor que influye en el moldeo de la pieza de aluminio es la cantidad de escoria y granulometría, ya que con granulometrías finas y medias se obtienen valores de dureza mayores a 50 HV, mientras que para granulometría gruesa los valores de dureza que se pueden obtener son menores de 49 HV. En cuanto a la cantidad de escoria las piezas vaciadas en moldes con 30% y 50% de escoria mostraron valores más altos en su mayoría.

Aunque algunos de los valores de microdureza obtenidos están por arriba del rango de valores que comúnmente se registran para piezas de fundición, todas presentaron una variabilidad en los valores de microdureza. Esta variabilidad se ha observado en piezas vaciadas como resultado de la presencia de diferentes intermetálicos y se minimizo mediante la aplicación de tratamientos térmicos de las piezas coladas [74]. Específicamente en las mediciones de microdureza de piezas de aluminio de la aleación 6xxx, la presencia del compuesto intermetálico estable Mg_2Si , está relacionado con elevadas propiedades mecánicas y térmicas, por lo que la ausencia de este compuesto disminuye la dureza del material [74, 75].

Cabe señalar también que el contenido de Si en las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx aumenta la dureza, logrando obtener valores de microdureza de 65 HV con contenidos de hasta 10% de Si [75]. Por otro lado, la presencia de porosidades y defectos generados durante el moldeo autofraguante pueden también influir en los valores de microdureza obteniendo valores de durezas menores y también variabilidad en ellos.

Las propiedades mecánicas de una pieza de fundición son difíciles de analizar, ya que la microestructura desde el estado de fundición muchas de las veces no presentan una microestructura homogénea y por ello las propiedades mecánicas suelen ser bajas. En la literatura se muestran diferentes datos experimentales sobre valores de propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio para fundición, pero estos suelen ser muy dispersos. Dependiendo del tipo de moldeo que se utilice los defectos pueden cambiar, por ejemplo, cuando se producen probetas para pruebas de tensión mediante la fundición por gravedad o en molde de arena o permanente se crea una microestructura heterogénea por las condiciones de enfriamiento diferentes y se pueden formar películas de óxido durante el vaciado [76].

Las pruebas de tensión en las probetas vaciadas se realizaron por duplicado para cada condición de arena- mezcla en base a las especificaciones de la norma ASTM E8. Se tuvieron complicaciones con algunas probetas, ya que al momento de maquinar estas se fracturaban por la presencia de porosidades, por lo que no se tuvo registro de esas muestras. En la **Fig. 45**, se muestran los resultados del esfuerzo máximo de las probetas agrupadas de acuerdo con

la cantidad de escoria en la mezcla. Se observa que las muestras con 30% y 50% de escoria y el nivel más bajo de aglutinante presentan los mayores valores de esfuerzo máximo.

Generalmente los valores de esfuerzo máximo son más altos para muestras con granulometría media en comparación con los valores de las muestras con granulometría fina. Aunque se sigue teniendo una variabilidad en los resultados, las muestras optimas fueron AM2 y CM2, por lo que el contenido de escoria en este grupo de muestras si influyó, teniendo como resultados que a mayor cantidad de escoria en la mezcla el esfuerzo máximo aumenta. Las muestras con granulometría gruesa que obtuvieron un esfuerzo máximo más alto fueron AG3, BG2 y CG1, como puede observarse los resultados fueron muy dispersos por lo que se deduce que al tener una granulometría gruesa en un molde se pueden obtener valores altos de esfuerzo máximo para las tres cantidades de escoria y de aglutinante en las mezclas.

Los valores típicos de esfuerzo máximo para aleaciones de la serie 6xxx son de 135-145 MPa en estado de fundición, en comparación con los valores obtenidos para las diferentes recetas de este proyecto, todos los valores de esfuerzo máximo fueron 30 Mpa menores que los reportados en la literatura. Posiblemente esto pudo deberse a una velocidad de colada alta, lo que provoca la formación de microgrietas y tensiones internas [77].

Para tener una comparación más clara de todos los resultados obtenidos, estos se han agrupado de acuerdo con la relación de arena- escoria en la mezcla como se observan en las **Tablas 15, 16 y 17** respectivamente, además se especifica con una escala descriptiva de la calidad superficial de las piezas vaciadas de acuerdo con la evaluación de líquidos penetrantes. Como se mencionó anteriormente, los valores del coeficiente de conductividad térmica k son menores al reportado en la literatura, pero las muestras con 10% de escoria y granulometría fina y media muestran un valor en promedio más cercano al reportado y por ello se pudo obtener un tamaño de grano fino superior a 200 μm (ver **Tabla 15**). Este mismo caso sucedió con las mezclas de 30% de escoria, aunque los valores de k son menores se pudo obtener valores de esfuerzo máximo más altos.

El aumento de las propiedades mecánicas se logra mediante la refinación de la microestructura y para lograr esto es necesario tener un control en el proceso de fusión y solidificación, por ende, el material del molde también es importante [6]. Las granulometrías medias mostraron propiedades mecánicas más bajas en comparación con las granulometrías finas, sin embargo, sigue prevaleciendo que las muestras con contenido de 30% de escoria muestran los mejores resultados. Aunque el uso de aglutinantes orgánicos en el moldeo provoca una mayor resistencia térmica del molde, el adicionar niveles altos de aglutinantes causan un incremento en el valor de k como se puede observar en los valores de la **Tabla 16** [78].

Tabla 15. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 10% escoria.

RESULTADOS DE PROPIEDADES DE ACUERDO CON GRANULOMETRÍA FINA						
GRANULOMETRÍA (AFS)	MUESTRA	K (W/km)	MICRODUREZA (HV)	TAMAÑO DE GRANO (μm)	ESFUERZO MAX (MPa)	CALIDAD SUPERFICIAL
FINOS (120)	AF1	0.21	62.71	208.8	0	BUENO
	AF2	0.32	47.66	219.6	90.64	REGULAR
	AF3	0.16	47.84	205.3	75.13	REGULAR
MEDIOS (90)	AM1	0.18	44.83	221.0	99.60	BUENO
	AM2	0.14	42.52	206.9	104.01	EXCELENTE
	AM3	0.32	46.79	206.3	71.90	MALO
GRUESOS (60)	AG1	0.12	44.08	180.5	97.78	REGULAR
	AG2	0.37	45.31	181.9	79.52	MALO
	AG3	1.54	46.10	190.8	103.11	REGULAR

Tabla 16. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 30% escoria.

RESULTADOS DE PROPIEDADES DE ACUERDO CON GRANULOMETRÍA MEDIA						
GRANULOMETRÍA (AFS)	MUESTRA	K (W/km)	MICRODUREZA (HV)	TAMAÑO DE GRANO (μm)	ESFUERZO MAX (MPa)	CALIDAD SUPERFICIAL
FINOS (120)	BF1	0.33	40.82	200.7	102.98	EXCELENTE
	BF2	0.65	42.66	219.9	0	EXCELENTE
	BF3	0.30	53.64	202.0	71.37	EXCELENTE
MEDIOS (90)	BM1	0.24	41.43	205.3	0	REGULAR
	BM2	0.67	42.66	196.1	100.44	MALO
	BM3	0.47	46.18	183.2	92.82	REGULAR
GRUESOS (60)	BG1	0.21	41.15	188.8	89.84	BUENO
	BG2	0.19	46.12	196.4	107.90	REGULAR
	BG3	0.27	49.05	198.2	67.58	REGULAR

Los resultados de las mezclas con relación arena- 50% escoria se muestran en la **Tabla 17**, para el caso de las piezas vaciadas con granulometría fina y media los valores fueron los más bajos en cuanto a la calidad superficial. El tamaño de grano resultó en valores más gruesos, esto es debido a que el tamaño de la granulometría provocó una velocidad más alta de transferencia de calor y la microestructura que se formó fue fina, pero con segregación. Para este grupo de resultados, el coeficiente de conductividad térmica k es más bajo en comparación con los demás grupos de resultados, esto fue debido a la cantidad de escoria en la mezcla, ya que al tener mayor cantidad de óxidos en la mezcla el molde es más refractario.

Tabla 17. Resultados generales para muestras elaboradas con mezclas arena- 50% escoria.

RESULTADOS DE PROPIEDADES DE ACUERDO CON GRANULOMETRIA GRUESA						
GRANULOMETRÍA (AFS)	MUESTRA	K (W/km)	MICRODUREZA (HV)	TAMAÑO DE GRANO (μm)	ESFUERZO MAX (MPa)	CALIDAD SUPERFICIAL
FINOS (120)	CF1	0.37	56.29	191.1	107.06	MALO
	CF2	0.19	49.21	192.6	72.33	MALO
	CF3	0.17	47.14	178.1	85.48	MALO
MEDIOS (90)	CM1	0.18	50.36	0	51.07	REGULAR
	CM2	0.21	62.89	194.9	106.59	BUENO
	CM3	0.22	49.51	199.0	102.18	REGULAR
GRUESOS (60)	CG1	1.80	45.99	185.3	106.34	BUENO
	CG2	0.18	47.21	0	0	BUENO
	CG3	0.27	46.73	213.4	87.94	EXCELENTE

4. 6 Resultados de análisis estadístico

Los resultados mas importantes de esta investigacion fueron: coeficiente de conductividad termica k para evaluar la refractabilidad del molde, microdureza y tamaño de grano para la las piezas vaciadas y esfuerzo de tension para la evaluacion de las probetas. Todos los resultados anteriormente mencionados se evaluaron mediante el software Minitab utilizando un analisis estadistico de diseño de experimentos (DOE).

En la **Fig. 46**, se observa el grafico de efectos principales y de interaccion para el coeficiente de conductividad termica k . Se observa que el efecto principal en el valor de k es la granulometria, una granulometria gruesa provoca el incremento del k , por lo que es recomendable utilizar granulometrias medias o finas. En cuanto al porcentaje de aglutinante es conveniente utilizar de niveles medios a altos. El porcentaje de escoria no tiene efecto significativo en el valor de k , ya que se observa que el aumento de escoria provoca un cambio pequeño en k . En cuanto a la interaccion de los factores, es necesario mantener porcentajes de 30 a 50% de escoria en la mezcla, granulometrias de medias a finas y niveles de 7.0 y 7.5% de aglutinante para obtener los valores mas bajos de k , y de este modo tener mas refractabilidad en el molde.

Los resultados de los efectos principales y de interacción para la microdureza se observan en la **Fig. 47**, en este caso observamos que conforme aumenta el porcentaje de escoria y la granulometría de la mezcla el valor de la microdureza también aumenta, logrando mantener niveles bajo y medios de aglutinante. Lo anterior resulta benéfico, ya que al tener una mezcla de arena- escoria se tuvo que utilizar más porcentaje de aglutinante al que comúnmente se utiliza, sin embargo, la gráfica de interacción nos permite observar que lo anterior se puede cumplir.

En la **Fig. 48**, se observan los resultados de efectos principales y de interacción para el tamaño de grano, se observa que el porcentaje de escoria, granulometría y aglutinante afectan a este factor, sin embargo, para obtener tamaños de grano más finos es necesario utilizar 10 y 50% de escoria, granulometría media y nivel de aglutinante medio. En cuanto a las interacciones se observa que al utilizar mezclas con 50% de escoria y granulometría gruesa se alcanzan valores de tamaño de grano de 220 μm y esto sigue prevaleciendo si se utiliza el nivel medio de aglutinante.

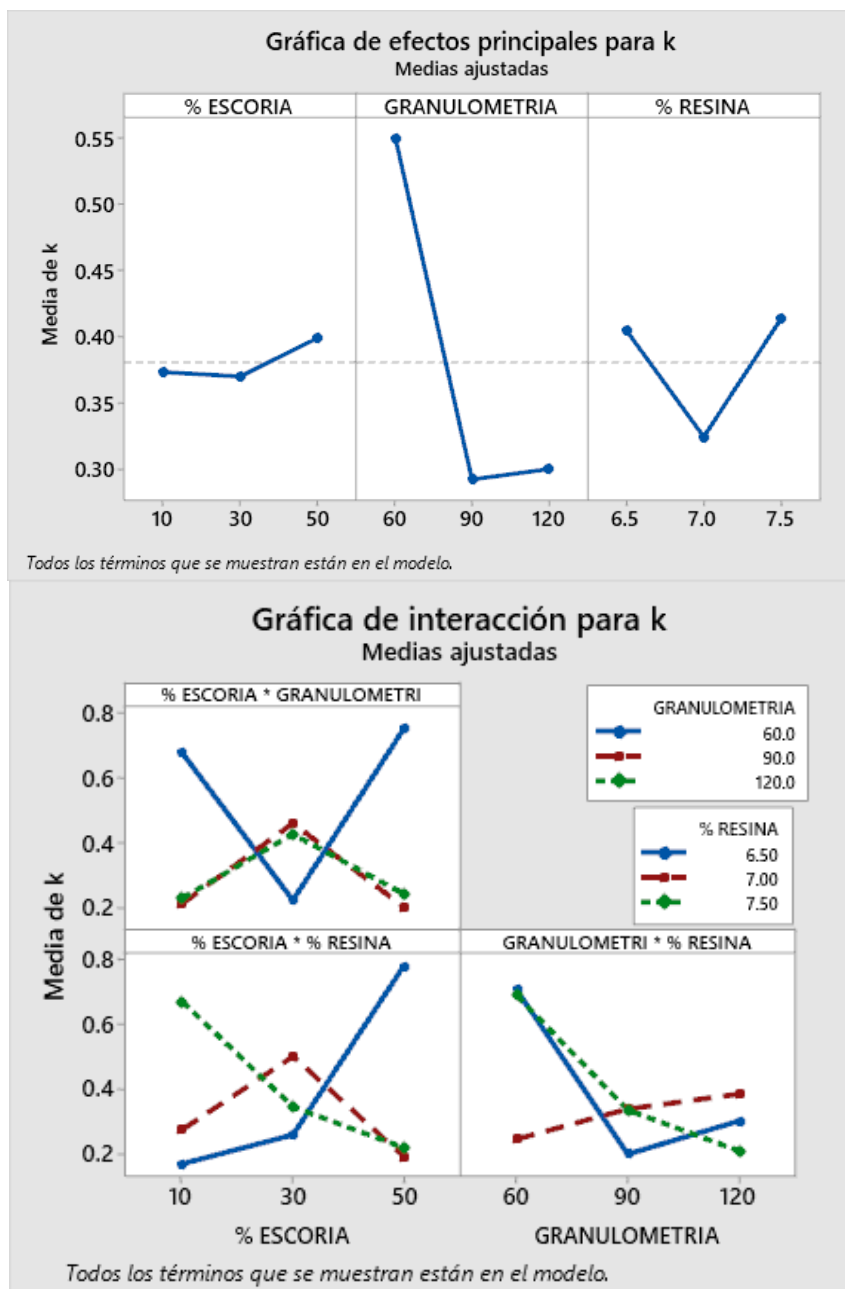


Figura 46. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados del coeficiente de conductividad térmica k .

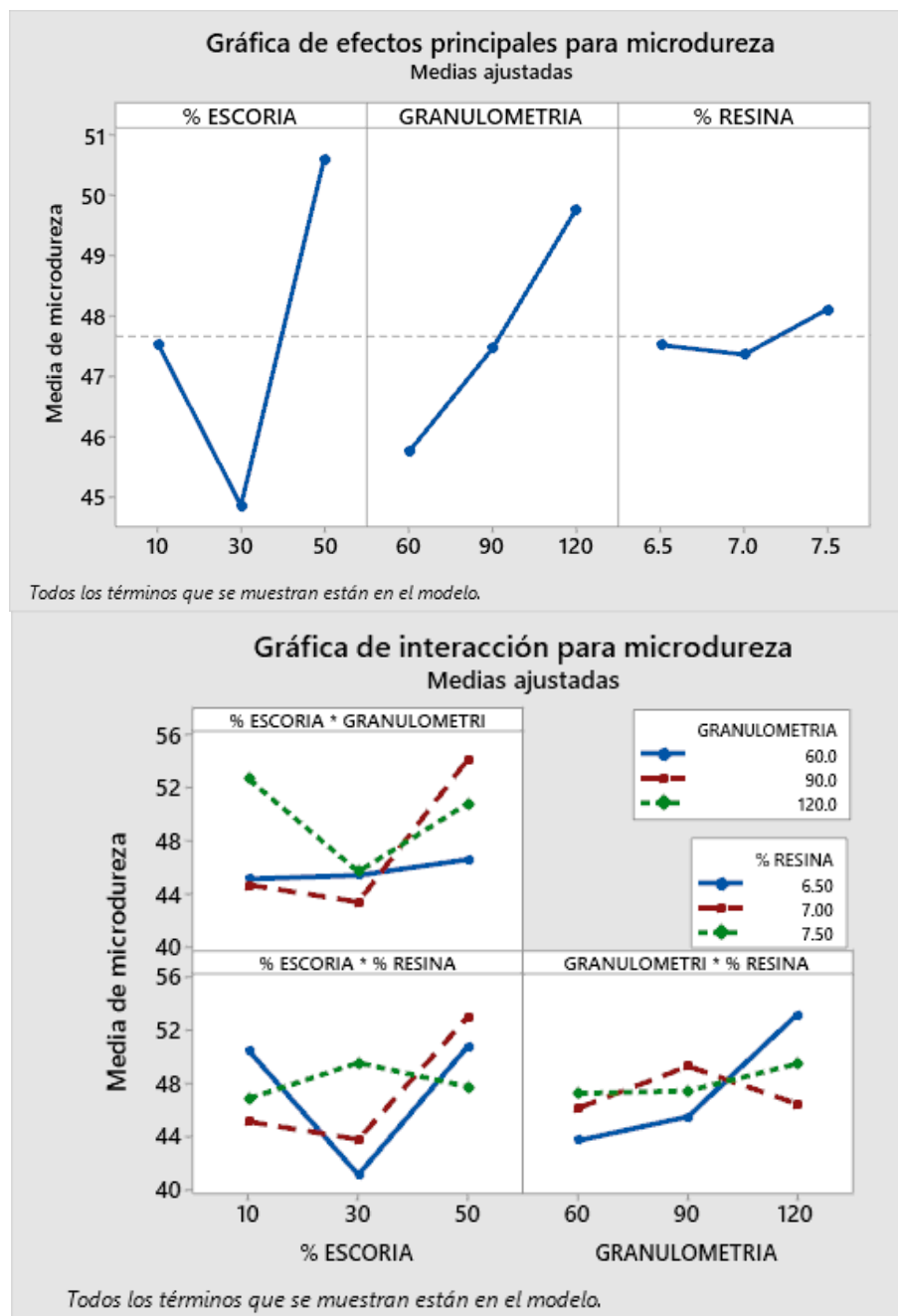


Figura 47. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de microdureza.

Para el caso de los efectos principales y de interacción para los resultados de esfuerzo de tensión se observan en la **Fig. 49**, en este caso es notorio ver que al aumentar todas las cantidades de los 3 factores el esfuerzo máximo disminuye. Podemos observar que al interaccionar la cantidad de escoria con la granulometría podemos obtener valores altos de esfuerzo máximo al utilizar 30% de escoria y granulometría media. La cantidad de aglutinante debe ser de nivel bajo y medio, nuevamente con 30% de escoria y de granulometría media y fina.

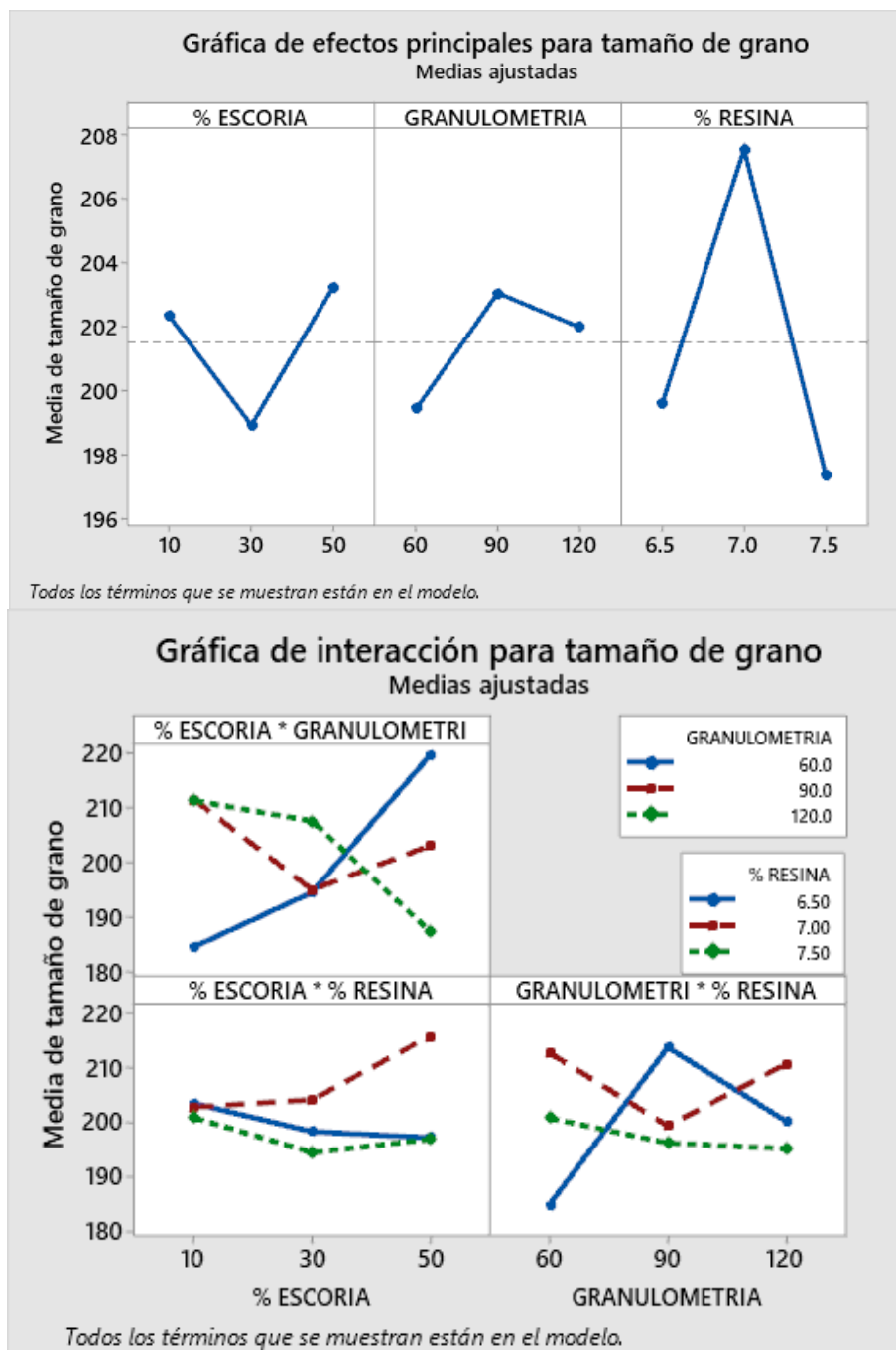


Figura 48. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de tamaño de grano.

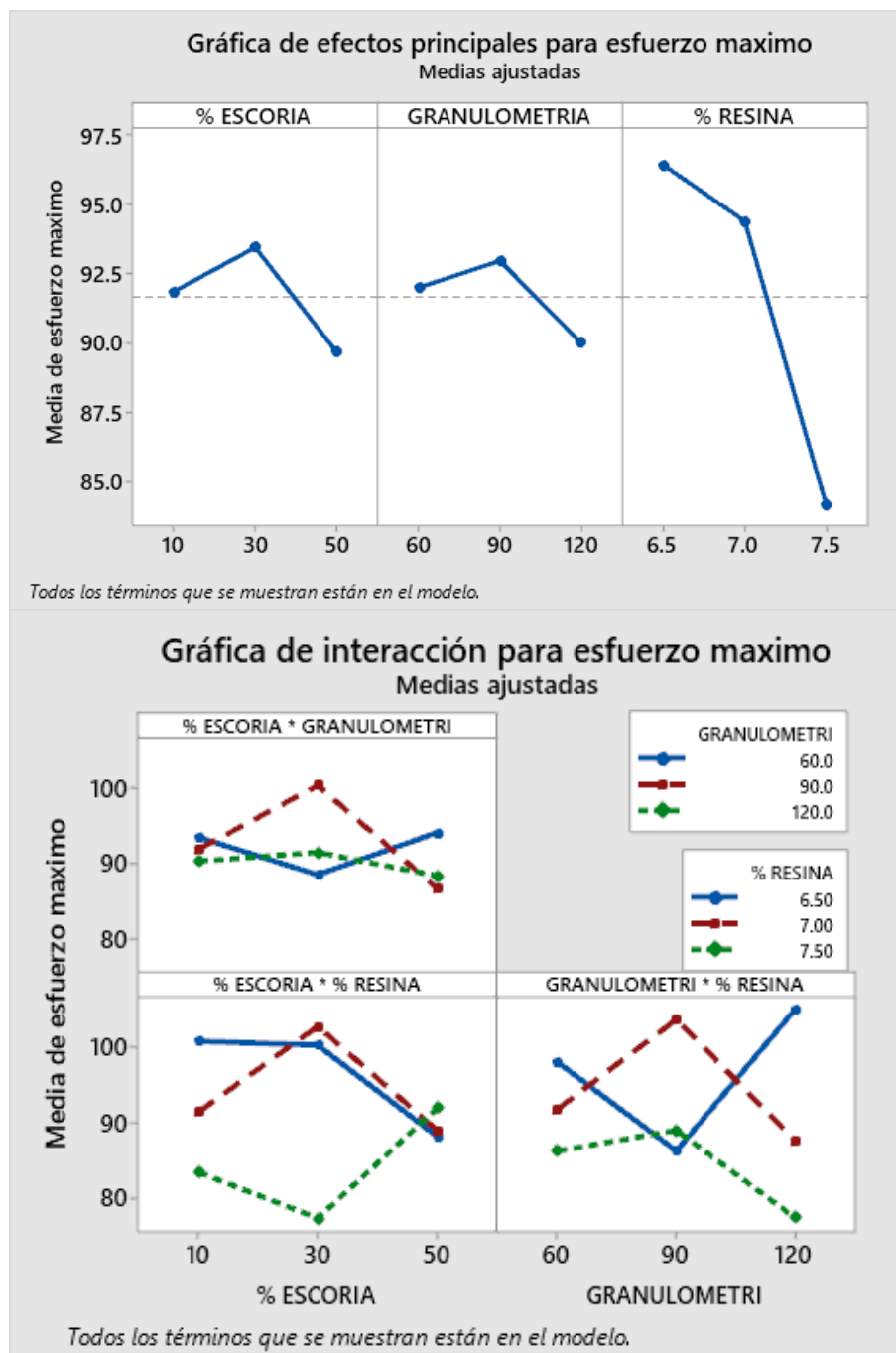


Figura 49. Gráficas de efectos principales y de interacción para resultados de esfuerzo máximo de tensión.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo permiten establecer que se cumplieron los objetivos planteados, al demostrar la viabilidad técnica del uso parcial de escoria de horno de arco eléctrico (EHAE) como sustituto de la arena de sílice en sistemas de moldeo autofraguante fenólico-uretano para la producción de piezas de aluminio. El análisis de resultados de un experimento factorial con 27 diferentes combinaciones de cantidad de escoria-granulometría de la mezcla-cantidad de resina, permitió concluir lo siguiente:

1. Se comprobó que es factible sustituir hasta un 50% de la arena de sílice por EHAE en mezclas de moldeo, manteniendo propiedades adecuadas de estabilidad, compresión, permeabilidad y refractabilidad de los moldes, así como calidad superficial y propiedades mecánicas competitivas en las piezas obtenidas.
2. Los resultados evidenciaron que los moldes con EHAE presentaron mayor refractabilidad en comparación con los moldes elaborados solo con arena de sílice, favoreciendo procesos de solidificación más controlados y homogéneos.
3. La incorporación de EHAE promovió la formación de microestructuras equiaxiadas más finas en la mayoría de los casos, lo que impactó positivamente en la dureza y el esfuerzo máximo alcanzado en probetas. Se identificó que los mejores resultados se obtuvieron con mezclas que contenían entre 10% y 30% de escoria y granulometría fina o media.
4. El uso de las EHAE en el sistema fenólico uretano demanda de cuatro a cinco veces la cantidad de resina para ser utilizado, con respecto al sistema que solo utiliza arena sílice, sin embargo, las mejoras en la refractabilidad de los moldes y propiedades mecánicas justifican su aplicación.
5. Se comprobó la posibilidad de recuperar térmicamente las mezclas arena-escoria, lo que incrementa la rentabilidad y sostenibilidad del proceso.
6. Las recetas que dieron mejores resultados y engloban las mejores características tanto microestructural como mecánicamente, así como también en calidad superficial en las piezas son: AM2, BF3, CM2 y CG3.

En conjunto, estos resultados muestran que la utilización de escoria de horno de arco eléctrico en mezclas de moldeo constituye una alternativa técnica viable y ambientalmente favorable para la industria de fundición, aportando conocimiento novedoso sobre su desempeño en sistemas autofraguantes y abriendo la posibilidad de aplicaciones a mayor escala.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Brown, (2000), Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 11th ed. Oxford, U.K. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] J. A. Mejía and J. L. Figueroa, Manejo de técnicas de muestreo para evaluar las propiedades de la arena para el proceso autofraguante, Fundytec.
- [3] ASM International, ASM Handbook: Casting, 9th ed., vol.15 Materials Park, OH: ASM International, 1988.
- [4] F. P. Goettman, Trans. AFS, Vol. 83. 1975.
- [5] P. R. Carey, Part I: Practical Aspects of Resin Binder Processes. ASKCHEMICALS.
- [6] P. Raikar and P. P. Revankar, Study on Partial Replacement of Silica Sand with Alternatives and Its Effect on Sand Mould and Casting Properties. Journal Of Mines Metals and Fuels, 370-379, 2022, <https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/31961>
- [7] P. R. Carey and M. Swatzlander, Part II: Resin/Sand Interactions. ASKCHEMICALS.
- [8] P. Beeley, Foundry Technology. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [9] GWP Consultants, A study of silica sand quality and end uses in Surrey and Kent, 2010.
- [10] Engineered Casting Solutions, Guide to casting and moulding processes, 2006.
- [11] M. Holtzer, M. Górny and R. Dańko, Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings: The Effects of Mold Sand/Metal Interface Phenomena, 2015. <https://www.amazon.com/Microstructure-Properties-Compacted-Graphite-Castings-ebook/dp/B00VBEZVTE>
- [12] M. M. Khan, S. Mahajani, G. Jadhav, R. Vishwakarma, V. Malgaonkar and S. Mandre, Mechanical and thermal methods for reclamation of waste foundry sand. J. Environmental Management, vol. 111628, p. 279, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111628>.
- [13] Z. Fan, N. Huang and X. Dong, In house reuse and reclamation of used foundry sands with sodium silicate binder. International Journal of Cast Metals Research, vol. 7, no. 1, pp. 51-56, 2004. <https://doi.org/10.1179/136404604225020551>
- [14] M. K. Joseph, F. Banganayi and D. Oyombo, Moulding Sand Recycling and Reuse in Small Foundries. Procedia Manufacturing, vol. 7, pp. 86-91, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.022>
- [15] E. Pa, Guides to pollution prevention: Metal Casting and Heat-Treating Industry. EPA/625/R-92/009, pp, 5-12,21-25, 1992.
- [16] D. R. Poirier and E. J. Poirier, Heat Transfer Fundamentals for Metal Casting, 1998 <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA23882478>

- [17] E. J. Sikora, Evaporative Casting Using Expandable Polystyrene Patterns and Unbonded Sand Casting Techniques, Trans.AFS, Vol 86, 1978.
- [18] D. A. Mhamane, S. B. Rayjadhav and V. D. Shinde, Analysis of Chemically Bonded Sand Used for Molding in Foundry. Asian Journal of Science and Applied Technology, vol. 7(1), pp. 11-16, 2018. <https://doi.org/10.51983/ajsat-2018.7.1.1025>
- [19] P.R. Carey. Part XII: Hot Box, Warm Box, and Core Oil. ASKCHEMICALS.
- [20] I. D. M. Williams, The environmental performance of biobased resin within phenolic urethane no bake binders: A feasibility study, M.S. THESIS, Univ. Northern Iowa, 2014. <https://scholarworks.uni.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1054&context=etd>
- [21] E. Ireland, Chang, and Kroker, New horizon in Nobake Binder Technology, American Foundry Society, vol. 02, no. 025, pp. 1-7, 2002.
- [22] P. R. Carey, J. Archibald, Part X: The Phenolic Urethane Amine Cold Box System. ASKCHEMICALS.
- [23] A. Gienec, P. Vietoris and H. Diekhues, PepSET- an efficient and environmentally friendly binder system. Foundry Trade Journal, 2015.
- [24] M. C. Zanetti, S. Fiore, Foundry processes: The recovery of green moulding sands for core operations. Resources, Conservation and Recycling, 2002.
- [25] M. K. Joseph, F. Banganayi and D. Oyombo, Moulding Sand Recycling and Reuse in Small Foundries. Procedia Manufacturing, vol 7, pp. 86-91, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.022>
- [26] M. C. Zanetti, S. Fiore and C. Clerici, Reuse of Foundry Sands for Core and Glass Production. Journal Of Solid Waste Technology And Management, 30(1), 2014.
- [27] A. Diotti, L. Cominoli, A. Galvin, P. Sorlini and G. Plizzari, Sustainable Recycling of Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate in Concrete: Effects on the Environmental and Technical Performance. Sustainability, vol. 13(2), pp. 521, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020521>
- [28] M. Luxán, R. Sotolongo, F. Dorrego and E. Herrero, Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. Cement And Concrete Research, vol. 30(4), pp. 517-519, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00253-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00253-7)
- [29] M. K. O. Alday, Estudio de la escoria de acería de HAE: aspectos expansivos y ambientales, 2019. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-327407>
- [30] K. Horii, N. Tsutsumi and Y. K. T. Kato, Processing and Reusing Technologies for Steelmaking Slag. Nippon Steel Technical Report, vol. 104, pp. 123-129, 2013. <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/104-20.pdf>

- [31] J. W. Lim, L. H. Chew, T. S. Choong, C. Tezara and M. H. Yazdi, Utilizing steel slag in environmental application - An overview. IOP Conference Series Earth And Environmental Science, vol. 36, 012067, 2016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012067>
- [32] H. Yi, G. Xu, H. Cheng, J. Wang, Y. Wan and H. Chen, An Overview of Utilization of Steel Slag. Procedia Environmental Sciences, vol. 16, pp. 791-801, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
- [33] L. K. Bankole, S. A. Rezan and N. M. Sharif, Assessment of hexavalent chromium release in Malaysian electric arc furnace steel slag for fertilizer usage. IOP Conference Series Earth And Environmental Science, vol. 19, 012004, 2014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/19/1/012004>
- [34] G. Wang, Y. Wang and Z. Gao, Use of steel slag as granular material: Volume expansion prediction and usability criteria, Journal of Hazardous Materials, vol. 184, pp. 555-560, 2010.
- [35] D. C. Goldring and L. M. Juckes, Petrology and stability of steel slags, Ironmaking and Steelmaking, vol. 24, no. 6, pp. 447-457, 1997.
- [36] V. Ducman and A. Mladenović, The potential use of steel slag in refractory concrete. Materials Characterization, vol. 62(7), pp. 716-723, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.04.016>
- [37] P. Ter Teo, S. K. Zakaria, S. Z. Salleh, M. A. A. Taib, N. M. Sharif, A. A. Seman, J. J. Mohamed, M. Yusoff, A. H. Yusoff, M. Mohamad, M. N. Masri and S. Mamat, Assessment of Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review. Metals, 10(10), 1347, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10101347>
- [38] C. Pellegrino, P. Cavagnis, F. Faleschini and K. Brunelli, Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. Cement And Concrete Composites, 37, 232-240, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.09.001>
- [39] A. Drizo, C. Forget, R. P. Chapuis and Y. Comeau, Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite. Water Research, 40(8), 1547-1554, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.001>
- [40] S. Z. Liu, Application of slag in steelmaking. Steelmaking (in Chinese), no. 6, pp. 54-9, 1994.
- [41] G. Zhang, Status of comprehensive utilization of steel slag at Baosteel. Baosteel Tech (in Chinese), vol 1, pp. 20-4, 2006.
- [42] G. Zeng, Status of treatment process and comprehensive utilization of converter steel slag at Lianyuan steel. Lianyuan steel Tec Manage (in Chinese), vol 2, pp. 26-29, 2007.
- [43] J. Geiseler, Use of steelworks slag in Europe. Waste Management, vol. 16(1-3), pp. 59-63, 1996. [https://doi.org/10.1016/s0956-053x\(96\)00070-0](https://doi.org/10.1016/s0956-053x(96)00070-0)

- [44] Y. Jiang, T. Ling, C. Shi and S. Pan, Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources Conservation And Recycling*, vol. 136, pp. 187-197, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>
- [45] E. E. Hekal, S. A. Abo-El-Enein, S. A. El-Korashy, G. M. Megahed and T. El-Sayed, Hydration characteristics of Portland cement – Electric arc furnace slag blends. *HBRC Journal*, vol. 9(2), pp. 118–124, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.05.006>
- [46] N. M. Hernández, J. A. V. Sánchez, M. A. R. Manzano, H. M. B. García and D. Prado, Uso de la escoria de horno de arco eléctrico (EHAE) como agregado fino para la producción de mortero estructural. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería ACOFI 2017*, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.26507/ponencia.830>
- [47] I. Ruiz-Mallén and M. Heras, What Sustainability? Higher Education Institutions' Pathways to Reach the Agenda 2030 Goals. *Sustainability*, vol. 12(4), p. 1290, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12041290>
- [48] La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. *Objetivos, metas e indicadores mundiales*, 2019. <https://hdl.handle.net/11362/40155>
- [49] J.A. Robledo Torres, Estudio de factibilidad mediante técnicas de diseño de experimentos para el uso de escorias de horno de arco eléctrico como material de moldeo en verde, Tesis licenciatura, UASLP, 2020.
- [50] J. Wang and Y. Huang, Exploration of steel slag for thermal energy storage and enhancement by Na_2CO_3 modification. *Journal Of Cleaner Production*, 395, 136289, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136289>
- [51] Ficha técnica Arena de Sílice, Versión 6, 2009.
- [52] A. Uzun, E. Asikuzun, U. Gokmen and H. Cinici, Vickers Microhardness Studies on B4C Reinforced/Unreinforced Foamable Aluminium Composites. *Transactions Of the Indian Institute of Metals*, 327-337, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1163-1>
- [53] British Standard, Metallic Materials- Vickers Hardness Test, 2006.
- [54] ASTM International, Standard test methods for determining average grain size, 2000. <https://www.astm.org/>
- [55] ASTM International, Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2002. <https://www.astm.org/>
- [56] P. R. Carey and M. Swartzlander, Part IV: Urethane Binders (Continued), Sand Binder Systems, ASKCHEMICALS
- [57] D. Sundaram, J. T. Svidró and A. Diószegi, On the Relation between the Gas-Permeability and the Pore Characteristics of Furan Sand. *Materials*, 14(14), 3803, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14143803>

- [58] A. Alzate, Definición de los requisitos aplicables a la operación de moldeo con resinas autofraguante en FASAB, 2014.
- [59] G. B. López, J. G. Padilla, M. A. Álvarez and E. V. López, Arenas de moldeo aglomeradas con resinas: orgánicas sintéticas, inorgánicas y orgánicas naturales biopolímeros, aplicadas en la industria automotriz. *Ciencia Digital*, vol. 2(3), pp. 619-641, 2018. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i3.178>
- [60] J. Zych, J. Mocek, T. Snopkiewicz and L. Jamrozowicz, Thermal Conductivity of Moulding Sand with Chemical Binders, Attempts of its Increasing. *Archives Of Metallurgy And Materials*, pp. 351-357, 2015. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0058>
- [61] P. Krajewski, G. Piwowarski and J. Buraś, Thermal Properties of Foundry Mould Made of Used Green Sand. *Archives Of Foundry Engineering*, pp. 29-32, 2016. <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0098>
- [62] D. Khalifa and F. Mzali, Study of the effect of green sand properties on thermal conductivity variation of sand mould. *Journal Of Engineering And Applied Science*, 2024. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00493-9>
- [63] A. Vergnano, P. Facondini, N. Morselli, P. Veronesi and F. Leali, Identification of Heat Transfer Parameters for Gravity Sand Casting Simulations. *Machines*, p. 414, 2024. <https://doi.org/10.3390/machines12060414>
- [64] K. Mills, L. Yuan, R. Jones, Estimating the physical properties of slags. *Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy*, pp. 649-658, 2011. <https://www.pyrometallurgy.co.za/Mintek/Files/2011Mills.pdf>
- [65] E. N. Villacis, Análisis de la conducta de mezclas de moldeo para fundición aglomeradas con resinas autofraguantes fenólico uretanas, 2015.
- [66] O. G. Montalvo, Modelado y simulación de proceso flexible para la recuperación de arena para fundición, 2017. <http://eprints.uanl.mx/16555/>
- [67] N. Cerón and H. Gómez, Reciclaje térmico para una arena de fundición, En Repositorio institucional, XXI Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales, San Luis Potosí, México, 2024. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/8901/Ponencia.IM.2024.Reciclaje.Cer%c3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [68] V. D. Shinde and D. A. Mhamane, Evaluation of Sand Quality in Thermal Sand Reclamation System. *Thermal Science And Engineering*, 1(3), 2018. <https://doi.org/10.24294/tse.v1i3.538>
- [69] J. Campbell, Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, 2011. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB13861424>
- [70] M. Easton, C. Davidson and D. StJohn, Grain Morphology of As-Cast Wrought Aluminium Alloys. *Materials transactions*, pp. 842-847, 2011. <https://doi.org/10.2320/matertrans.l-mz201118>

- [71] M. Zamani, Al-Si Cast Alloys - microstructure and mechanical properties at ambient and elevated temperatures, School of Engineering Jonkoping University, 2017. <http://hj.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1080478>
- [72] Shane, Tabla de dureza de aleaciones de aluminio: HW, HB, HV, HRB, HBA. MachineMfg, 2024. <https://www.machinemfg.com/es/aluminum-alloy-hardness-chart/>
- [73] D. L. Reyna de la Torre, Evaluación mecánica y microestructural de probetas de aluminio moldeadas usando escorias de horno de arco eléctrico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2021.
- [74] H. J. Jiménez, Comportamiento mecánico y microestructural de la aleación AlMgSi para conductores eléctricos. Revista UIS Ingenierías, pp. 199-212, 2018. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019019>
- [75] P. Prakash Seth, O. Parkash, D. Kumar, Structure and mechanical behavior of in situ developed Mg₂Si phase in magnesium and aluminum alloys – a review. RSC Advances, 2020. <https://doi.org/10.1039/d0ra02744h>
- [76] H. Cao, M. Wessén, Effect of microstructure on mechanical properties of as-cast Mg-Al alloys. Metallurgical And Materials Transactions, pp. 309-319, 2004. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0132-6>
- [77] K. Turbalioğlu and Y. Sun, The improvement of the mechanical properties of AA 6063 aluminum alloys produced by changing the continuous casting parameters. Scientific Research And Essays, 2832-2840, 2011. <https://doi.org/10.5897/sre11.471>
- [78] J. Sun, Q. Le, T. Wang, X. Zhao, W. Shi, H. Huo and C. Wang, Investigation on heat-transfer-coefficient between aluminum alloy and organic/inorganic sand mold based on inverse method. China Foundry, pp. 336-341, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41230-019-9065-y>