

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL EMPLEO DE
DIVERSOS TIPOS DE ARENA EN EL PROCESO DE MOLDEO DE
UNA FUNDICIÓN DE ALTO CROMO**

Profesor Guía:
Dr. Danny Guzmán Méndez

NINO PABLO CABIB GUARDIA
Copiapó, Chile 2024

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL EMPLEO DE
DIVERSOS TIPOS DE ARENA EN EL PROCESO DE MOLDEO DE
UNA FUNDICIÓN DE ALTO CROMO**

**Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el Título de Ingeniero Civil en Metalurgia**

Profesor Guía:
Dr. Danny Guzmán Méndez
Comisión:
Dr Alexis Guzmán Méndez
Mg. Juan Chamorro González

NINO PABLO CABIB GUARDIA

Copiapó, Chile 2024

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL EMPLEO DE DIVERSOS
TIPOS DE ARENA EN EL PROCESO DE MOLDEO DE UNA FUNDICIÓN DE
ALTO CROMO**

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

Nombre de la comisión	Calificación	Firma
Dr. Danny Guzmán Mendez Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.8	
Dr. Alexis Guzmán Mendez Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.7	
Mg. Juan Chamorro González Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.9	

Mg. Juan Chamorro González
Director Departamento de Ingeniería en Metalurgia

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, Gustavo Cabib Martínez y Lorena Guardia Barraza, quienes siempre han estado a mi lado para apoyarme y aconsejarme, siendo una gran motivación para alcanzar mis metas.

A mis compañeros de universidad, especialmente a Waldo y Natalia, con quienes compartí trabajos y nos apoyamos mutuamente durante los momentos más complicados. A las grandes amistades del Departamento de Metalurgia: Matías, Omar, Lucas, Jacqueline, Fernanda y Joselo, quien, aunque no fuera del departamento, siempre estuvo presente con nosotros.

Mis amistades fuera del departamento también fueron fundamentales. Han crecido conmigo y siempre estuvieron en los momentos difíciles. Destaco especialmente a Matías y Yi Wen, quienes jamás me dejaron solo y me brindaron su apoyo incondicional.

Mi gratitud al Dr. Danny Guzmán Méndez, mi profesor guía, quien siempre tuvo disposición para resolver mis dudas y ayudarme a realizar un trabajo de calidad. Agradezco también a la Mg. Marisela Navea Monárdez, quien me ayudó en los ensayos de laboratorio, por su disposición y por aguantarme durante los días que iba a sentarme junto a ella, guiándome y discutiendo resultados para lograr un mejor trabajo.

Agradezco a mi comisión evaluadora, Dr. Alexis Guzmán Méndez y Mg. Juan Chamorro González, por su tiempo y dedicación en corregir y guiar mi trabajo, así como al Departamento de Ingeniería en Metalurgia, que con sus excelentes profesionales logró despertar en mí un gusto por la metalurgia que no tenía en un comienzo.

también destaco el apoyo del proyecto FONDEQUIP EQM 210139, que permitió realizar ensayos clave para mi tesis, así como a Elecmetal y al Dr. Alex Escobar por su apoyo técnico y profesional.

Finalmente, agradezco profundamente a mi pareja, Camila Veira, quien llegó en el momento que más lo necesitaba, apoyándome siempre, haciéndome creer en mí mismo y recordándome que con esfuerzo puedo lograr todo lo que me proponga.

RESUMEN

Este trabajo evaluó técnica y económicamente tres tipos de arenas de moldeo (sílice, cromita y circón) en la fundición de piezas de hierro blanco alto en cromo, con el objetivo de reducir defectos de ametalamiento y optimizar el costo del proceso. En la fundición de metales, el moldeo en arena es uno de los procesos más comunes, y la calidad del molde juega un papel fundamental en la calidad de las piezas fundidas. El ametalamiento es un defecto frecuente en este tipo de procesos, causado por la penetración del metal fundido en el molde, lo que puede afectar negativamente las propiedades de la pieza. A través de caracterizaciones físicas, químicas y térmicas, se identificó que la arena de circón ofrece el mejor desempeño técnico debido a su alta refractariedad, baja expansión térmica y mínima interacción con el metal fundido, lo que reduce significativamente el ametalamiento y mejora la calidad superficial. Sin embargo, su alto costo limita su uso industrial a aplicaciones especializadas. La arena de cromita, con una refractariedad adecuada y buena conductividad térmica, mostró un desempeño intermedio, con menor tendencia al ametalamiento en comparación con la sílice y un costo más accesible que el circón. Por su parte, la arena de sílice presentó limitaciones técnicas significativas debido a su baja resistencia térmica y mayor reactividad química con el metal. Como solución balanceada, se propone combinar arena de cromita con recubrimientos a base de circón, mejorando la refractariedad y reduciendo defectos sin comprometer la relación costo-calidad. Esta estrategia demostró ser técnicamente viable y económicamente favorable para procesos de fundición industrial. En conclusión, la combinación de cromita y recubrimientos de circón representa una alternativa práctica y eficiente para optimizar procesos de fundición, destacándose la necesidad de validar estos resultados a escala industrial y explorar nuevas combinaciones de materiales para mejorar aún más la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

Palabras clave: Arenas de moldeo, moldes de arena, ametalamiento, reactividad térmica, fundición de alto cromo, eficiencia económica.

ABSTRACT

This study evaluated the technical and economic performance of three molding sands (silica, chromite, and zircon) in high-chromium white iron casting, focusing on reducing burn-on defects and optimizing costs. In metal casting, sand molding is one of the most common processes, and the quality of the mold plays a crucial role in the final quality of the cast parts. Burn-on is a common defect in such processes, caused by the penetration of molten metal into the mold, which negatively affects the properties of the piece. Physical, chemical, and thermal characterizations revealed that zircon sand offers the best technical performance due to its high refractoriness (2550 °C), low thermal expansion, and minimal reactivity with molten metal, significantly reducing burn-on defects and improving surface quality. However, its high cost limits its industrial application to specialized uses. Chromite sand, with adequate refractoriness (2180 °C) and good thermal conductivity, showed intermediate performance, exhibiting less burn-on than silica and a more accessible cost than zircon. Silica sand presented significant technical limitations due to its lower thermal resistance and higher reactivity with metal. As a balanced solution, combining chromite sand with zircon-based coatings improves refractoriness and reduces defects while maintaining a favorable cost-quality ratio. This approach proved to be technically feasible and economically advantageous for industrial casting processes. In conclusion, the combination of chromite and zircon coatings represents a practical and efficient alternative to optimize casting processes with the need to validate these findings on an industrial scale and explore new material combinations to enhance process efficiency and sustainability further.

Keywords: Molding sands, sand molds, burn-on, thermal reactivity, high chrome casting and economic efficiency.

ÍNDICE

1	CAPITULO 1 ANTECEDENTES INTRODUCTORIO	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.3	Hipótesis.....	2
1.4	Delimitaciones	2
2	CAPITULO 2 ANTECEDENTES GENERALES.....	3
2.1	La pirometalurgia.....	3
2.2	Fundiciones.....	3
2.3	Aleaciones ferrosas	4
2.3.1	Diagrama fase del hierro-carbono	4
2.3.2	Tipos de fundiciones de hierro	6
2.4	Moldeo.....	8
2.4.1	Componentes de un molde	10
2.4.2	Moldeo en arena	11
2.4.3	Moldeo en arena verde.....	12
2.4.4	Moldeo con resina.....	13
2.4.5	Defectos.....	14
2.4.6	Ametalamiento	16
2.5	Arenas de fundición	17
2.5.1	Morfología de las arenas	18
2.5.2	Granulometría de arenas	19
2.5.3	Número de finesa de grano.....	20
2.5.4	Arenas de sílice (SiO ₂).....	20

2.5.5	Arena de circonio ($ZrSiO_4$)	21
2.5.6	Arenas de cromita ($FeCr_2O_4$)	22
2.6	Técnicas de caracterización	23
2.6.1	Dilatometría.....	23
2.6.2	Difracción de rayos X	23
2.6.3	Microscopía electrónica de barrido	24
2.6.4	Calorimetría diferencial de barrido.....	24
3	CAPITULO 3 ESTADO DEL ARTE.....	25
4	CAPITULO 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
4.1	Objetivo 1: Caracterizar física, térmica, estructural y químicamente los tres tipos de arena de moldeo bajo estudio (sílice, circón y cromita).....	28
4.1.1	Caracterización estructural, química y física de las arenas.....	28
4.1.1.1	Preparación de material	28
4.1.1.2	Difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido....	30
4.1.1.3	Análisis químico.....	32
4.1.1.4	Distribución granulométrica, finesa de grano y morfología de las arenas.	32
4.1.1.5	Densidad	33
4.1.2	Caracterización térmica de las arenas	34
4.1.2.1	Estabilidad térmica	34
4.1.2.2	Sinterización y dilatación térmica	34
4.1.3	Composición química de la fundición.....	35
4.2	Objetivo 2: Estudiar la reactividad entre una fundición blanca alto cromo en estado líquido y las arenas de moldeo base sílice, circonita y cromita.....	36
5	CAPITULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES	38
5.1	Caracterización física y química de las arenas	38

5.1.1	Caracterización morfológica de las arenas.....	38
5.1.2	Morfología de grano	41
5.1.3	Densidad.....	44
5.1.4	Difracción de rayos X.....	46
5.1.5	Caracterización microscopía electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS).....	49
5.1.6	Análisis químico arenas	54
5.1.7	Comparación distintas arenas.....	55
5.2	Caracterización térmica de las arenas	56
5.2.1	Termogravimetría/calorimetría.....	56
5.2.3	Sinterización y dilatación térmica de las arenas.....	60
5.3	Composición química de la fundición	64
5.4	Reactividad entre la fundición blanca alta en cromo y las distintas arenas de moldeo	64
5.4.1	Preparación material	64
5.4.2	Termobalanza	66
5.4.3	Metalografía y difracción rayos X de la arena de sílice post calentamiento.....	68
5.4.4	Metalografía y difracción rayos X de la arena de cromita post calentamiento.....	71
5.4.5	Metalografía y difracción rayos X de la arena de circón post calentamiento.....	74
5.5	Estudio económico.....	76
6	CAPITULO 6 CONCLUSIONES	78
7	CAPITULO 7 REFERENCIAS	81
8	CAPITULO 8 ANEXO	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Molde de arena (Askeland & Wright, 2017).	4
Figura 2.2 Diagrama hierro-carbono (Kalpakjian, 2008)	6
Figura 2.3 Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: a) hierro gris, b) hierro blanco, c) hierro maleable, d) hierro dúctil, e) hierro con grafito compactado (Kalpakjian, 2008)	8
Figura 2.4 Esquema de dos tipos de molde, a) molde abierto y b) molde cerrado (Groover, 2007)	9
Figura 2.5 Etapas en molde permanente, a) se precalienta y recubre el molde, b) se insertan los núcleos (si los hay) y se cierra el molde, c) se vierte metal derretido en el molde y d) se abre el molde. La pieza terminada se presenta en e). (Groover, 2007).	10
Figura 2.6 Proceso de moldeo en arena	11
Figura 2.7 Molde arena verde.....	12
Figura 2.8 Moldeo con resina.....	13
Figura 2.9 Moldeo con resina inyectada	14
Figura 2.10 Esquemización de los defectos comunes en fundiciones (Kalpakjian, 2008)	15
Figura 2.11 Pieza fundida con presencia de ametalamiento	16
Figura 2.12 Morfología arenas (Foseco, 2000)	18
Figura 4.1 Esquema muestro y utilización material	29
Figura 4.2 Proceso de homogenización con cortador tipo Riffle de la marca Retsch, modelo Riffelteir 6.5	29
Figura 4.3 Cortador de Riffle modelo SS-16-3X de la marca Outotec.....	30
Figura 4.4 Pulverizado arena.....	30
Figura 4.5 Difractómetro marca Shimadzu modelo XRD 6100.....	31
Figura 4.6 Microscopio electrónico de barrido (MEB) Zeiss EVO MA10 con detector EDS Oxford, marca X- MaxN 20 SDN.....	31

Figura 4.7a Serie tamices gruesos	32
Figura 4.7b Serie tamices finos	32
Figura 4.8 TA instruments modelo Discovery SDT 650	34
Figura 4.9 TA instruments modelo ODP 868.....	35
Figura 4.10 Briquetas de arena para dilatometría.....	35
Figura 4.11 Termobalanza Nabertherm modelo LHT 04/16 SW	36
Figura 4.12 Briquetadora a) y briqueta pulida b)	37
Figura 4.13 Pulidora Presi Le Cube.....	37
Figura 5.1 Análisis granulométrico mediante retenido parcial de las distintas arenas de moldeo proporcionadas por ME Elecmetal.....	39
Figura 5.2 Análisis granulométrico mediante acumulado pasante de las distintas arenas de moldeo proporcionadas por ME Elecmetal.....	39
Figura 5.3 MEB arena de sílice, utilizando electrones retrodispersados	42
Figura 5.4 MEB arena de cromita Somarriva, utilizando electrones retrodispersados....	42
Figura 5.5 MEB arena de cromita Urzquen, utilizando electrones retrodispersados	42
Figura 5.6 MEB arena circón grueso, utilizando electrones retrodispersados	43
Figura 5.7 MEB arena circón fino, utilizando electrones retrodispersados	43
Figura 5.8 Matraz Le Chatelier	44
Figura 5.9 Picnómetro arenas de moldeo.....	44
Figura 5.10 Difractograma Análisis DRX arena de sílice Paraná.....	46
Figura 5.11 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Somarriva.....	47
Figura 5.12 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Urzquen.....	47
Figura 5.13 Difractograma Análisis DRX arena de circón grueso.....	48
Figura 5.14 Difractograma Análisis DRX arena de circón fino.....	48
Figura 5.15 MEB y mapeo de EDS arena de sílice	49
Figura 5.16 MEB y mapeo de EDS arena de Cromita Somarriva.....	50

Figura 5.17 MEB y mapeo de EDS arena de Cromita Urzquen.....	51
Figura 5.18 MEB y mapeo de EDS arena de Circón Grueso	52
Figura 5.19 MEB y mapeo de EDS arena de Circón Fino	53
Figura 5.20 Termogravimetría/calorimetría arena de sílice Paraná.....	56
Figura 5.21 Termogravimetría/calorimetría arena de Cromita Somarriva.....	57
Figura 5.22 Termogravimetría/calorimetría arena de Cromita Urzquen	58
Figura 5.23 Termogravimetría/calorimetría arena de Circón Grueso.....	59
Figura 5.24 Termogravimetría/calorimetría arena de Circón Fino.....	59
Figura 5.25 Dilatometría arena de sílice Paraná.....	61
Figura 5.26 Dilatometría arena de Cromita Somarriva.....	61
Figura 5.27 Dilatometría arena de Cromita Urzquen	62
Figura 5.28 Dilatometría arena de Circón Grueso.....	62
Figura 5.29 Dilatometría arena de Circón Fino.....	63
Figura 5.30 Sección de bola de molienda utilizada para la extracción de trozos de fundición blanca alta en cromo.....	64
Figura 5.31 Esquirlas de fundición.....	65
Figura 5.32 Crisol de alúmina roto con el material	66
Figura 5.33 Disposición arena y fundición dentro del crisol a) vista lateral crisol b) vista superior crisol	66
Figura 5.34 Diagrama de fase Fe-Cr (AL-Mangour, 2013).....	67
Figura 5.35 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de sílice Paraná 1000x.....	69
Figura 5.36 Difractograma de Rayos X de arena de sílice Somarriva post calentamiento	70
Figura 5.37 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de Cromita Somarriva 70x.....	72
Figura 5.38 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Somarriva post calentamiento	73

Figura 5.39 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de Circón Grueso 1000x..... 75

Figura 5.40 Difractograma Análisis DRX arena de circón grueso post calentamiento... 76

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Influencia de la morfología de los granos de arena (USACH, 2002)	18
Tabla 2.2 Distribución granulométrica arenas.....	19
Tabla 2.3 Composición típica de las arenas de sílice (Callister, 2016)	20
Tabla 2.4 Propiedades arenas de sílice (Callister, 2016)	21
Tabla 2.5 Composición típica de las arenas de circonio (<i>Zircon Sand-Zhengzhou Haixu Abrasives Co.,Ltd</i> , s. f.).....	21
Tabla 2.6 Propiedades arenas de circonio (<i>Zircon Sand-Zhengzhou Haixu Abrasives Co.,Ltd</i> , s. f.).....	22
Tabla 2.7 Composición típica de las arenas de cromita (<i>Chromite Sand</i> , s. f.).....	22
Tabla 2.8 Propiedades arenas de cromita (<i>Chromite Sand</i> , s. f.).....	22
Tabla 5.1 D ₅₀ , D ₈₀ arenas y finesa de grano	40
Tabla 5.2 Factor de forma (Campbell, 2011).....	41
Tabla 5.3 Promedio factor de forma de las arenas de moldeo	41
Tabla 5.4 Resultados mediciones arenas mediante picnómetro	45
Tabla 5.5 Medición arenas de cromita.....	54
Tabla 5.6 Medición arena de sílice y arenas de circón	54
Tabla 5.7 Cuadro comparativo arenas	55
Tabla 5.8 Composición química elemental bola fundida alta en cromo.....	64
Tabla 5.9 Valores de arena.....	76
Tabla 7.1 Análisis granulométrico arena de sílice.....	84
Tabla 7.2 Análisis granulométrico arena de cromita Urzquen.....	84
Tabla 7.3 Análisis granulométrico arena de cromita Somarriva.....	85
Tabla 7.4 Análisis granulométrico circón grueso.....	85
Tabla 7.5 Análisis granulométrico arena de circón fino	86
Tabla 7.6 Finesa de grano arena de sílice	86

Tabla 7.7 Finesa de grano arena de cromita Urzquen.....	87
Tabla 7.8 Finesa de grano arena de cromita Somarriva.....	87
Tabla 7.9 Finesa de grano arena de circón grueso.....	88
Tabla 7.10 Finesa de grano arena de circón fino.....	88
Tabla 7.11 Calculo factor de forma arena de sílice Paraná.....	89
Tabla 7.12 Calculo factor de forma arena de cromita Somarriva.....	90
Tabla 7.13 Calculo factor de forma arena de cromita Urzquen	91
Tabla 7.14 Calculo factor de forma arena de circón grueso.....	92
Tabla 7.15 Calculo factor de forma arena de circón fino.....	93
Tabla 7.16 Calculo densidad alcohol isopropílico.....	93
Tabla 7.17 Calculo densidad de las arenas.....	94

1 CAPITULO 1 ANTECEDENTES INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

La metalurgia desempeña un papel crucial en la industria manufacturera al transformar las materias primas en un producto final de alta calidad. En este contexto, el proceso de fundición es fundamental para la creación de piezas de hierro con estructuras complejas. Uno de los puntos críticos a considerar dentro de una buena fundición es la arena con la que se constituye el molde (Kassie, 2013).

Las arenas de moldeo son la base de la creación de moldes, lo cual repercute en la geometría de las piezas metálicas resultantes. Estas arenas deben tener propiedades adecuadas, ya que deben ser capaces de soportar altas temperaturas, proporcionar una buena calidad superficial y garantizar suficiente permeabilidad a los gases (Bisbal et al., 2015). Adicionalmente, las arenas deben poseer una elevada estabilidad química, de modo de reducir su reacción con el metal fundido y evitar el denominado ametalamiento de la arena, el cual genera acreciones superficiales difíciles de eliminar (Kalpakjian, 2008).

En el mercado se encuentran diversos tipos de arenas de moldeo destinadas a aleaciones ferrosas, abarcando desde aquellas con altas concentraciones de sílice, hasta las que presentan niveles elevados de circonio (Tartera, 2008). Estas arenas se diferencian no solo por sus propiedades físico-químicas, sino también por su valor económico, posicionándose como un elemento fundamental en la optimización técnico-económica de cualquier proceso de fundición.

En base a lo expuesto, el presente trabajo tuvo como propósito realizar una evaluación técnico-económica del uso de tres tipos de arena empleadas por la empresa ME Elecmetal para el proceso de moldeo de piezas de fundiciones blancas de alto cromo, con el objetivo de reducir la posibilidad de ametalamiento de la arena durante el proceso de moldeo al menor costo posible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Realizar una evaluación técnico-económica a escala laboratorio del uso de tres tipos de arena (sílice, circón y cromita) en el proceso colada de fundiciones blancas de alto cromo, con el propósito de reducir la posibilidad de ametalamiento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física, estructural y químicamente los tres tipos de arena de moldeo bajo estudio (sílice, circón y cromita).
- Estudiar la reactividad entre una fundición blanca alto cromo en estado líquido y las arenas de moldeo base sílice, circonita y cromita.
- Seleccionar en base a criterios técnicos y económicos el tipo de arena idóneo para reducir el ametalamiento en el proceso de moldeo de fundiciones blancas de alto cromo.

1.3 Hipótesis

A medida que aumenta la refractariedad y estabilidad química de una arena de moldeo, se espera que su tendencia a formar acreciones metálicas producto de su interacción con el metal fundido disminuya.

1.4 Delimitaciones

- Las pruebas se llevaron a cabo a nivel de laboratorio utilizando muestras de dimensiones reducidas en comparación con las empleadas en aplicaciones industriales.
- Se desarrolló un análisis económico preliminar para determinar la alternativa más adecuada de arena de moldeo en un tipo específico de molde utilizado por la empresa ME Elecmetal. Este análisis se basó en los resultados experimentales obtenidos y en información de costos proporcionada por la empresa.

2 CAPITULO 2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 La pirometalurgia

Dentro de la metalurgia, la pirometalurgia es uno de los procesos más antiguos que existe, siendo uno de los pilares fundamentales en la historia de la humanidad. Este proceso se basa en la obtención de metales a partir de minerales o concentrados minerales, mediante la aplicación de altas temperaturas en hornos o reactores (Enrique, 1988).

Las primeras evidencias registradas de fundición de metales se encuentran alrededor del año 4000 a.C. para fabricar ornamentos, puntas de cobre para flechas y otros objetos (Kalpakjian, 2008).

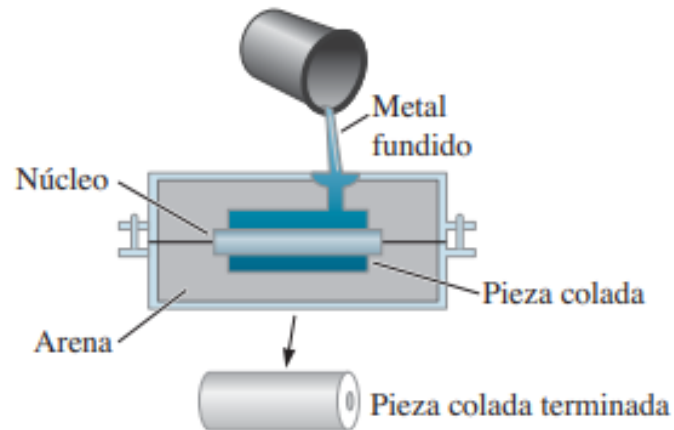
La historia de la pirometalurgia en Chile se remonta a tiempos precolombinos, cuando las culturas indígenas obtenían cobre a través de métodos rudimentarios. Con la llegada de los españoles en el siglo XVI, se introdujeron técnicas más avanzadas. En el siglo XIX, la minería del cobre experimentó un auge, convirtiendo a Chile en uno de los principales productores mundiales de este metal (Origen de la gran minería del cobre (1904-1930) - Memoria Chilena, s/f).

2.2 Fundiciones

Una fundición es una pieza metálica, la que se obtiene mediante la colada de un metal fundido en un molde, el cual tiene una forma específica (Figura 2.1). Estos moldes deben de tener ciertas particularidades dadas la temperatura de colada, la contracción del metal durante la solidificación, el escape de gases del molde, entre otros factores (Groover, 2007). Algunos aspectos importantes a considerar dentro de las fundiciones son:

- El flujo del metal fundido en el molde utilizado.
- La solidificación y el tiempo de enfriamiento.
- La influencia del molde en el metal.
- Las cavidades del molde que puedan quedar incompletas.
- La extracción del gas del molde.

Figura 2.1 Molde de arena (Askeland & Wright, 2017).



2.3 Aleaciones ferrosas

El acero es una aleación entre hierro y carbono, la cual contiene pequeñas cantidades de otros elementos aleantes como manganeso, silicio y cromo. El porcentaje máximo de carbono en este tipo de materiales no supera el 2 % en masa (Groover, 2007). A diferencia de los aceros, las fundiciones de hierro presentan un contenido de carbono entre 2 y 5 % en masa (Callister, 2016). Adicionalmente, los aceros generalmente son sometidos a procesos de conformado (laminación, forja, etc.), mientras que las fundiciones son coladas directamente en moldes para confeccionar piezas de uso final, ya que los elevados porcentajes de carbono (superiores a 2,1% en masa), obteniendo fragilidad y una microestructura muy dura (Callister, 2016).

2.3.1 Diagrama fase del hierro-carbono

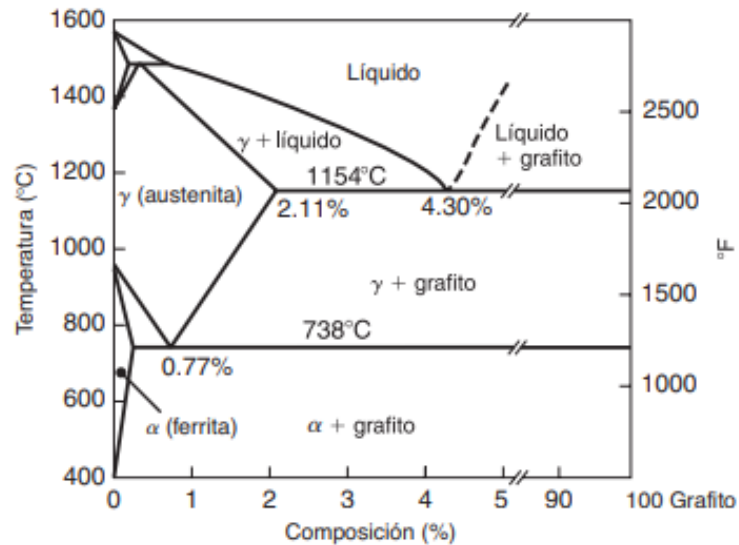
La comprensión de los diagramas de fase dentro de una aleación es importante, dada la relación que existe entre la composición de la aleación con su microestructura y propiedades mecánicas (Callister, 2016).

En la práctica, la mayoría de las fundiciones presentan un rango de contenido de carbono que varía entre 3 y 4,5 %. Además de este carbono, el hierro fundido también posee otros elementos o impurezas los cuales quedan atrapados dentro de la matriz durante el proceso de fundición lo cual afecta las propiedades mecánicas finales del metal. Los hierros fundidos según el diagrama de hierro carbono (Figura 2.2), tienen el punto eutéctico a una temperatura de 1154°C y un contenido de carbono de 4,3% en masa, por lo cual los hierros fundidos tienen un punto de fusión menor a los aceros, facilitando el trabajo de los mismos en estado líquido en comparación a los aceros (Kalpakjian, 2008).

Dentro del diagrama de hierro-carbono, la ledeburita, desempeña un papel fundamental en la caracterización de las fundiciones, la cual se define como la estructura eutéctica formada entre Fe/Fe₃C y que se genera este microconstituyente durante el enfriamiento a 1145°C, en el punto eutéctico. Con aproximadamente un 52% de cementita y un 48% de austenita (Criado Portal, 2008).

Las estructuras de ledeburita generalmente se forman en un proceso de dos etapas. En la primera etapa, en las aleaciones hipereutécticas (aquellas con un contenido de carbono superior al punto eutéctico de 4.3 %), se genera hierro blanco con el crecimiento de dendritas en placas de Fe₃C (cementita). En cambio, en las aleaciones hipoeutécticas (aquellas con un contenido de carbono inferior al punto eutéctico de 4.3 %), las dendritas de Fe₃C (cementita) crecen alrededor de las dendritas preexistentes de austenita. En la segunda etapa, tanto para aleaciones híper como hipoeutécticas, se produce un crecimiento eutéctico cooperativo de la austenita y el Fe₃C en los lados de las placas primarias de Fe₃C a medida que el líquido entre las placas solidifica (Trepczyńska-Łent, 2013).

Figura 2.2 Diagrama hierro-carbono (Kalpakjian, 2008)



2.3.2 Tipos de fundiciones de hierro

Los hierros fundidos son comúnmente clasificados según su morfología de solidificación, a partir de su temperatura eutéctica, así como también pueden clasificarse por su estructura o el color de la fractura y mostrado en la Figura 2.3 (Kalpakjian, 2008).

- Hierro fundido gris, o hierro gris, en esta estructura existe grafito en forma de hojuelas interconectadas, y es llamado de esta manera porque al fracturarse la fractura recorre las hojuelas de grafito, consiguiendo una fractura de color gris. Las hojuelas generan concentradores de esfuerzo, lo que vuelve frágil al material. Aun cuando ocurre esto, tiene la característica de poder amortiguar vibraciones disipando energía, alta resistencia a la compresión, buena capacidad de maquinado, buena resistencia térmica y al desgaste haciendo que sea un material muy útil para herramientas y maquinaria.
- Hierro fundido blanco o fundición blanca, este hierro se obtiene mediante un enfriamiento rápido del hierro fundido, teniendo una estructura muy dura, resistente al desgaste y frágil, a diferencia de la fundición gris, aquí se presenta

una fractura de color blanco, la microestructura de una fundición blanca está compuesta por lebedurita.

Las fundiciones blancas aleadas, son usadas usualmente para aplicaciones en las que se debe tener una alta resistencia a la abrasión, lo cual está dado por el gran volumen de carburos eutécticos que posee en la microestructura, teniendo una alta dureza necesaria para molienda u otros procesos (Florez et al., 2012).

Las fundiciones blancas aleadas en porcentaje masa caracterizan de tres distintos grupos (Florez et al., 2012):

- Fundiciones Ni-Cr (ASTM A744), las cuales tienen bajas cantidades de cromo, con contenidos de Ni entre 3 a 5% y 1 a 4% en masa de Cr. Estas fundiciones son identificadas comercialmente con el nombre Ni-Hard 1 a 4.
- Fundiciones Cr-Mo (ASTM A532), las cuales contienen de 11 a 23% en masa de Cr, además de contener hasta 2% en masa de Mo, además de esto se suelen alea adicionalmente usando cobre o níquel.
- Fundiciones blancas altas en Cr de 25 o 28% en masa (ASTM A532), las cuales pueden contener otros aleantes como Mo o Ni hasta un 1,5% en masa.

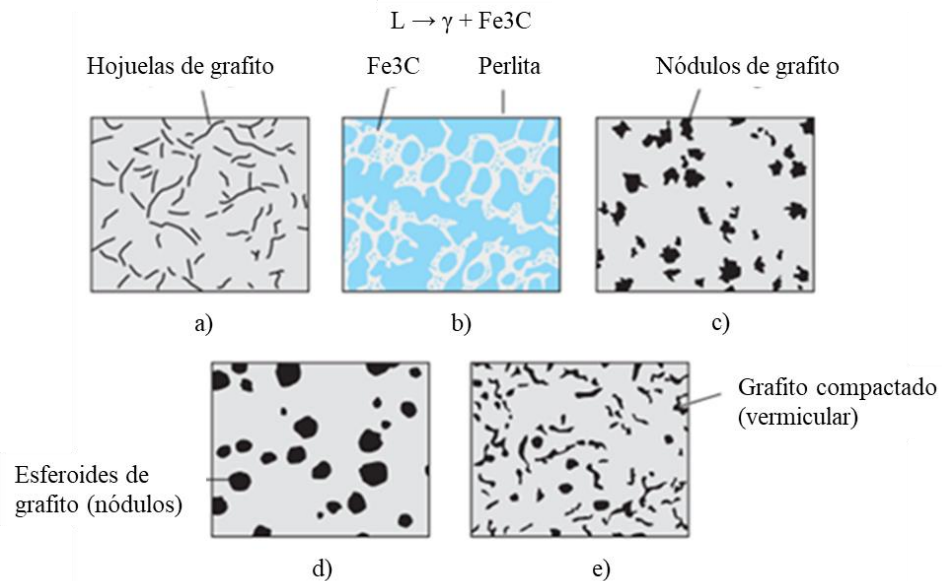
c) Hierro maleable, el cual se obtiene realizando un proceso de recocido a una fundición blanca, utilizando una atmosfera de carbono, a un rango de temperatura de 800 a 900°C, lo que le da al hierro propiedades mecánicas dúctil y de alta resistencia.

d) Hierro fundido dúctil, hierro fundido nodular o hierro fundido de grafito esferoidal, aquí como su nombre indica, el grafito se encuentra en forma nodular o esferoidal, permitiendo que el metal sea dúctil y resistente al impacto. Para esto se utiliza una fundición gris en estado líquido en la cual las hojuelas de grafito se convierten en nódulos con la adición de Mg y/o Ce antes del proceso de colado.

e) Hierro grafito compactado, en esta estructura, se tiene el grafito en forma de hojuelas como en una fundición gris, pero estas son más cortas, gruesas e interconectadas, además de ser más redondeadas. Esta fundición de grafito

compactado tiene propiedades mecánicas que se encuentran entre un hierro fundido gris y un hierro fundido nodular.

Figura 2.3 Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: a) hierro gris, b) hierro blanco, c) hierro maleable, d) hierro dúctil, e) hierro con grafito compactado (Kalpakjian, 2008)



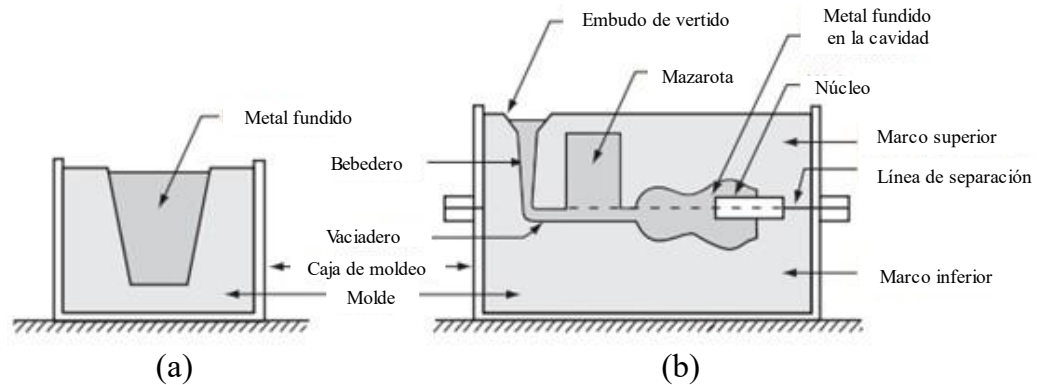
2.4 Moldeo

El moldeo consiste en verter un metal totalmente líquido en la cavidad de un molde que tiene una forma prevista (Askeland et al., 2017). Luego de esto el metal solidificará adquiriendo la forma que tenía el molde, con una pequeña contracción, la cual depende únicamente del metal a solidificar. Posterior a la solidificación, se retira el molde obteniendo la pieza, la cual debe ser llevada a un proceso final de maquinado, de modo de retirar los excesos de metal debido a los alimentadores, mazarotas y las acreciones superficiales (Groover, 2007).

Dentro del proceso de moldeo, este puede realizarse en moldes abiertos o cerrados como muestra la Figura 2.4. En un molde abierto el líquido se vierte en la cavidad hasta llenarse completamente, en cambio, en un molde cerrado es más complejo el proceso, hay que considerar sistema de paso, en donde el metal pase para llenar la cavidad, donde se

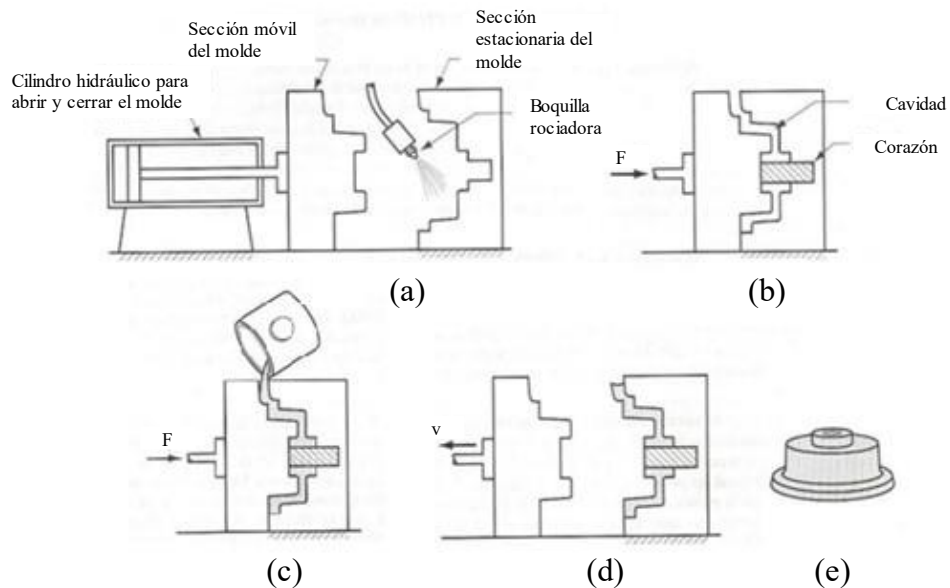
tiene una mazarota, la cual tiene el fin de compensar la contracción del metal teniendo un exceso de metal fundido disponible al momento de solidificar (Groover, 2007).

Figura 2.4 Esquema de dos tipos de molde, a) molde abierto y b) molde cerrado (Groover, 2007)



Los procesos de fundición se clasifican según el tipo de molde utilizado. Por un lado, están los moldes desechables, que deben destruirse para retirar la pieza solidificada. Estos moldes se fabrican con diversos materiales, como arena, yeso o barro, siendo la fundición en arena la más comúnmente empleada en la industria debido a su versatilidad y eficiencia. Así como también, se tiene moldes permanentes (Figura 2.5), los cuales pueden reutilizarse para producir varias piezas. Estos moldes se fabrican de metal o material refractario y se caracteriza por tener dos o más secciones que se pueden abrir para retirar la pieza solidificada (Groover, 2007).

Figura 2.5 Etapas en molde permanente, a) se precalienta y recubre el molde, b) se insertan los núcleos (si los hay) y se cierra el molde, c) se vierte metal derretido en el molde y d) se abre el molde. La pieza terminada se presenta en e). (Groover, 2007).



2.4.1 Componentes de un molde

Se identifican las siguientes partes de un molde, presentadas en la Figura 2.4 (Groover, 2008):

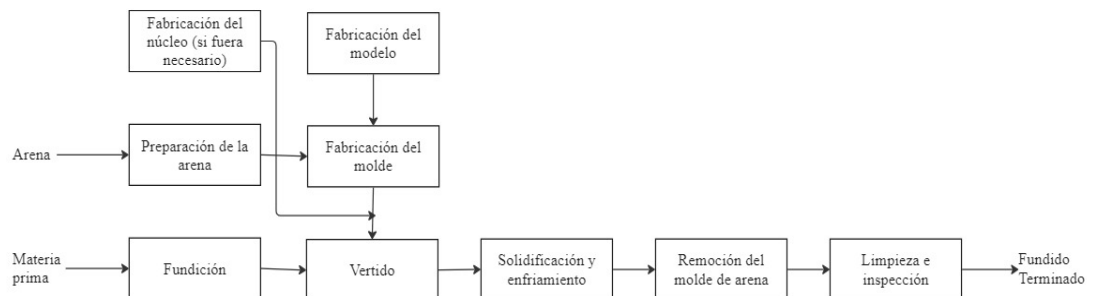
- Embudo de vertido o vaso: es el lugar donde se vierte el metal líquido.
- Bebedero o jítio: es por donde fluye el metal líquido hacia el molde.
- Caja de moldeo: es una caja metálica que contiene el molde en arena, generalmente compuesta por dos partes: la tapa y el fondo (superior e inferior).
- Molde: es la arena endurecida con resinas que contiene la cavidad interior con la forma negativa de la pieza a fundir.
- Vaciadero o canal de alimentación: regula el flujo del metal líquido hacia la cavidad del molde, también conocido como ataque.
- Mazarota o montante: es un volumen adicional de metal líquido que, debido a la gravedad, permite llenar los espacios generados por la contracción del metal al solidificarse, evitando la formación de cavidades internas.

2.4.2 Moldeo en arena

El método más tradicional de fundición en metales es el que utiliza moldes de arena, se ha utilizado por milenios y todavía es la forma prevaleciente de fundición. La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden trabajarse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, aleaciones de níquel y aleaciones de titanio (Kalpakjian, 2008).

El proceso de fundición en arena se realiza siguiendo los pasos indicados en el esquema presentado en la Figura 2.6, en donde se utiliza un modelo con la forma deseada para imprimir en la arena, se le agrega un sistema de alimentación, con la creación del molde se rellena el mismo utilizando el metal fundido hasta llenar completamente permitiendo al metal solidificarse, finalmente se separa el molde de la pieza fundida.

Figura 2.6 Proceso de moldeo en arena



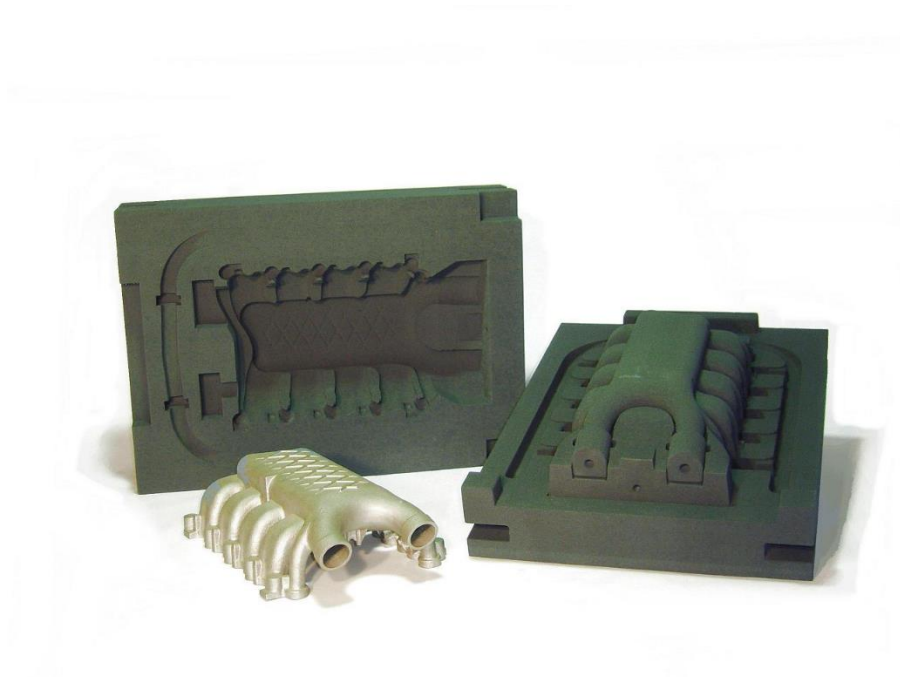
Es un proceso económico, ya que la arena utilizada puede ser reciclada y permite que el molde se colapse cuando la pieza fundida se contrae al enfriarse, evitando daños o grietas en la pieza fundida (Kalpakjian, 2008).

2.4.3 Moldeo en arena verde

El moldeo en arena verde es uno de los primeros métodos utilizados para crear moldes, el término de “verde” se refiere a un molde húmedo (2 a 5% humedad), en estos moldes se unen los granos de la arena utilizando arcilla y agua como un aglutinante, tal como se aprecia en la Figura 2.7. Además, estos moldes podían secarse en un horno a baja temperatura para así poder fortalecerlos (Foseco, 2000).

En la actualidad, la arena verde sigue siendo uno de los medios de moldeo más utilizado, especialmente para las fundiciones de hierro. Hace 40 años, el 90% de todas las fundiciones de acero se producían en moldes de arena verde, pero esto ha disminuido y la mayoría de las fundiciones de acero se hacen ahora en moldes de arena mezclados con resinas o aglutinantes químicos, los cuales no requieren de humedad para su confección (Foseco, 2000).

Figura 2.7 Molde arena verde



2.4.4 Moldeo con resina

En la actualidad, se han desarrollado nuevos métodos para el moldeo en fundición, entre los cuales destaca el moldeo con resina. Este proceso se basa en la creación de un molde abierto que se recubre con una resina especial (Figura 2.8), seleccionada por sus propiedades específicas para garantizar la resistencia y estabilidad necesarias durante el moldeo.

Una variante de este método es el moldeo por inyección de resina, donde se utiliza una pieza preformada y reforzada, diseñada para cumplir con los requisitos estructurales y de rendimiento del producto final. En este caso, la resina se inyecta en la cavidad del molde, impregnando el refuerzo de fibra para lograr una consolidación uniforme y una mejor integración de las propiedades mecánicas (Figura 2.9).

Ambos métodos ofrecen ventajas significativas, como un mayor control en la calidad del molde y la posibilidad de adaptarse a requisitos técnicos más exigentes (Hsiao et al., 2012).

Este proceso de moldeo permite que se puedan elaborar piezas muy grandes. Se usa comúnmente en la aeronáutica, o cascos de embarcaciones dada su flexibilidad, para poder utilizar moldes abiertos con resina (Taipe, 2018).

Figura 2.8 Moldeo con resina

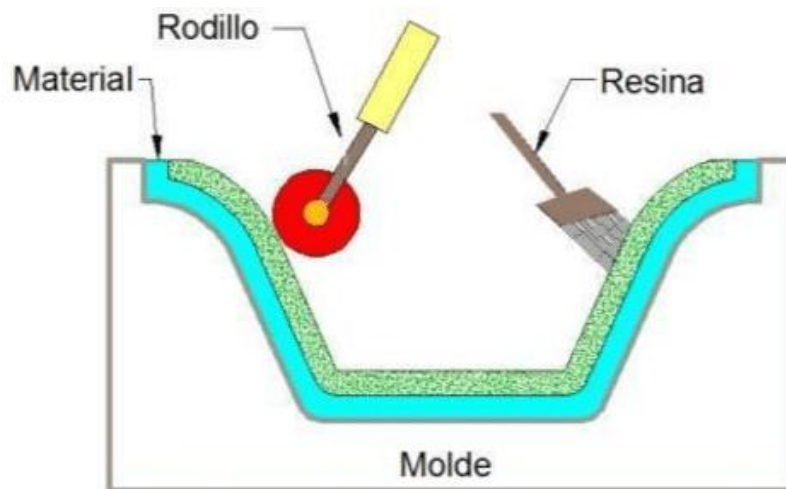
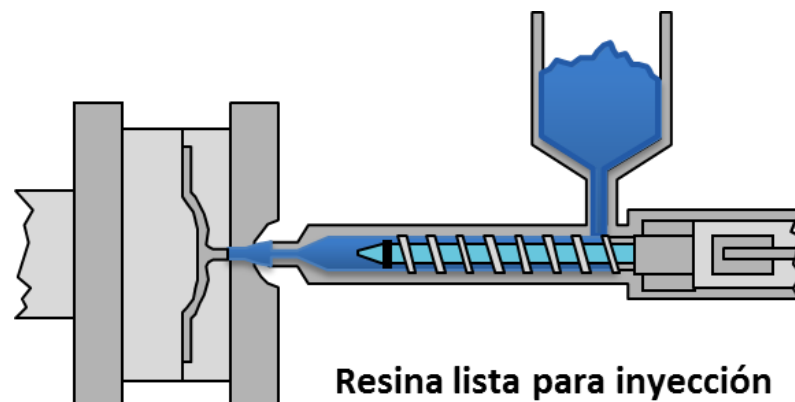


Figura 2.9 Moldeo con resina inyectada



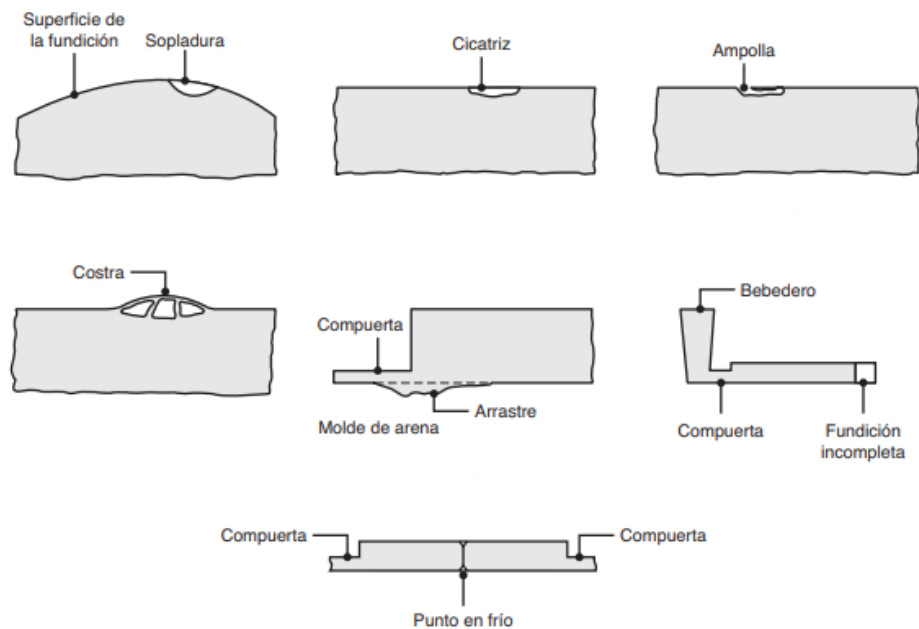
2.4.5 Defectos

Dentro de las fundiciones, existen distintos defectos los cuales afectan a la pieza final, hay muchas razones para los defectos en las fundiciones en arena, los cuales pueden modificar la apariencia de la pieza final, así como afectarla mecánicamente. El “International Committee of Foundry Technical Associations”, clasificó los defectos en distintas categorías para poder identificarlas de mejor manera, los cuales algunos son ejemplificados en la Figura 2.10 (Kalpakjian, 2008):

- **Proyecciones metálicas:** estas consisten en rebabas o proyecciones metálicas, las cuales son solamente un defecto superficial.
- **Cavidades:** consiste en cavidades redondeadas o rugosas, las cuales pueden ser tanto internas como expuestas, que incluye sopladuras o cavidades por contracción del metal al enfriar.
- **Discontinuidades:** se producen cuando el metal no puede contraerse libremente durante la solidificación, presentando grietas o roturas en la superficie del metal, en este defecto afecta el tamaño de grano, así como la presencia de segregaciones.
- **Superficie defectuosa:** aquí se tienen pliegues y cicatrices superficiales, así como puede haber capas de arena adherida al metal o escamas de óxido.
- **Fundición incompleta:** cuando se tiene una solidificación prematura o un volumen insuficiente de metal vaciado, puede quedar el molde con partes pobres en metal quedando una pieza que no cumpliría correctamente su funcionamiento.

- Dimensiones o formas incorrectas: si no se tiene en consideración correctamente la contracción del metal, así como una contracción irregular o un mal montaje, la pieza solidificará de manera no deseada.
- Inclusiones: estas se forman durante la fusión, solidificación y moldeo, las cuales generalmente son no metálicas, son partículas pequeñas las cuales quedan atrapadas dentro de la fundición. Estas son muy perjudiciales para la fundición, ya que las mismas generan concentradores de esfuerzo, afectando las propiedades mecánicas reduciendo su resistencia y siendo más probable que el metal pueda tener una fractura.

Figura 2.10 Esquematización de los defectos comunes en fundiciones (Kalpakjian, 2008)

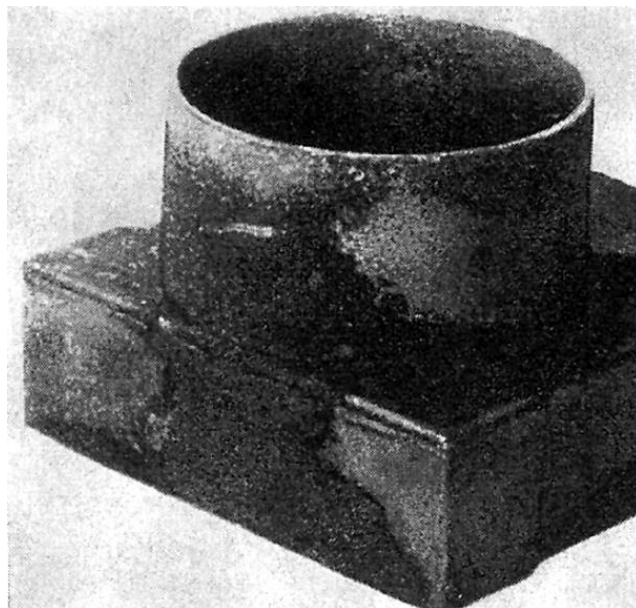


2.4.6 Ametalamiento

Este es un defecto del tipo superficie defectuosa, muy común dentro de las fundiciones en arena, en el que el metal líquido llena los espacios vacíos en el molde de arena o el núcleo, sin desplazar los granos, lo que provoca que la arena o los óxidos producto de la fusión se adhieran a la superficie de la pieza fundida. Se produce cuando el hierro líquido en la interfaz entre el molde y el metal penetra superficialmente en el molde. Normalmente, esto sucede cuando el metal en la interfaz entre el molde y el metal permanece lo suficientemente caliente durante un tiempo prolongado como para descomponer parcialmente el aglutinante o el recubrimiento del molde, mientras permanece parcialmente líquido. Solo entonces el metal puede fluir hacia la arena del molde (Brooks & Beckermann, 2006).

El fenómeno del ametalamiento se da comúnmente cercano a las zonas calientes de la fundición a altas temperaturas, la arena de moldeo sinteriza sobre la pieza fundida en forma de una fina costra debido a su baja resistencia térmica. La tendencia del metal fundido a penetrar en los poros de la arena da como resultado la firme adherencia de la corteza a la superficie de la pieza fundida. La cual es difícil de eliminar, incluso mediante granallado, y normalmente hay que maquinarlo y lijarlo (Figura 2.11) (Li et al., 2008).

Figura 2.11 Pieza fundida con presencia de ametalamiento



2.5 Arenas de fundición

Para elegir la arena adecuada para los moldes, es necesario considerar varios factores y hacer concesiones en términos de propiedades. Por ejemplo, la arena con granos finos y redondos se puede compactar más firmemente, lo que resulta en una superficie más lisa en el molde. Sin embargo, la arena de grano fino también disminuye la permeabilidad del molde, es decir, su capacidad para permitir la penetración a través de los poros, lo que puede ser un inconveniente (Kalpakjian, 2008).

Algunas de las características que debe tener una buena arena de fundición son, una alta refractariedad, para poder soportar altas temperaturas sin fundirse, cohesión, para mantener la forma moldeada, permeabilidad y una buena maleabilidad, para poder darle la forma requerida

Además de las características mencionadas anteriormente, para elegir una arena en comparación a otra debemos buscar nuestros requerimientos para la misma, por lo cual se comparan con las siguientes propiedades para elegir la más idónea (Lamas & Valderrama, 2006):

- Estabilidad térmica y dimensional a elevadas temperaturas.
- Apropiado tamaño y forma del grano.
- No debe reaccionar químicamente y mezclarse fácilmente con el metal fundido.
- Debe dar libertad para el escape de los gases producidos por el calor.
- Disponibilidad económica.
- Composición química.
- Compatibilidad con el sistema de aglomeración.

2.5.1 Morfología de las arenas

La morfología de una arena está definida por la angularidad y esfericidad de los granos como se ve en la Figura 2.12, Las mejores arenas de fundición tienen granos que son redondeados con una esfericidad media a alta, lo que proporciona una buena fluidez y permeabilidad con una alta resistencia a bajas adiciones de aglomerante (Tabla 2.1). Las arenas más angulares y con una esfericidad más baja requieren mayores adiciones de aglomerante, tienen una densidad de empaque más baja y una peor fluidez (Foseco, 2000).

Figura 2.12 Morfología arenas (Foseco, 2000)

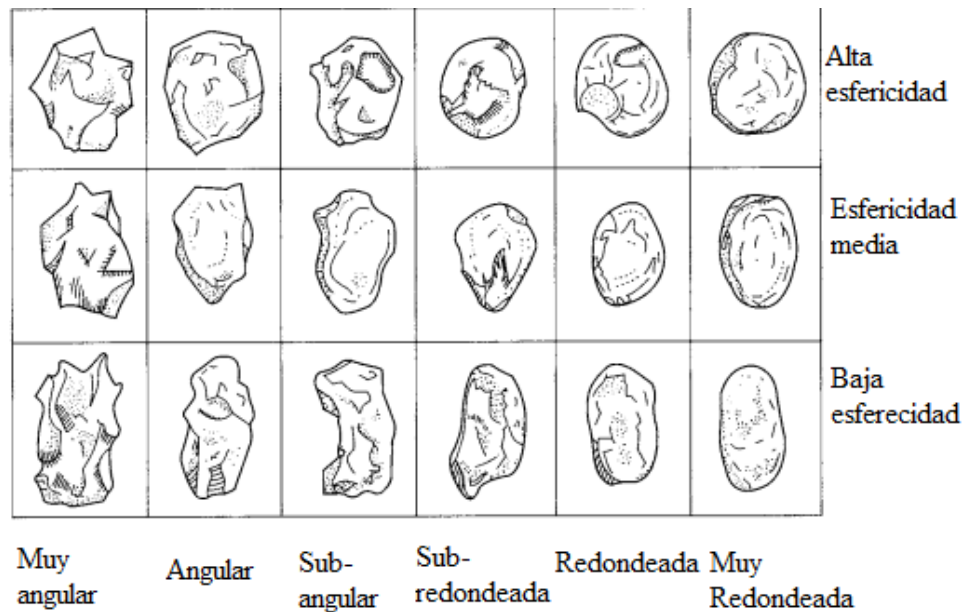


Tabla 2.1 Influencia de la morfología de los granos de arena (USACH, 2002)

Granos redondos.	Granos angulares.
Aumenta fluidez.	Disminuye fluidez
Aumenta la colapsabilidad.	Disminuye la colapsabilidad.
Aumenta permeabilidad.	Disminuye permeabilidad.
Disminuye el % de catalizador / resina para una resistencia determinada.	Aumenta el % de catalizador / resina para una resistencia determinada por mayor superficie específica

2.5.2 Granulometría de arenas

La distribución granulométrica de las arenas es crucial en la calidad del proceso de fundición. Las arenas de grano grueso, es más probable que penetrar el metal en el molde o núcleos, quedando un mal acabado superficial en las piezas fundidas. Por otro lado, se tiene arenas de grano fino, las cuales ofrecen un mejor acabado superficial, pero necesitan utilizar más aglomerante en el proceso y al tener baja permeabilidad puede atrapar gases en la pieza fundida, una arena optima debería tener las características indicadas en la Tabla 2.2 (Foseco, 2000).

Tabla 2.2 Distribución granulométrica arenas

Fineza del grano	50-50 AFS*	Produce un buen acabado superficial con niveles bajos de aglutinante
Tamaño promedio de grano	220-250 micrones	Produce un buen acabado superficial con niveles bajos de aglutinante
Contenido de finos, bajo malla 200 ASTM	2% máx.	Permite el uso de un nivel bajo de aglutinante
Contenido de arcilla, bajo 20 micrones	0,5% máx.	Permite bajo nivel de aglutinante
Área superficial específica	10-140 cm ² /g	Permite bajo nivel de aglutinante

* *American Foundrymen's Society*

2.5.3 Número de finesa de grano

El número de finura de grano (GFN, por sus siglas en inglés Grain Fineness Number), establecido por la American Foundrymen's Society (AFS), es una medida utilizada para clasificar el tamaño promedio de los granos de arena en una muestra. Este cálculo se basa en la norma AFS 1106-00-S (American Foundry Society, 2006) y se centra específicamente en la distribución granulométrica de las arenas.

2.5.4 Arenas de sílice (SiO₂)

La arena de sílice se encuentra en muchos depósitos naturales, es capaz de resistir altas temperaturas sin llegar a descomponerse. Además, su asequibilidad la convierte en una elección idónea para el proceso de fundición, siendo la opción más común en este ámbito. Existen dos tipos generales de arena: aglutinada naturalmente y sintética, la mayoría de los talleres de fundición prefiere esta última porque puede controlar su composición con mayor facilidad. Para una fundición apropiada, la arena debe estar limpia y de preferencia ser nueva (Kalpakjian, 2008). Para la arena de sílice hay que considerar que tendrá en su composición otros elementos los cuales se ven reflejados en la Tabla 2.3, así como también hay que tomar en cuenta las propiedades físicas de la arena que están expresadas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.3 Composición típica de las arenas de sílice (Callister, 2016)

SiO ₂	32 - 34 % en masa
Fe ₂ O ₃	0,02 % en masa
TiO ₂	0,03 % en masa

Tabla 2.4 Propiedades arenas de sílice (Callister, 2016)

Densidad ρ [g/cm ³]	2.65
Temperatura de fusión [°C]	1710
Temperatura de sinterización [°C]	1100–1300

2.5.5 Arena de circonio (ZrSiO₄)

La arena de circonio tiene muy buenas cualidades, destacando su alto punto de fusión de 2500°C siendo la más resistente al calor de todas las arenas y un muy bajo coeficiente de expansión térmica, pero una alta conductividad térmica la cual permite velocidades de enfriamientos más altas siendo la fabricación de productos refractarios y de fundición uno de sus principales usos.

La arena de circonio se caracteriza por su propiedad de no ser mojada por el metal fundido, lo que la convierte en un material altamente atractivo para su aplicación en la superficie de trabajo de los moldes de fundición, así como en la producción de pinturas para moldes. Es de precio elevado en comparación con otras arenas y escasa en la naturaleza (Arena de Circonio, s/f). Su composición se basa en aproximadamente un 66% de circonio (Tabla 2.5). Las propiedades de este tipo de arena, se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.5 Composición típica de las arenas de circonio (*Zircon Sand-Zhengzhou Haixu Abrasives Co.,Ltd, s. f.*)

ZrSiO ₄	97-98,50 % en masa
SiO ₂	30-34 % en masa
TiO ₂	0,15 % en masa máx.

Tabla 2.6 Propiedades arenas de circonio (*Zircon Sand-Zhengzhou Haixu Abrasives Co.,Ltd, s. f.*)

Densidad ρ [g/cm ³]	4,6 – 4,7
Temperatura de fusión [°C]	2550
Temperatura de sinterización [°C]	1600-2200

2.5.6 Arenas de cromita (FeCr₂O₄)

La arena de cromita es un mineral natural, que consiste en óxidos de hierro y cromo. Debido a su buena estabilidad en condiciones extremas, es utilizada para la fabricación de machos y moldes de fundición de hierro, la cual posee una buena conductividad térmica para funcionar de la mejor manera con piezas fundidas al conseguir enfriar rápidamente. Además de tener buena resistencia al ataque de escoria, esta arena minimiza la posibilidad de penetración de molde. Dentro de esta arena debe haber 45% de cromita como mínimo (Tabla 2.7). Las propiedades de esta arena se presentan en la Tabla 2.8.

Tabla 2.7 Composición típica de las arenas de cromita (*Chromite Sand, s. f.*)

Cr ₂ O ₃	≥46.0%
FeO	≤26.5%
SiO ₂	≤1.0%
Cr/Fe	1.55:1

Tabla 2.8 Propiedades arenas de cromita (*Chromite Sand, s. f.*)

Densidad ρ [g/cm ³]	2,5-3,5
Temperatura de fusión [°C]	2180
Temperatura de sinterización [°C]	1800

2.6 Técnicas de caracterización

2.6.1 Dilatometría

La dilatometría es la técnica más adecuada para revelar el comportamiento térmico de las arenas, ya que ofrece una visión gráfica del cambio de dimensiones de un material, en determinadas condiciones, en función de la temperatura de calentamiento (Rossini, 1970).

Un coeficiente volumétrico de expansión térmica también puede definirse para describir el cambio en volumen cuando se cambia la temperatura del material. Se usa un instrumento conocido como dilatómetro para medir el coeficiente de expansión térmica. (Askeland & Wright, 2017). La dilatometría ofrece una variedad de mediciones que incluyen la expansión térmica lineal, el coeficiente de expansión térmica, la temperatura de sinterización, los pasos de contracción, las transiciones de fase, el cambio de densidad, el punto de ablandamiento y la temperatura de descomposición, el comportamiento anisotrópico y la temperatura de transición vítrea.

2.6.2 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica muy importante en el campo de la caracterización de materiales, que entrega información a escala atómica del material cristalino e incluso de los amorfos. Mediante esta técnica es posible identificar las distintas fases presentes, la estructura cristalina, cuantificar las fases presentes, realizar seguimientos a reacciones químicas, determinar la formación de solución sólida, entre otros usos (Grantt, 1998).

Un difractómetro de rayos X consta de un tubo de generación de rayos X, usualmente se utiliza la radiación del Cu ($K\alpha$). Estos rayos inciden en la muestra estudiada, luego hacen un barrido en un rango elegido por el operador, los haces refractados son detectados y cuando la ley de Bragg se cumple, se produce una interferencia constructiva en donde se tendrá una mayor intensidad.

2.6.3 Microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido (MEB) es un instrumento que crea imágenes que pueden revelar información a escala microscópica sobre tamaño, forma, composición y cristalografía de una muestra.

En términos generales, un equipo de MEB es capaz de tomar una “imagen” de la muestra, aunque realmente lo que se detecta es la respuesta del material al impacto de un haz de electrones (electrones llamados primarios), en vez de registrar fotones propiamente dichos (como en la microscopía óptica). Su principio de funcionamiento implica la creación de un haz de electrones energéticos enfocados por medio de la emisión de una fuente de electrones. Después el haz se modifica mediante aperturas, lentes magnéticas y bobinas electromagnéticas para reducir el diámetro del haz, enfocando en un patrón para escanear una ubicación discreta en la muestra (Clavijo, 2013).

2.6.4 Calorimetría diferencial de barrido

Un analizador de calorimetría diferencial de barrido mide los cambios de energía que ocurren cuando una muestra se calienta, enfría o se mantiene isotérmicamente, junto con la temperatura a la que se producen estos cambios. Los cambios de energía permiten al usuario encontrar y medir las transiciones que ocurren en la muestra cuantitativamente, y anotar la temperatura donde ocurren, y así caracterizar un material para procesos de fusión, como en este caso las arenas, medición de transiciones vítreas y una gama de procesos (Gabbott, 2007).

3 CAPITULO 3 ESTADO DEL ARTE

El proceso de fundición consiste en introducir un metal fundido en la cavidad de un molde, donde, al solidificarse, toma la forma de esta cavidad (Kassie, 2013). Aunque la fundición en arena es una técnica antigua, continúa presentando desafíos significativos, particularmente en la formación de defectos en las piezas fundidas. La calidad de las piezas depende de múltiples parámetros de proceso, por lo que es fundamental el control de estos para optimizar la eficacia y rendimiento de la fundición (Juriani, 2015).

El proceso físico y químico que ocurre entre un molde de arena y un metal líquido causa un sin número de fenómenos, los cuales son desventajosos para la correcta utilización de las propiedades de las fundiciones. Uno de estos fenómenos es el cambio de concentración de algunos elementos en la superficie de la fundición. Dependiendo del tiempo que pase en contacto el metal líquido con el molde de arena, esta interacción puede ser más profunda (Holtzer et al., 1990).

En la industria de fundición, es crucial garantizar un control riguroso sobre los defectos en las piezas, tales como rechupes, mal acabado superficial y reacciones no deseadas entre el metal y el molde. En particular, los defectos relacionados con la interacción entre la arena y el metal, como el ametalamiento o "burn-on", son relevantes en aplicaciones de fundiciones de alto cromo.

Este fenómeno ocurre a altas temperaturas, en presencia de sílice, cuando el metal fundido penetra parcialmente en la arena en la zona de interface, provocando que los granos de arena se fundan y adhieran entre sí, formando silicatos de baja temperatura de fusión. Esto hace que los granos se adhieran a la superficie de la fundición, debido a la baja temperatura de fusión de estos silicatos (Campbell, 2011).

Sin embargo, existen pocos estudios específicos sobre estas reacciones arena-metal, lo que subraya la necesidad de una revisión exhaustiva de la literatura para comprender mejor estos fenómenos y aportar al conocimiento de su control y minimización.

La elección de una arena de moldeo de alta calidad es esencial para obtener piezas

fundidas con buen acabado superficial. Las arenas deben ser permeables para permitir la liberación de gases que se generan al quemarse el aglutinante, permitiendo atravesar la estructura porosa de los núcleos y moldes. La permeabilidad depende de factores como el tamaño y forma de las partículas, la compactación del molde y la cantidad de aglutinante utilizado. Las partículas más pequeñas hacen que el espacio entre granos se vuelva más pequeños reduciendo la permeabilidad de los moldes (Anwar et al., 2021).

Entre las arenas utilizadas, la cromita ofrece ciertas ventajas por su alta refractariedad, reduciendo en teoría la formación de ciertos defectos. No obstante, también presenta problemas a temperaturas de fundición de acero. En condiciones oxidantes, la cromita tiende a oxidarse lentamente a Fe_2O_3 y Cr_2O_3 ; y en presencia de carbono proveniente de los aglutinantes orgánicos, su óxido de hierro puede reducirse a hierro líquido. Esto provoca que se formen microesferas de hierro en la superficie de los granos de arena, lo cual contribuye a defectos en la pieza (Campbell, 2011).

En fundiciones de hierro, pequeñas cantidades de sílice en la cromita también pueden fundirse con la arcilla y, en combinación con las temperaturas extremas, causar la descomposición de la cromita y la liberación de FeO o gotas de Fe en la superficie de los granos. Esto da lugar a la formación de "escoria de cromita", un tipo de quemadura superficial que es difícil de eliminar y afecta la calidad superficial de la pieza fundida (Campbell, 2011).

El estudio de defectos, como el ametalamiento, ha sido abordado por Kruse et al., (2006). Sus experimentos se basaron en moldes sin hornear, variando parámetros como la compactación, recuperación de arena, recubrimiento y tiempo de trabajo. La evaluación del efecto de estos factores fue estudiada mediante análisis microestructurales y químicos del sistema metal/molde. Basados en los resultados obtenidos, ellos identificaron que este fenómeno se encuentra relacionado con la penetración de vapor, la formación de silicatos de hierro líquido y la penetración mecánica del metal en el molde.

Brooks (2006) desarrollo un método de simulación para predecir defectos como el ametalamiento y la penetración de metal en fundiciones, basado en la simulación de temperaturas. Si bien el método mostró alta precisión en la predicción de la penetración,

destaco que su aplicación en entornos industriales debe considerar otros factores adicionales, tales como, el tipo de arena, la temperatura de vertido, el recubrimiento del molde, la transferencia térmica, etc.

Se puede concluir que existe una limitada cantidad de información sobre estudios sistemáticos relacionados con la aparición de ametalamiento en el proceso de colada en fundiciones realizadas en moldes de arena. En este contexto, no se ha esclarecido cómo la naturaleza química y microestructural de la arena del molde influye en su tendencia a generar ametalamiento, lo cual constituye el propósito general de la presente investigación.

4 CAPITULO 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para un mejor entendimiento de este capítulo, la metodología experimental se desarrollará haciendo referencia a cada uno de los objetivos específicos planteados en este trabajo:

4.1 Objetivo 1: Caracterizar física, térmica, estructural y químicamente los tres tipos de arena de moldeo bajo estudio (sílice, circón y cromita).

La empresa ME Elecmetal proporcionó cinco muestras de arena, con un peso aproximado de 1.2 kg cada una, para llevar a cabo el presente trabajo. Estas muestras fueron identificadas como: arena de sílice (Paraná), arena de cromita (Urzquén), arena de cromita (Somarriva), arena de zircón (gruesa) y arena de zircón (fina).

4.1.1 Caracterización estructural, química y física de las arenas

4.1.1.1 Preparación de material

Para los análisis de las diferentes arenas, se realizó un proceso de homogenización y partición con el objetivo de obtener muestras representativas para los distintos propósitos del trabajo. La Figura 4.1 presenta un esquema del proceso llevado a cabo.

Para la homogenización de las muestras, se utilizó un cortador tipo Riffle de la marca Retsch, modelo Riffelteir 6.5, el cual se muestra en la Figura 4.2. Por otro lado, el proceso de partición se efectuó utilizando un cortador Riffle modelo SS-16-3X de la marca Outotec, como se ilustra en la Figura 4.3.

Figura 4.1 Esquema muestra y utilización material

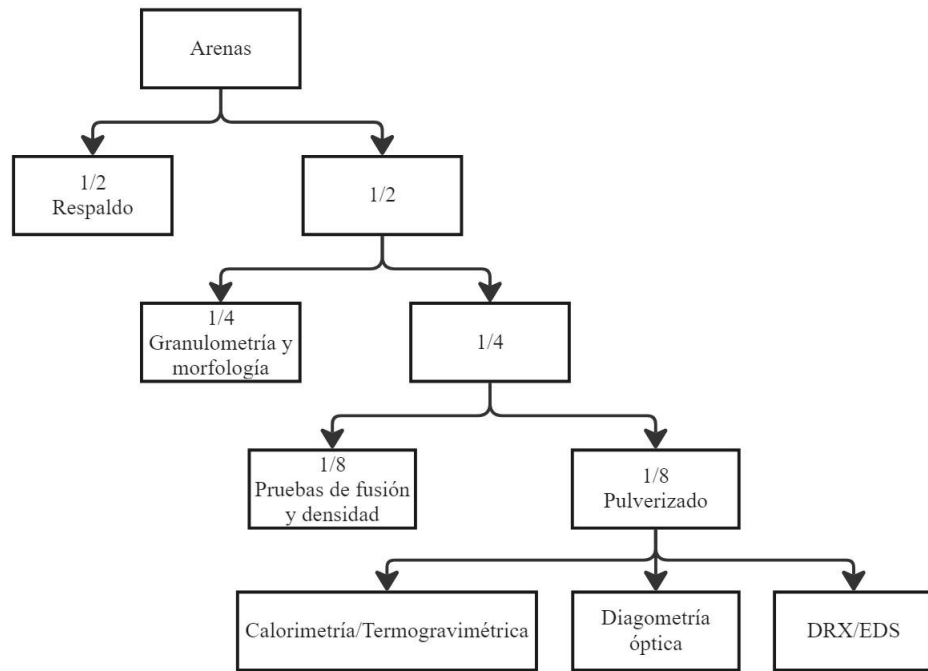
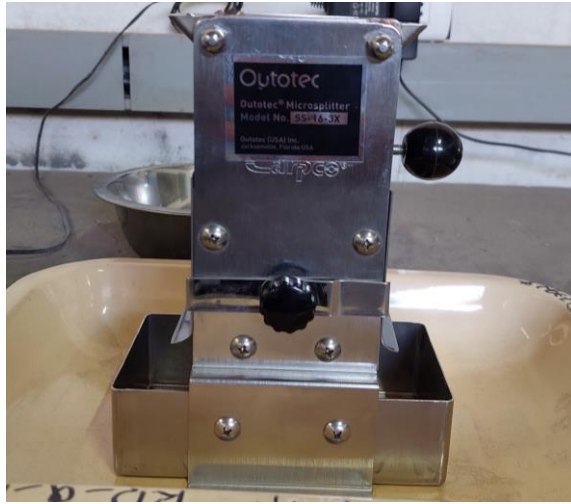


Figura 4.2 Proceso de homogenización con cortador tipo Riffle de la marca Retsch, modelo Riffelteir 6.5



Figura 4.3 Cortador de Riffle modelo SS-16-3X de la marca Outotec



4.1.1.2 Difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido

Las arenas se caracterizaron estructuralmente mediante técnicas combinadas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido para determinar sus compuestos y elementos. Para la realización de las pruebas se tomó una muestra de cada arena, las cuales fueron pulverizadas a mano, con el fin de evitar la contaminación y pérdidas de materia para ambas pruebas, tal como puede apreciarse en la Figura 4.4.

Figura 4.4 Pulverizado arena



Las pruebas de difracción de rayos X se realizaron en un equipo marca Shimadzu modelo XRD 6100 utilizando radiación $K_{\alpha 1}$ Cu, un paso de $0,02^\circ$ y un tiempo de paso de 3 segundos (Figura 4.5). En relación a las observaciones por microscopía electrónica de barrido, estas se llevaron a cabo en un equipo marca Zeiss modelo EVO MA10 con detector EDS Oxford, marca X- MaxN 20 SDN, el cual se puede observar en la Figura 4.6.

Figura 4.5 Difractómetro marca Shimadzu modelo XRD 6100



Figura 4.6 Microscopio electrónico de barrido (MEB) Zeiss EVO MA10 con detector EDS Oxford, marca X- MaxN 20 SDN



4.1.1.3 Análisis químico

En relación a la caracterización química, esta se realizó mediante pruebas de absorción atómica en un equipo marca Varian modelo 240fs. Con el objetivo de determinar las concentraciones de los elementos principales en cada una de los casos.

4.1.1.4 Distribución granulométrica, finesa de grano y morfología de las arenas.

La distribución granulométrica de cada tipo de arena se determinó mediante tamizaje, utilizando una muestra de aproximadamente 250 g. Para tal efecto se empleó un equipo Retsch AS200Trap, utilizando la norma AFS 1105-00-S. El análisis, se realizó en dos tandas, una de gruesos (mallas 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70) (Figura 4.7a), y otra de finos (100, 140, 200, 270, -270) (Figura 4.7b) (American Foundry Society, 2012). La fineza de cada arena fue establecida utilizando la norma AFS 1106-00-S, mientras que la morfología de las partículas de cada muestra fue determinada mediante microscopía electrónica de barrido.

Figura 4.7a Serie tamices gruesos



Figura 4.7b Serie tamices finos



4.1.1.5 Densidad

La determinación de las densidades de las distintas arenas de moldeo se llevó a cabo mediante el método del picnómetro basándose en la norma ISO 17892-3.

Para la medición de las masas se utilizó una balanza analítica con una precisión de cuatro decimales. Adicionalmente, se empleó alcohol isopropílico como medio líquido. Una vez realizado el procedimiento, la densidad se calculó utilizando la ecuación 4.1

$$\text{Densidad}_{\text{picnómetro}} = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \times L \quad (4.1)$$

donde:

W_1 : Masa picnómetro vacío, g.

W_2 : Masa picnómetro con mineral, g.

W_3 : Masa picnómetro con mineral y parafina g.

W_4 : Masa picnómetro con parafina, g.

L : Densidad de la parafina, g/cm³.

4.1.2 Caracterización térmica de las arenas

4.1.2.1 Estabilidad térmica

La estabilidad térmica de las arenas se estudió mediante pruebas combinadas de calorimetría/termogravimetría y difracción de rayos X. Las pruebas de calorimetría/termogravimetría se llevaron a cabo en un equipo simultáneo marca TA instruments modelo Discovery SDT 650 (Figura 4.8), empleando una velocidad de calentamiento de 20°C/min desde temperatura ambiente hasta 1450°C y un flujo de aire de 50 mL/min.

Figura 4.8 TA instruments modelo Discovery SDT 650



4.1.2.2 Sinterización y dilatación térmica

La sinterización y dilatación térmica de cada una de las arenas bajo estudio se determinaron mediante pruebas de dilatometría óptica en un equipo marca TA instruments modelo ODP 868 (Figura 4.9). Las pruebas se realizaron en flujo de aire de 0,6 L/min utilizando un calentamiento desde temperatura ambiente hasta 1450°C. Para esto se utilizaron briquetas cilíndricas de arena pulverizada y agua como aglutinante para poder mantener la forma dentro del equipo sin que se desmorone la pieza, tal como se puede apreciar en la Figura 4.10.

Figura 4.9 TA instruments modelo ODP 868



Figura 4.10 Briquetas de arena para dilatometría



4.1.3 Composición química de la fundición

La caracterización química de la fundición alto Cr empleada en este estudio fue obtenida de trabajos de investigación previos realizados en la Universidad de Atacama.

4.2 Objetivo 2: Estudiar la reactividad entre una fundición blanca alto cromo en estado líquido y las arenas de moldeo base sílice, circonita y cromita.

Con el objeto de estudiar la reactividad de las diferentes arenas con una fundición blanca de alto cromo en estado líquido, trozos de esta aleación fueron mezclados en proporción 1 a 3 con los distintos tipos de arena de moldeo bajo estudio. Esta mezcla se depositó en un crisol de material refractario y fue calentada a 1550°C por un tiempo de 1h en una termobalanza Nabertherm modelo LHT 04/16 SW, la cual puede ser apreciada en la Figura 4.11.

Después de realizar las pruebas de fusión, el material obtenido se confinó en una briqueta utilizando un equipo Leco MX400 (Figura 4.12). La briqueta fue preparada metalográficamente. El proceso incluyó un lijado progresivo empleando un conjunto de lijas con granulometrías de 120, 240, 320, 500, 600, 800, 1200, 1500 y 2500. Posteriormente, se realizó un pulido en una pulidora Presi modelo Le Cube (Figura 4.13), siguiendo un orden secuencial de Alúmina #1 (5 μm a 20 μm), Alúmina #2 (1 μm a 5 μm) y Alúmina #3 (0.3 μm a 1 μm).

Finalmente, la briqueta con la arena y el metal fue analizada mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) para estudiar la interfase metal/arena. Además, se realizó un análisis de difracción de rayos X sobre los restos de arena tras el calentamiento, con el objetivo de identificar posibles cambios de fase en el material.

Figura 4.11 Termobalanza Nabertherm modelo LHT 04/16 SW



Figura 4.12 Briquetadora a) y briqueta pulida b)

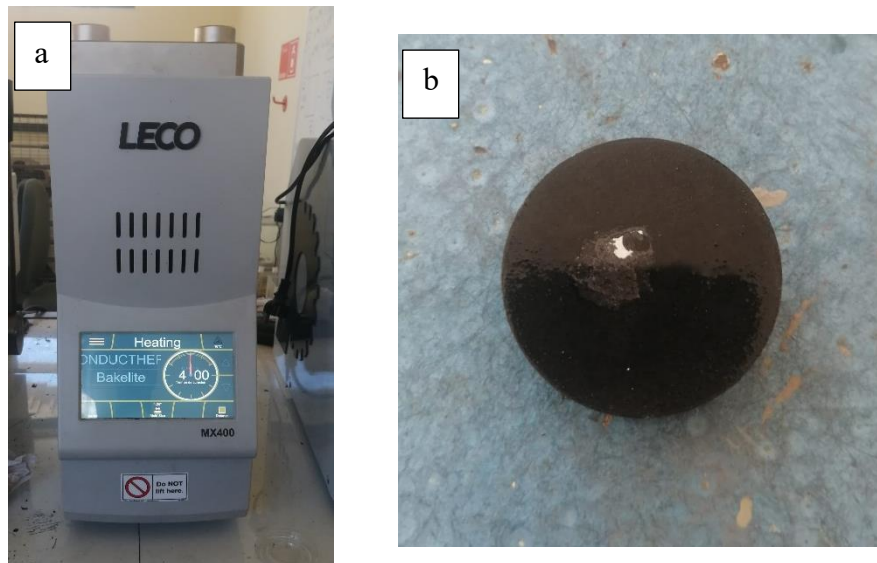


Figura 4.13 Pulidora Presi Le Cube



4.3 Objetivo 3: Seleccionar en base a criterios técnicos y económicos el tipo de arena idóneo para reducir el ametalamiento en el proceso de moldeo de fundiciones blancas de alto cromo.

Basándose en los resultados técnicos y en la información de costos proporcionada por la empresa ME Elecmetal, se seleccionó la arena más adecuada para el proceso de moldeo de la fundición blanca alta en cromo bajo estudio. La selección se realizó considerando los diferentes criterios evaluados, enfocados en aplicaciones que requieren almas de gran volumen y que presentan ametalamiento.

5 CAPITULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados se presentarán a continuación en tres macrounidades: caracterización física y química de las arenas, reactividad y factor económico.

5.1 Caracterización física y química de las arenas

5.1.1 Caracterización morfológica de las arenas

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran los resultados obtenidos a partir de los análisis granulométricos de las distintas arenas de moldeo bajo estudio (ver Anexo Tabla 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5). Se puede observar que las arenas de circón presentan la granulometría más fina de las muestras analizadas, con un D_{50} de 163,53 μm para circón grueso y 115,92 μm para circón fino. Por otro lado, las arenas de sílice y cromitas presentan una distribución de tamaño similar, con un D_{50} de 364,05 μm para la sílice de Paraná, 396,30 μm para la cromita Urzquen y 353,05 μm para la cromita de Somarriva.

Estas características granulométricas sugieren que las arenas de circón son más adecuadas para aplicaciones que exigen precisión y alta calidad superficial, mientras que las arenas de sílice y cromita son preferibles para procesos donde la permeabilidad y la disipación térmica son prioritarias. Finalmente, es importante resaltar que la selección del tipo de arena dependerá de los requisitos específicos del proceso de fundición y de las propiedades finales deseadas en las piezas moldeadas.

Por otro lado, dentro de la conformación de un molde de arena, se tiene que el uso arenas gruesas presenta ventajas frente a las arenas finas respecto al ametalamiento. Esto se debe a la arena gruesa tiene una menor tasa de solidificación del metal, presentando una mejor disipación del calor. Además, se presenta una mayor permeabilidad en el molde dejando escapar de mejor manera los gases atrapados al verter el metal. Dado esto se tiene como resultado la reducción del riesgo de formación de defectos mecánicos por un enfriamiento lento, como pueden ser la formación de dendritas (Ajay & Lovneesh, 2023).

Figura 5.1 Análisis granulométrico mediante retenido parcial de las distintas arenas de moldeo proporcionadas por ME Elecmetal

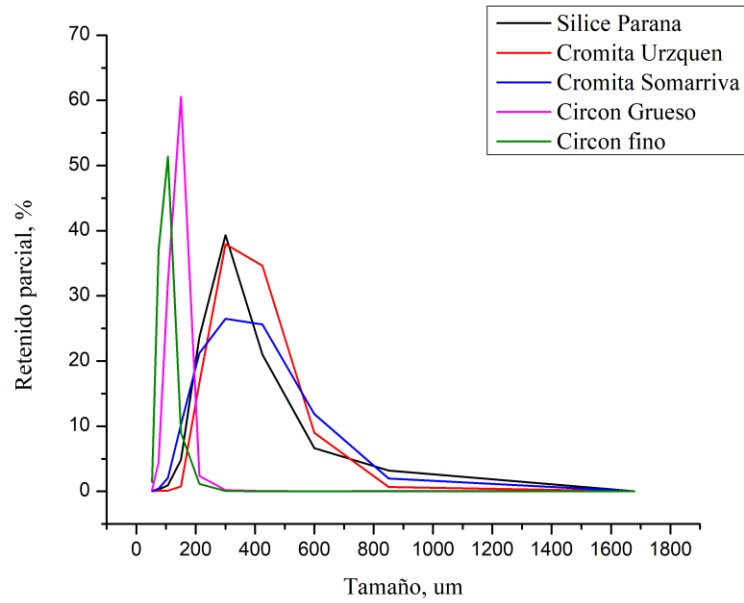
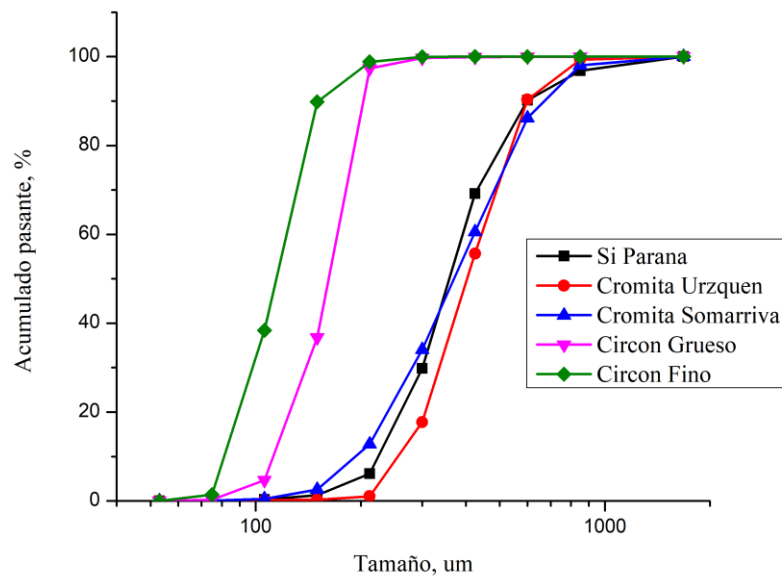


Figura 5.2 Análisis granulométrico mediante acumulado pasante de las distintas arenas de moldeo proporcionadas por ME Elecmetal



La Tabla 5.1 presenta los D₅₀ y D₈₀ para cada una de las distribuciones granulométricas de las arenas analizadas. Adicionalmente, entrega el índice de fineza de grano según la norma AFS 1106-00-S (ver Anexo Tabla 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10). Se observa que las arenas de sílice y cromita se clasifican como arenas "muy gruesas" según la norma AFS 1106-00-S. Mientras que las arenas de circón (grueso y fino) se agrupan como "fina" y "muy fina", respectivamente, corroborando los resultados presentados en las Figuras 5.1 y 5.2

La relación entre la granulometría y el índice de fineza del grano es equivalente en el sentido de que ambos describen, de distintas maneras, la misma distribución de tamaños de partícula. La granulometría muestra detalles sobre la dispersión de tamaños, a través de las mallas teniendo como resultado el D₈₀ y D₅₀, indicando el tamaño donde pasa el 80% y el 50% de la muestra respectivamente, mientras que el AFS GFN resume esto en un índice único que facilita la clasificación y comparación. Por ejemplo, el D₅₀ y D₈₀ de las arenas de circón (115,92 y 141,60 µm para circón fino) es coherente con sus altos valores de AFS GFN, lo que confirma su fineza. De la misma manera, existe una correspondencia de los valores elevados de D₅₀ y D₈₀ en las arenas de sílice y cromita y sus bajos índices de fineza.

Tabla 5.1 D₅₀, D₈₀ arenas y finesa de grano

D50 [µm]				
Si Paraná	Cromita U	Cromita S	Zr (Grueso)	Zr (Fino)
364,05	396,30	353,05	163,53	115,92
D80 [µm]				
Si Paraná	Cromita U	Cromita S	Zr (Grueso)	Zr (Fino)
515,12	547,85	557,94	194,23	141,60
AFS GFN				
Si Paraná	Cromita U	Cromita S	Zr (Grueso)	Zr (Fino)
40,45	36,76	41,48	82,54	112,92
Muy gruesa	Muy gruesa	Muy gruesa	Fina	Muy fina

5.1.2 Morfología de grano

Se examinó la morfología de las arenas de fundición mediante microscopía electrónica de barrido, obteniendo imágenes utilizando electrones retrodispersados, las cuales son presentadas en las Figuras 5.3 a la 5.7. La caracterización morfológica se realizó mediante un análisis de factor de forma ($FF = \text{ancho/largo}$) en donde mientras más cercano sea este valor a 1, más redondeada será el grano. Para esto se tomaron 20 granos por arena al azar calculados en las Tablas 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15 (ver Anexo). Los resultados obtenidos fueron clasificados de acuerdo al criterio establecido en la ISO 9276 (Tabla 5.2). Se observa que la arena de sílice y cromita presentan un índice de esfericidad media, mientras que las arenas circón poseen una baja esfericidad (Tabla 5.3).

Tabla 5.2 Factor de forma (Campbell, 2011)

Alta esfericidad	$FF > 0,83$
Media esfericidad	$0,63 \leq FF \leq 0,83$
Baja esfericidad	$FF < 0,63$

Tabla 5.3 Promedio factor de forma de las arenas de moldeo

Promedio factor de forma				
Si Paraná	Cromita U	Cromita S	Zr (Gruoso)	Zr (Fino)
0,75	0,80	0,72	0,60	0,58

Además, se analizó la angularidad de las partículas de arena utilizando el método comparativo dado en la norma AFS 1107-00-S (Figura 2.12). Los resultados obtenidos demostraron que, la arena de sílice presenta una morfología subangular, las arenas de cromita una morfología angular, mientras que las partículas de las arenas de circón evidencian una morfología redondeada.

Se tiene conocimiento que la morfología del grano afecta el comportamiento de los moldes, las arenas que tienen granos angulares resultan, apropiadas para usos en procesos de fundición de metales de alta densidad debido a que este tipo de granos proporciona un efecto de anclaje entre ellos que incrementa la resistencia del sistema, además de que esta angularidad permite una mayor permeabilidad del molde facilitando el escape de los gases (Quintero, 2009).

Figura 5.3 MEB arena de sílice, utilizando electrones retrodispersados

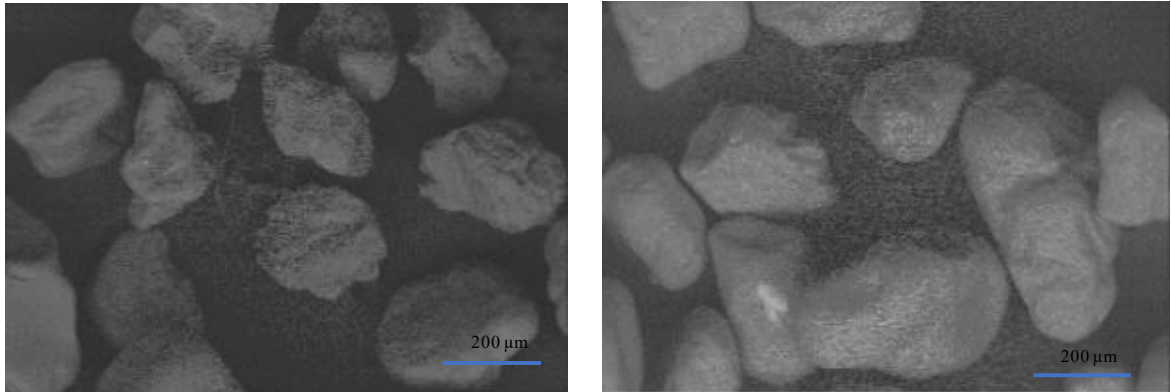


Figura 5.4 MEB arena de cromita Somarriva, utilizando electrones retrodispersados

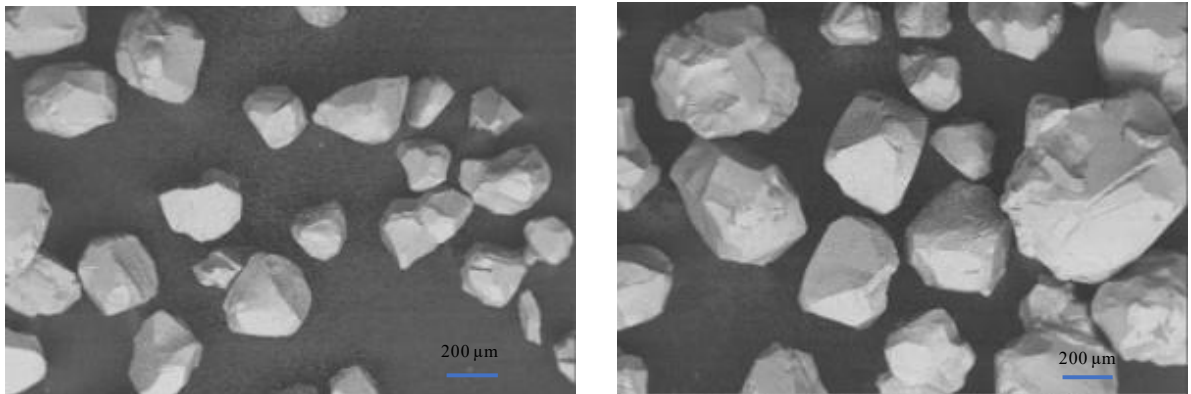


Figura 5.5 MEB arena de cromita Urzquen, utilizando electrones retrodispersados

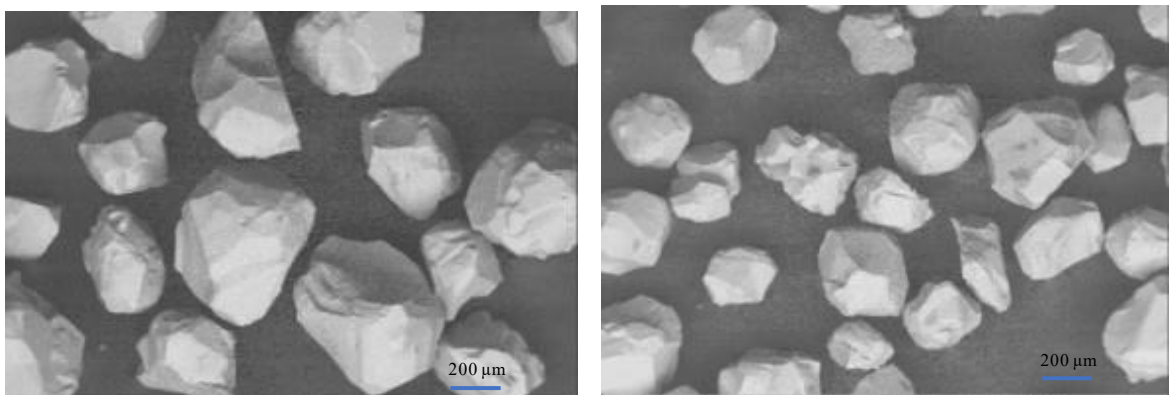


Figura 5.6 MEB arena circón grueso, utilizando electrones retrodispersados

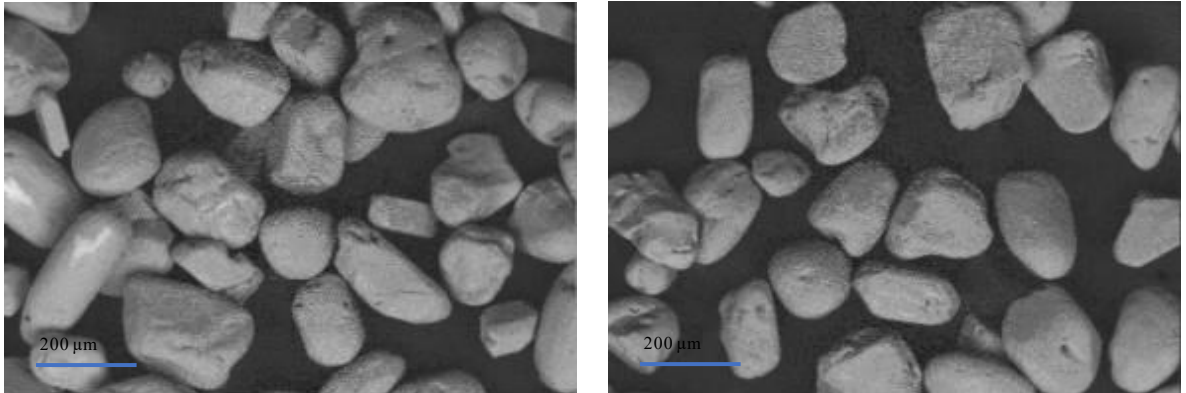
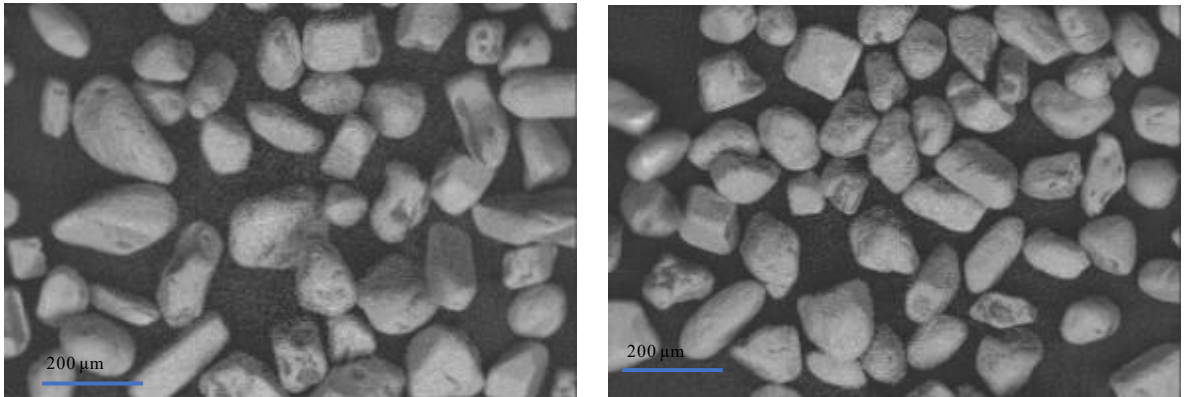


Figura 5.7 MEB arena circón fino, utilizando electrones retrodispersados



5.1.3 Densidad

La densidad de las arenas inicialmente se intentó determinar mediante el método del matraz de Le Chatelier, utilizando agua como medio líquido. Sin embargo, al introducir el sólido, se observó la aglomeración de la arena debido a su baja mojabilidad en agua, como se muestra en la Figura 5.8. Por esta razón, se optó por emplear el método del picnómetro, usando alcohol isopropílico al 70% (Figura 5.9), donde su densidad está calculada en la Tabla 7.16 (ver Anexo). Este cambio se justificó por el menor volumen de líquido requerido y porque, al tratarse de alcohol, al trabajar con menos volumen se reduce el error en la medición asociado a la evaporación del medio.

Figura 5.8 Matraz Le Chatelier



Figura 5.9 Picnómetro arenas de moldeo



Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4. Se observan, que los valores experimentales promedio se acercan a los valores teóricos, con un porcentaje de diferencia menor a un 5%. Estos valores están calculados en la Tabla 7.17 (ver Anexo)

La densidad aparente de la arena afecta directamente en la compactación de un molde, por ende, en su resistencia mecánica. Al aumentar la densidad de un molde se produce una reducción en los defectos de ametalamiento, dado que disminuye los vacíos intergranulares por los cuales el metal líquido pueda infiltrarse, además de mejorar la resistencia del molde contra la presión metaloestática, limitando la penetración de líquido o gas dentro del mismo (Brooks & Beckermann, 2006).

Tabla 5.4 Resultados mediciones arenas mediante picnómetro

Arenas g/cm ³					
Medición	Si Paraná	Cromita Somarriva	Cromita Urzquen	Zr grueso	Zr fino
1	2,029	3,662	4,192	3,847	3,437
2	2,151	3,693	4,049	4,061	3,240
3	2,216	3,646	4,077	3,825	3,344
Promedio	2,522	4,168	4,106	4,380	4,373
Teórico	2,650	4,300	4,300	4,600	4,600
% Diferencia	4,819	3,064	4,505	4,782	4,941

5.1.4 Difracción de rayos X

La caracterización mineralógica de las distintas arenas de moldeo fue realizada a través de difracción de rayos X. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras de la 5.10 a la 5.14. Se observa que las arenas de sílice y circonio están constituidas por una única fase cristalina, mientras que las arenas de cromita están formadas por una mezcla de diferentes óxidos, lo cual según las Tablas 2.3, 2.5 y 2.7 está de acuerdo a la teoría.

Figura 5.10 Difractograma Análisis DRX arena de sílice Paraná

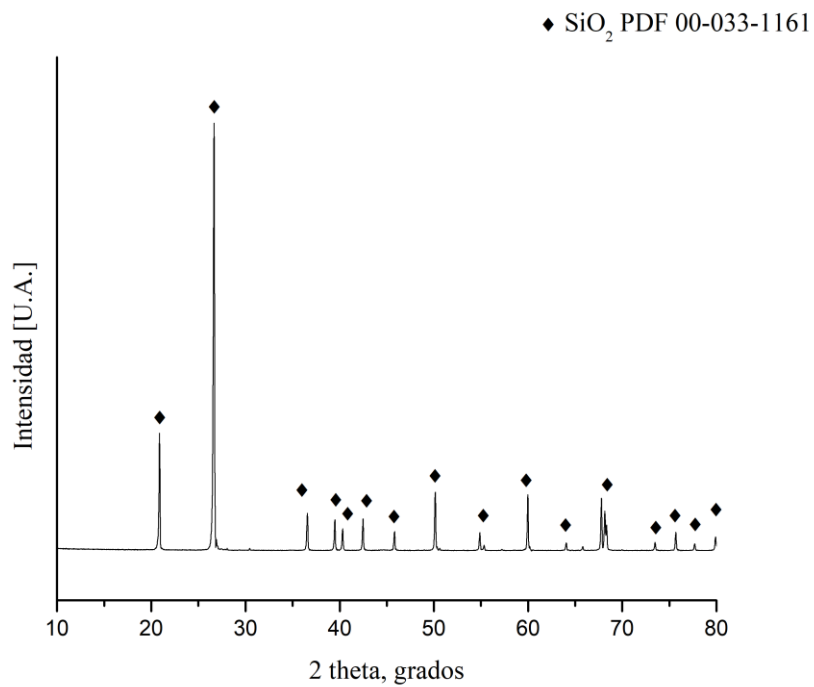


Figura 5.11 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Somarriva

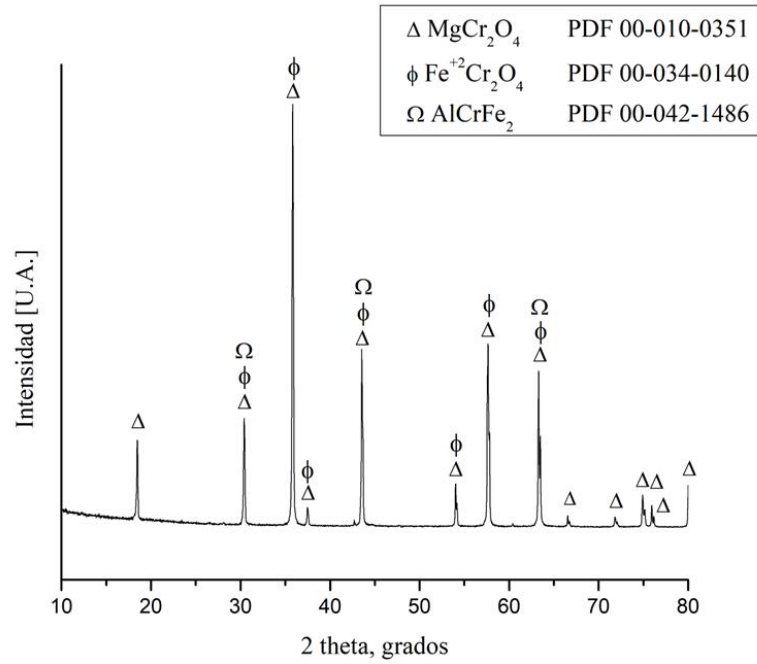


Figura 5.12 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Urzquen

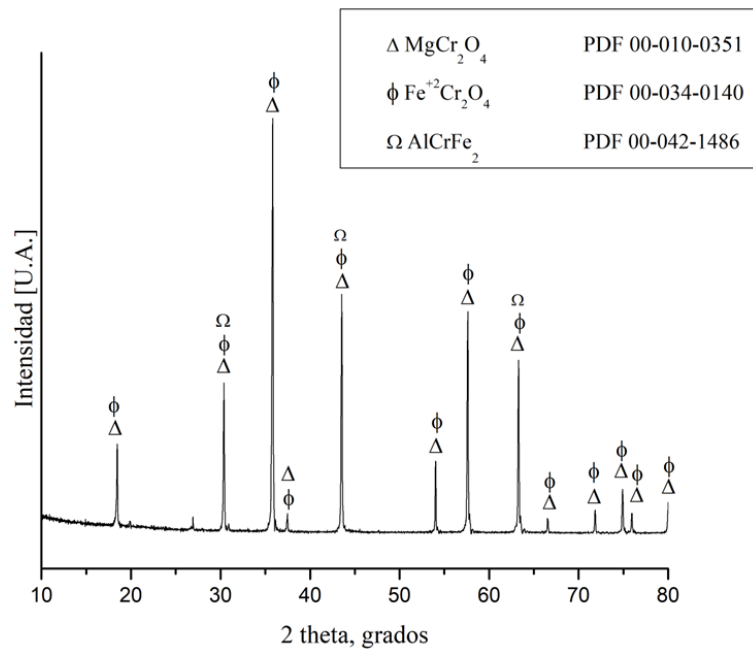


Figura 5.13 Difractograma Análisis DRX arena de circón grueso

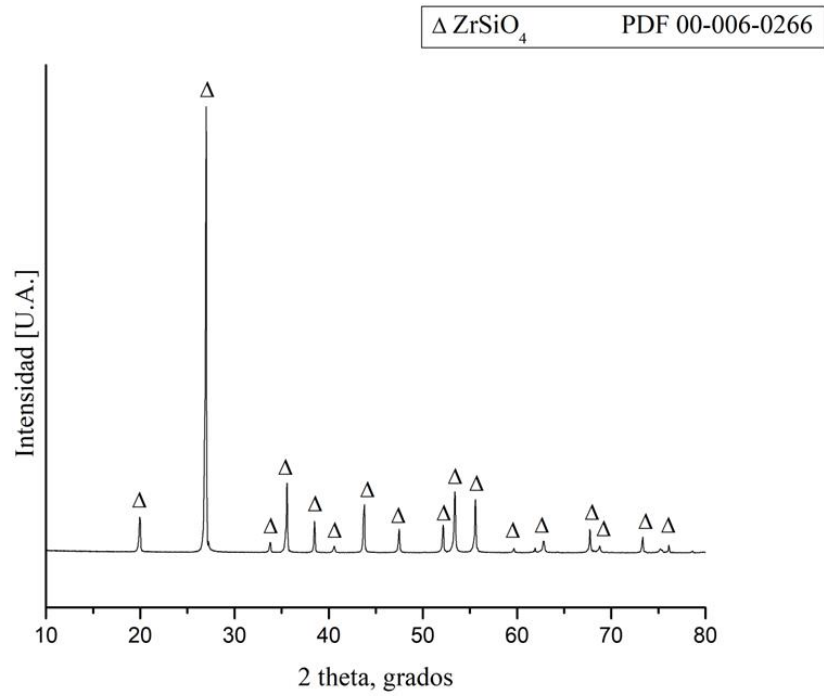
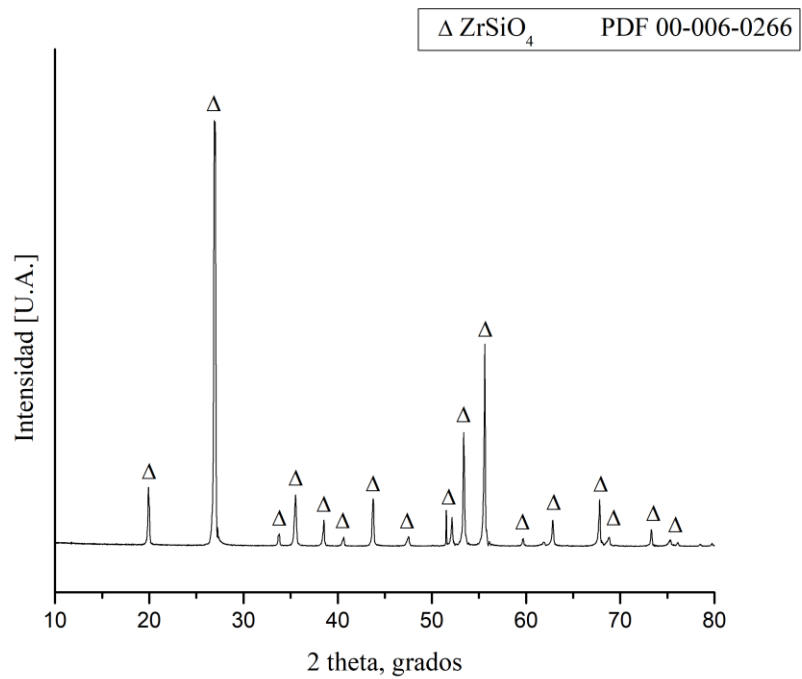


Figura 5.14 Difractograma Análisis DRX arena de circón fino



5.1.5 Caracterización microscopía electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS)

Para poder comparar y complementar lo obtenido con la difracción de rayos X, se realizaron análisis de espectroscopía dispersiva de energía de rayos X. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5.15 a la 5.19. Se eliminó el carbono del análisis, debido a que las partículas se depositan sobre una cinta conductora de grafito. En general, la distribución de elementos detectados en cada análisis, concuerda con la composición mineralógica determinada mediante difracción de rayos X.

Figura 5.15 MEB y mapeo de EDS arena de sílice

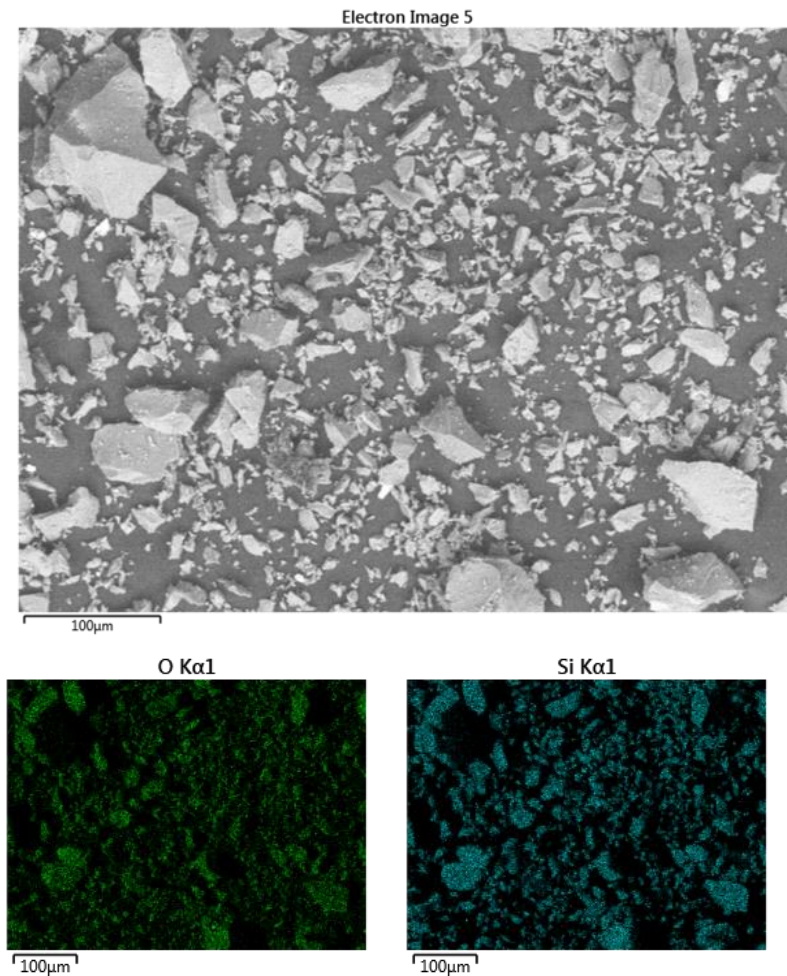


Figura 5.16 MEB y mapeo de EDS arena de Cromita Somarriva

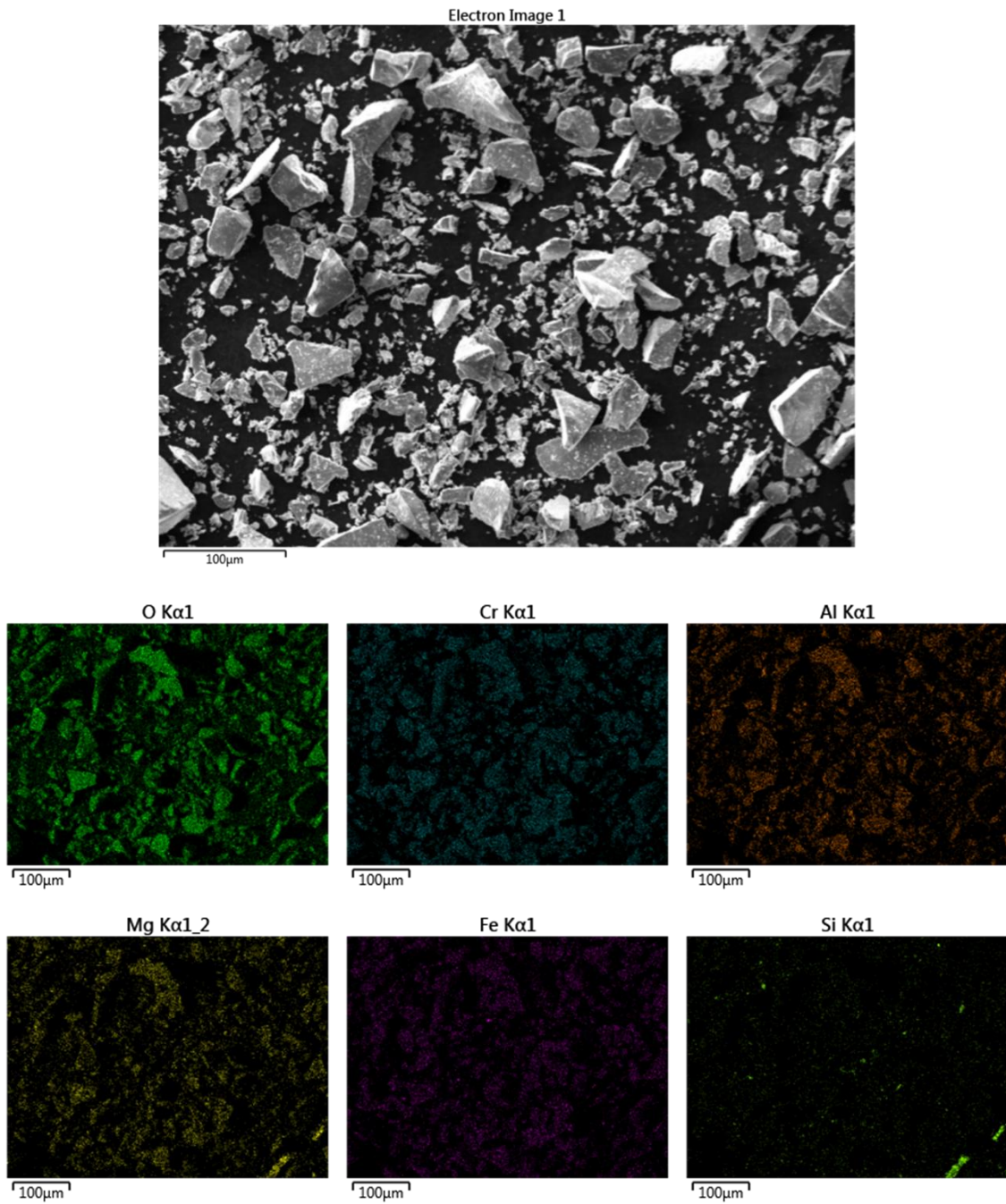


Figura 5.17 MEB y mapeo de EDS arena de Cromita Urzquen

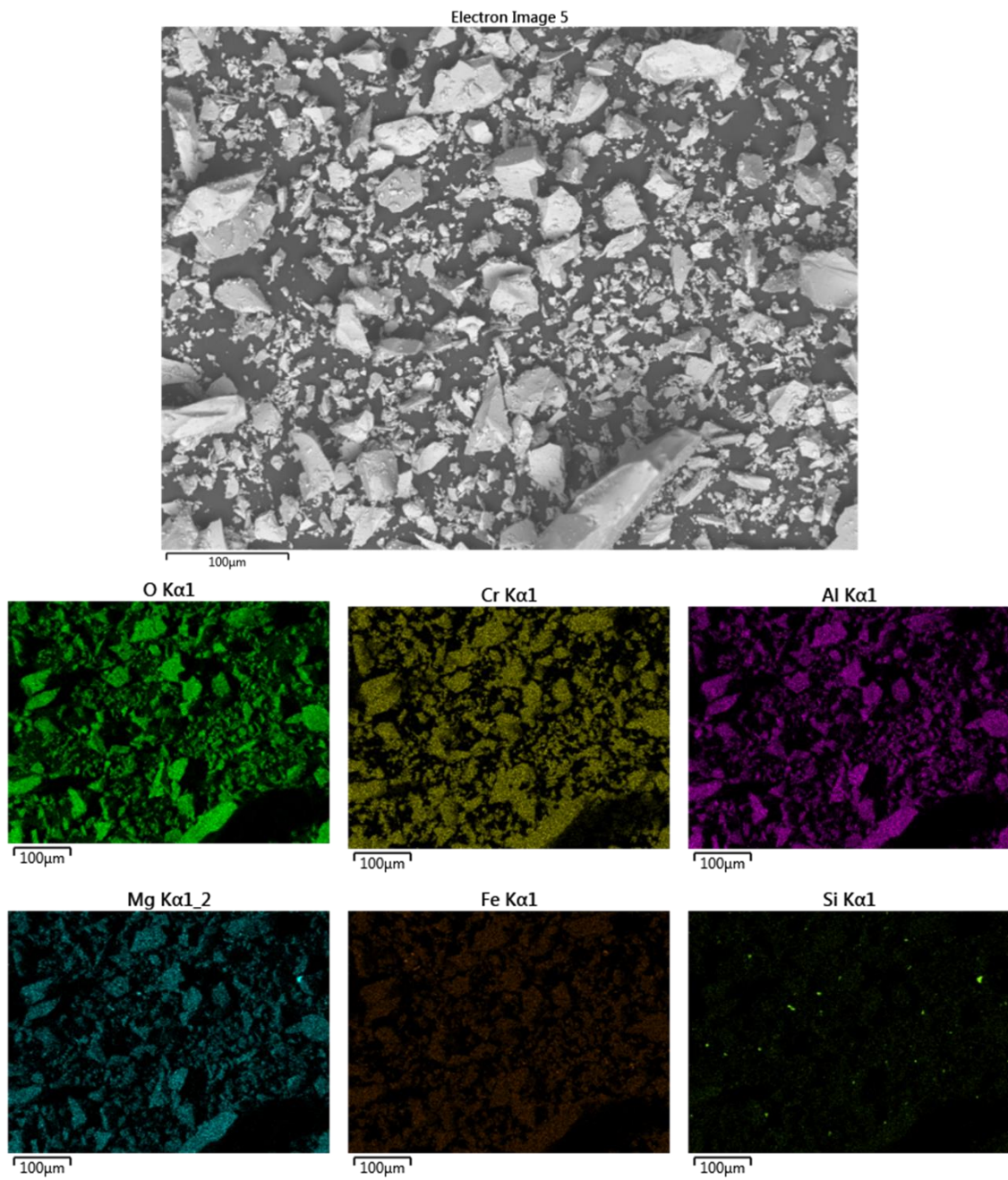


Figura 5.18 MEB y mapeo de EDS arena de Circón Grueso

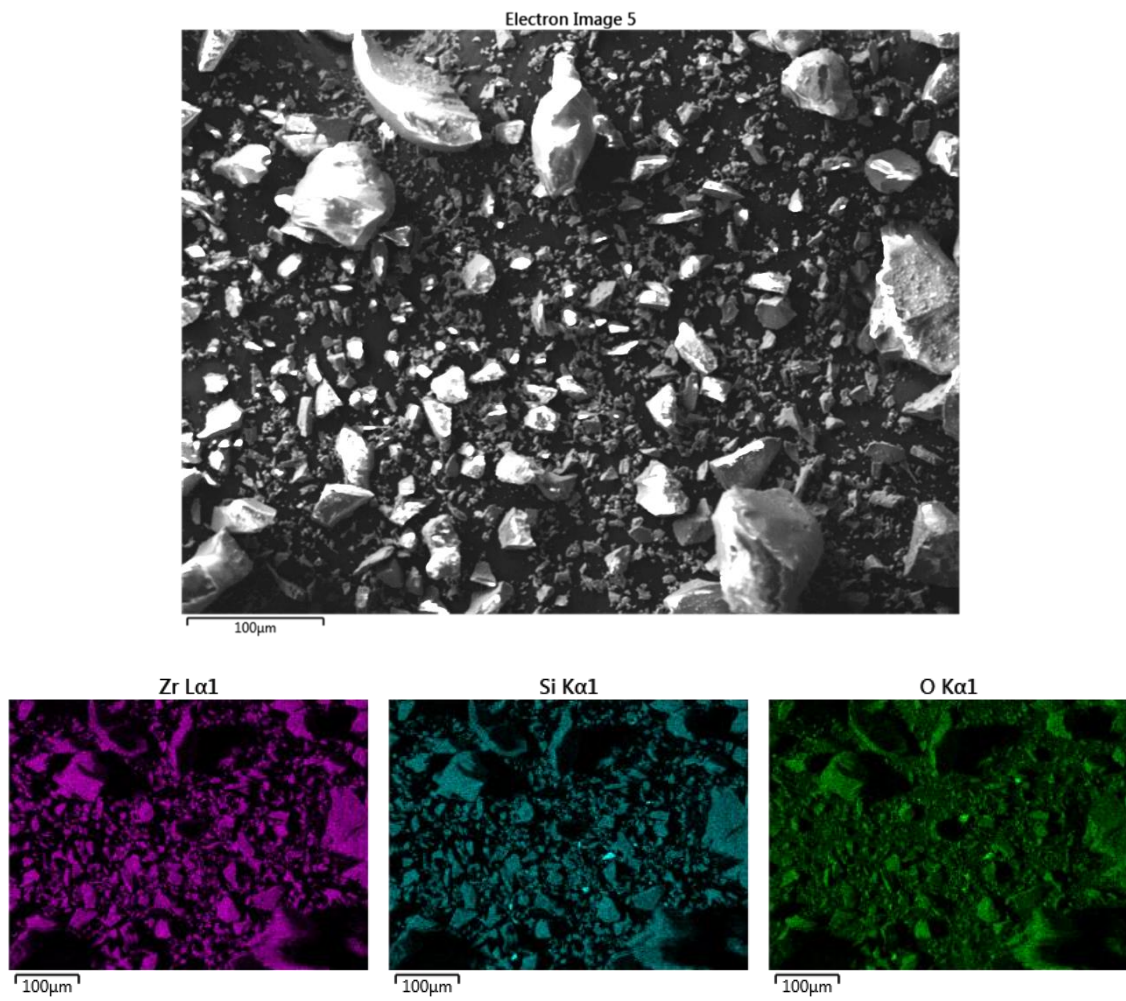
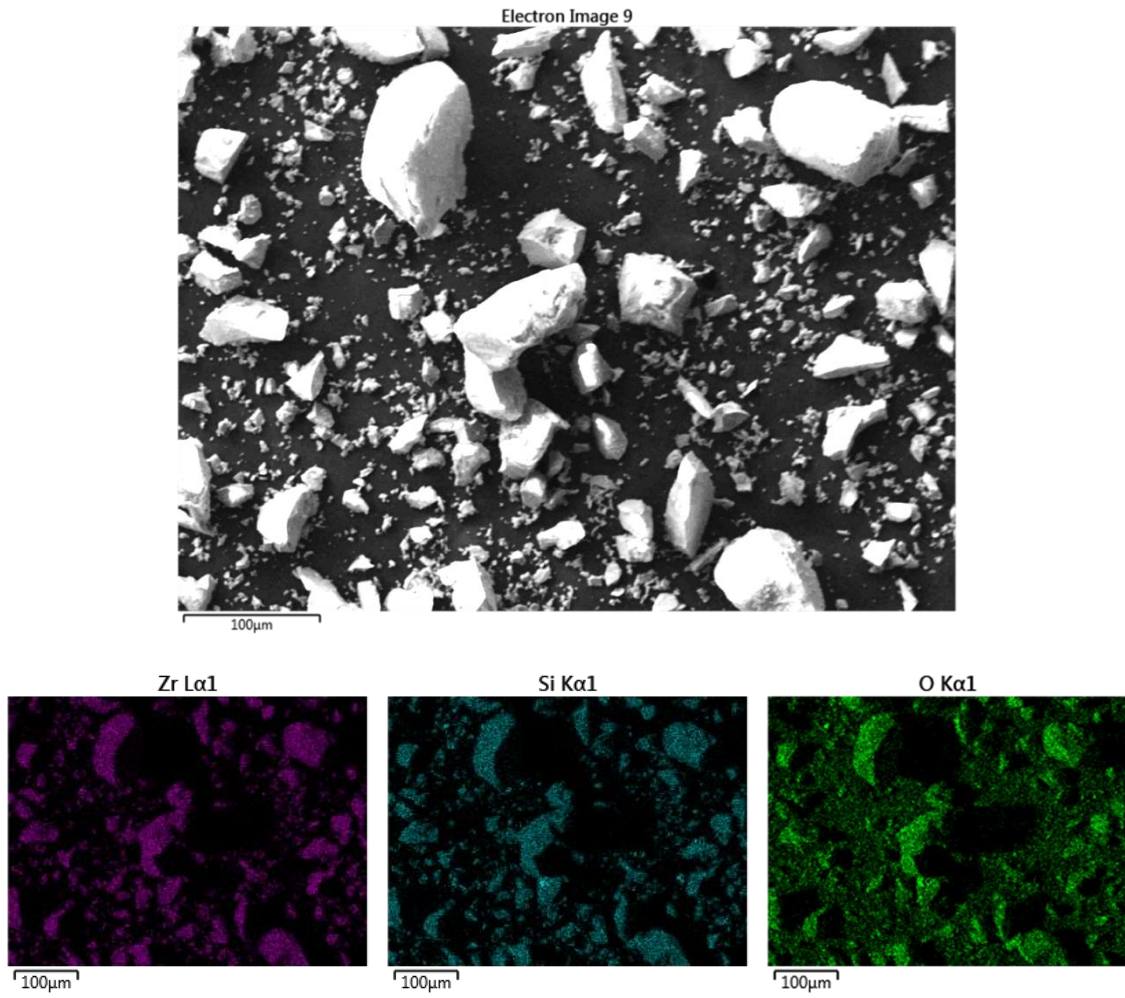


Figura 5.19 MEB y mapeo de EDS arena de Circón Fino



5.1.6 Análisis químico arenas

Con el fin de complementar los análisis de EMB/EDS, se realizaron pruebas de absorción atómica, buscando los elementos principales que se encuentran en las distintas arenas según EMB/EDS y la literatura, en donde se obtuvo:

Tabla 5.5 Medición arenas de Cromita

Muestra	Leyes				
	Si	Cr	FeT	Al	Mg
	mg/L	%	%	%	%
Cromita Somarriva	N.D.	29,51	17,01	6,94	5,09
Cromita Urzquen	N.D.	28,82	16,81	6,8	4,89

N.D. No detectado

Tabla 5.6 Medición arena de sílice y arenas de Circón

Muestra	Leyes				
	Si	Zr	Al	FeT	Cr
	%	%	%	%	g/T
Si Paraná	44,52	-	<0,025	0,41	272
Zr grueso	14,13	45,92	<0,025	0,18	104
Zr fino	11,04	35,88	<0,025	0,16	92

Dado que para la medición de Zr no podía detectarse con los equipos por lo cual se realizó un cálculo basado en estequiometría para obtener un valor aproximado.

5.1.7 Comparación distintas arenas

En la Tabla 5.7, se presenta un cuadro comparativo de las distintas arenas de moldeo presentadas, donde se muestra sus propiedades físicas, así como su composición elemental y estructural. De acuerdo con lo expuesto previamente en cada punto, individualmente la arena más idónea para uso en el proceso de colada de fundición blanca alta en cromo sería las que son de cromita, ya que dadas sus características esta arena presenta una granulometría muy gruesa, la cual hace que tenga una mejor disipación del calor, una morfología de media esfericidad y angular, permitiendo una mejor permeabilidad de los gases y una densidad relativamente alta, la cual favorece el enfriamiento y escape de gases, cualidades muy importantes para buscar prevenir el ametalamiento.

Tabla 5.7 Cuadro comparativo arenas

Tabla comparativa física de las arenas					
Característica	Si Paraná	Cromita S	Cromita U	Zr (Grueso)	Zr (Fino)
D ₈₀ [μm]	515,13	557,94	547,86	194,24	141,60
AFS GFN	40,45	41,48	36,76	82,55	112,92
	Muy gruesa	Muy gruesa	Muy gruesa	Fina	Muy fina
Morfología de grano	Media esfericidad y sub angular	Media esfericidad y angular	Media esfericidad y angular	Baja esfericidad y redondeada	Baja esfericidad y redondeada
Densidad [g/cm ³]	2,522	4,168	4,106	4,380	4,373
Elementos en arena EDS	O-Si	O-Cr-Al-Mg-Fe-Si	O-Cr-Al-Mg-Fe-Si	Zr-Si-O-Al-Fe-Cr	Zr-Si-O
Compuesto Difractograma	SiO ₂	MgCr ₂ O ₄ – Fe ⁺² Cr ₂ O ₄	MgCr ₂ O ₄ – Fe ⁺² Cr ₂ O ₄	ZrSiO ₄	ZrSiO ₄

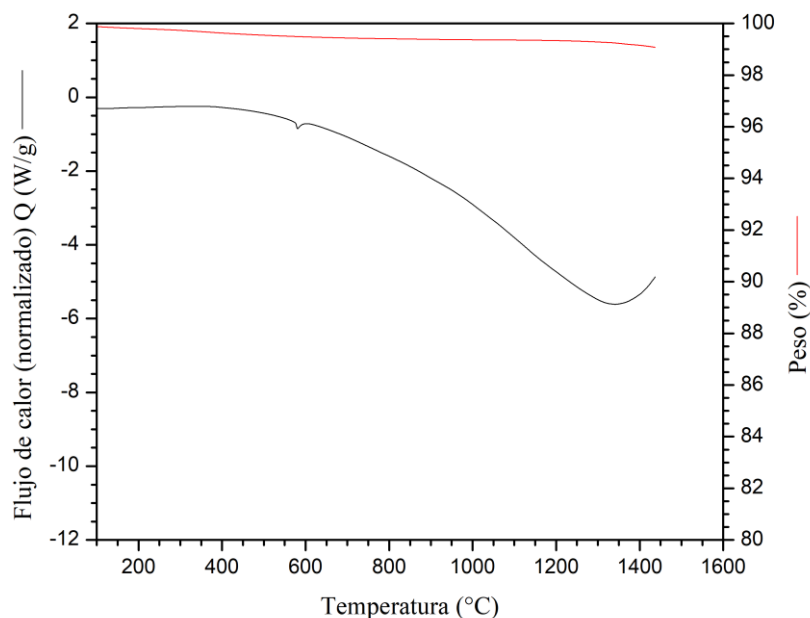
5.2 Caracterización térmica de las arenas

5.2.1 Termogravimetría/calorimetría

En las Figuras 5.20 a la 5.25 se presentan las curvas de calorimetría y termogravimetría de las diferentes arenas bajo estudio.

En la Figura 5.20, se tiene la curva de calentamiento de la arena de sílice Paraná, donde la curva de termogravimetría (TGA) representa la pérdida de peso de la muestra, en donde está perdida es menor al 1% de peso. La curva de calorimetría diferencial de barrido (DSC), muestra un pequeño pico endotérmico alrededor de 573°C, el cual corresponde a la transición de cuarzo α a β presente en la sílice (Quintero, 2009), finalmente a los 1200°C se presenta un pico endotérmico de la curva que representa la sinterización o fusión parcial de la misma.

Figura 5.20 Termogravimetría/calorimetría arena de sílice Paraná



Las Figuras 5.21 y 5.22, representan las curvas de TGA y DSC de las arenas de cromita Somarriva y cromita Urzquen, respectivamente. Ambas curvas muestran un comportamiento térmico similar, donde la variación de masa en las curvas TGA es menor al 1% para ambas arenas.

El flujo de calor en la muestra de cromita (DSC), hasta 600°C se mantiene estable y desde ese momento comienza a caer hasta los 1300°C, teniendo una descomposición dada la oxidación de la arena, disociándose en óxidos de cromo (Cr_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3) (Campbell, 2011).

A temperaturas elevadas, como 1450°C, la cromita puede experimentar oxidación. Según estudios, la oxidación de FeCr_2O_4 comienza a ocurrir a temperaturas superiores a 673 K (aproximadamente 400°C) y se intensifica a medida que se incrementa la temperatura. La oxidación puede llevar a la formación de óxidos de cromo y hierro, lo que puede alterar la composición química y la estructura del material (Sarkar & Ghose, 1990).

Figura 5.21 Termogravimetría/calorimetría arena de Cromita Somarriva

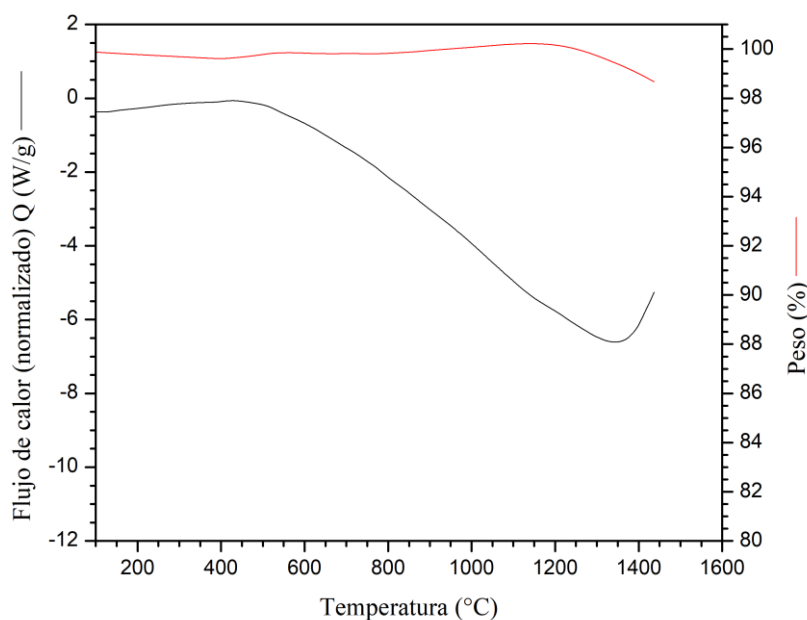
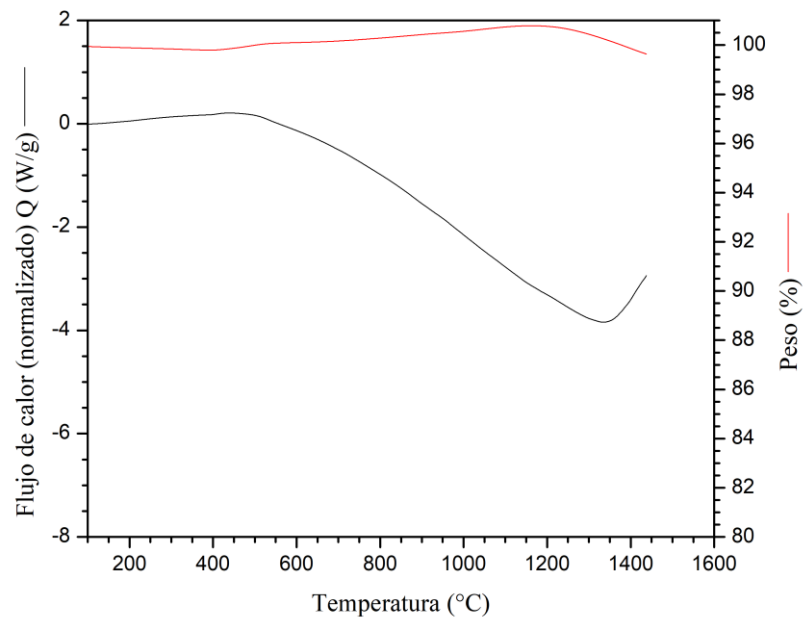


Figura 5.22 Termogravimetría/calorimetría arena de Cromita Urzquen



Ambas curvas de termogravimetría/calorimetría del circón, Figura 5.23 y 5.24, se comportan de la misma manera, las curvas presentan una pérdida de masa de aproximadamente un 1%. Hasta los 1300°C se tiene una arena muy estable térmicamente, luego se observa un pico endotérmico, el cual podría representar el inicio de la sinterización de la muestra.

Figura 5.23 Termogravimetría/calorimetría arena de Circón Grueso

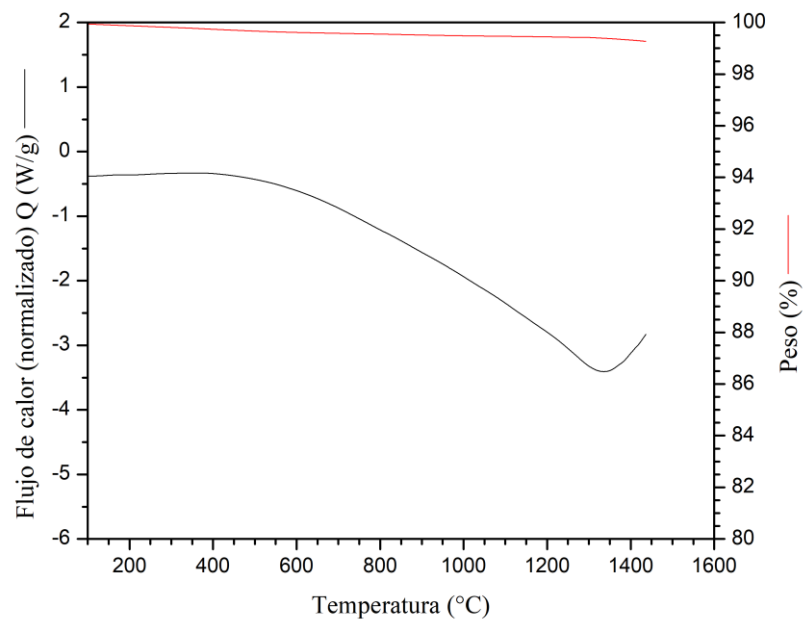
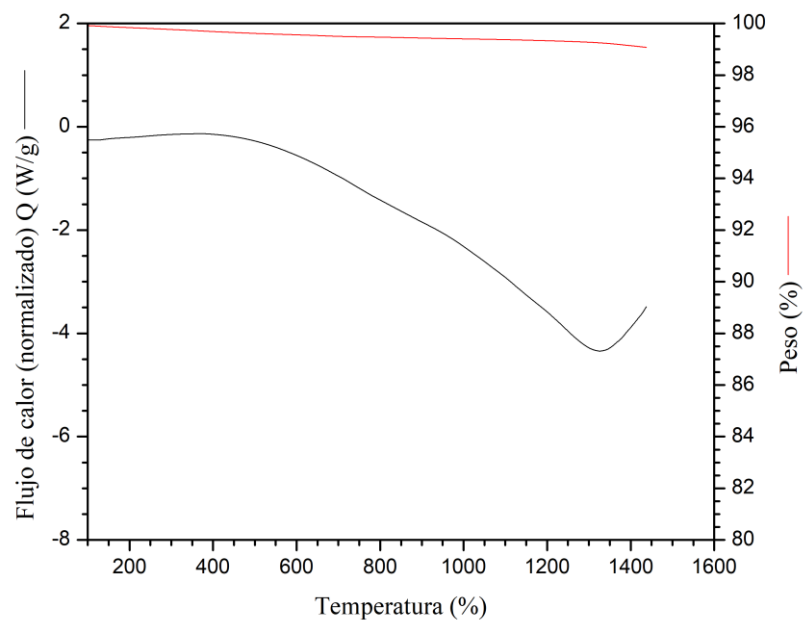


Figura 5.24 Termogravimetría/calorimetría arena de Circón Fino



5.2.3 Sinterización y dilatación térmica de las arenas

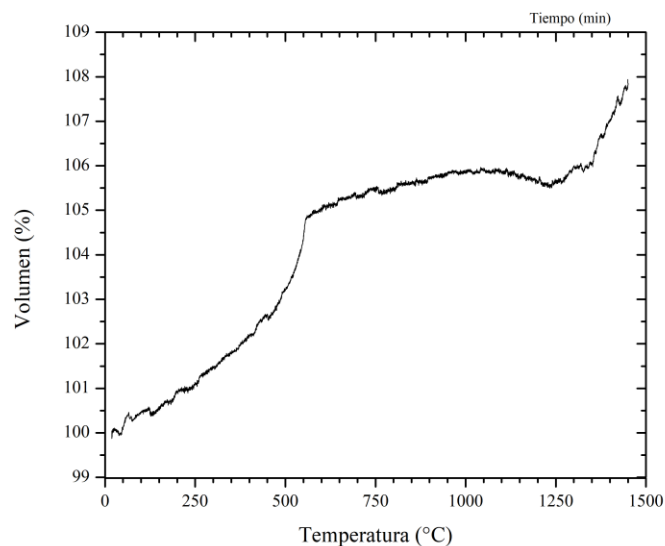
Para complementar la estabilidad térmica de las arenas se realizaron pruebas de sinterización y dilatación térmica. Los resultados obtenidos, se presentan en las Figuras de la 5.25 a la 5.29

La Figura 5.25, representa la curva de dilatometría de la arena de sílice Paraná, complementando a la información obtenida en la curva de calorimetría/termogravimetría. Alrededor de los 573°C se observa un cambio brusco en la pendiente. Este cambio corresponde a la transformación de cuarzo α a β coincidiendo con el pico endotérmico del DSC.

Al calcular la variación de volumen desde la gráfica, se determina que esta transformación genera un aumento de volumen del 1,25% debido a la expansión térmica. Posteriormente la curva se contrae asumiendo el comienzo de la sinterización. Cerca de los 1250 °C, se observa otro cambio en la pendiente. Este último cambio se asocia a la expansión volumétrica del molde ya sinterizado.

La expansión volumétrica alcanza un 8%, lo cual es un factor importante a considerar en los moldes. Al cambiar de fase, el cuarzo experimenta una expansión volumétrica (Quintero, 2009). Este fenómeno puede dar paso a defectos en el molde como un agrietamiento o formación de inclusiones. Además, la sinterización de la arena también implica un aumento de volumen del molde, lo que agrava el riesgo de estos defectos.

Figura 5.25 Dilatometría arena de sílice Paraná



Las Figuras 5.26 y 5.27, representa la curva de dilatometría de la arena de cromita Somarriva y Urzquen respectivamente. Al complementar con su DSC/TGA, se tiene una expansión volumétrica hasta aproximadamente los 800°C, la cual comienza a caer dada la disociación de la misma y formación de óxidos, al formarse los óxidos comienza a expandirse como molde, hasta casi los 1400°C, a esta temperatura se puede observar como la curva se contrae. Esta contracción daría paso a la sinterización del molde.

Figura 5.26 Dilatometría arena de Cromita Somarriva

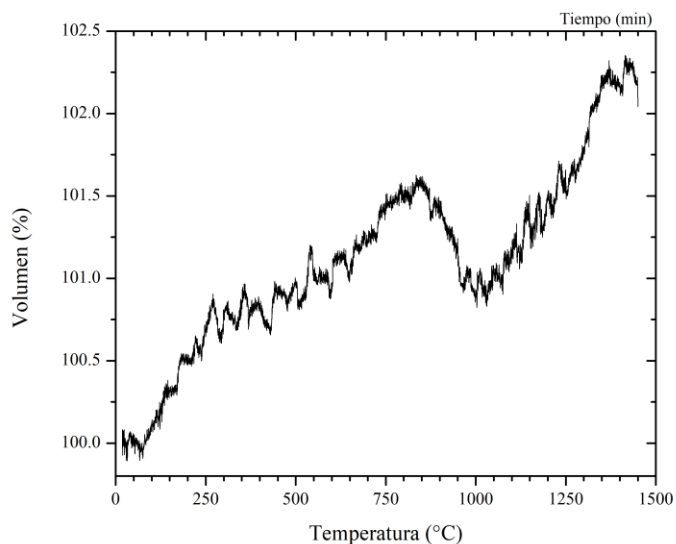
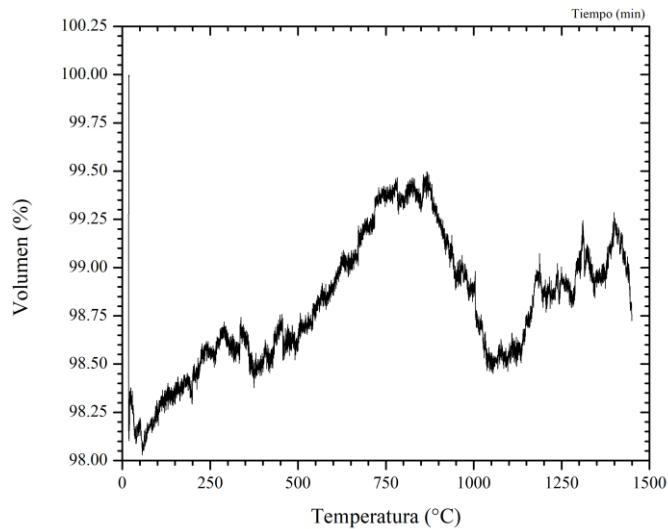


Figura 5.27 Dilatometría arena de Cromita Urzquen



Tanto en la Figura 5.28 como la 5.29 presentan las curvas de dilatometría de la arena de circón gruesa y fina respectivamente. Al complementar con su curva de calorimetría/termogravimetría, se puede asociar su buena capacidad térmica al ver un incremento constante hasta los 1200°C aproximadamente, en donde comienza a disminuir su volumen dando paso al inicio de la sinterización de la arena (Kaiser et al., 2008).

Figura 5.28 Dilatometría arena de Circón Grueso

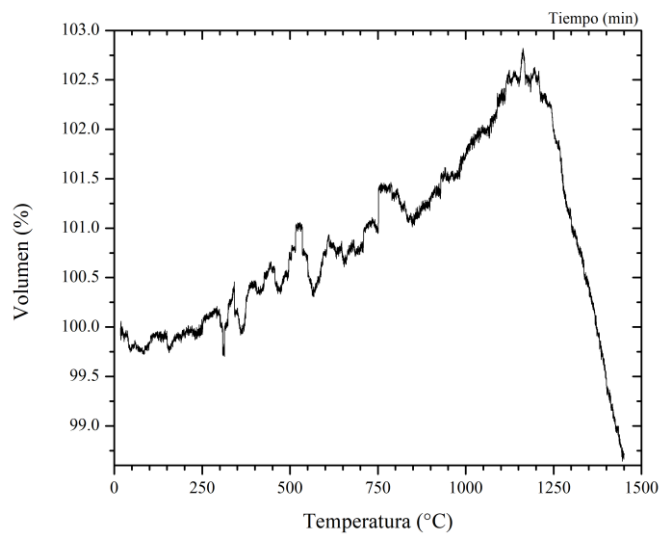
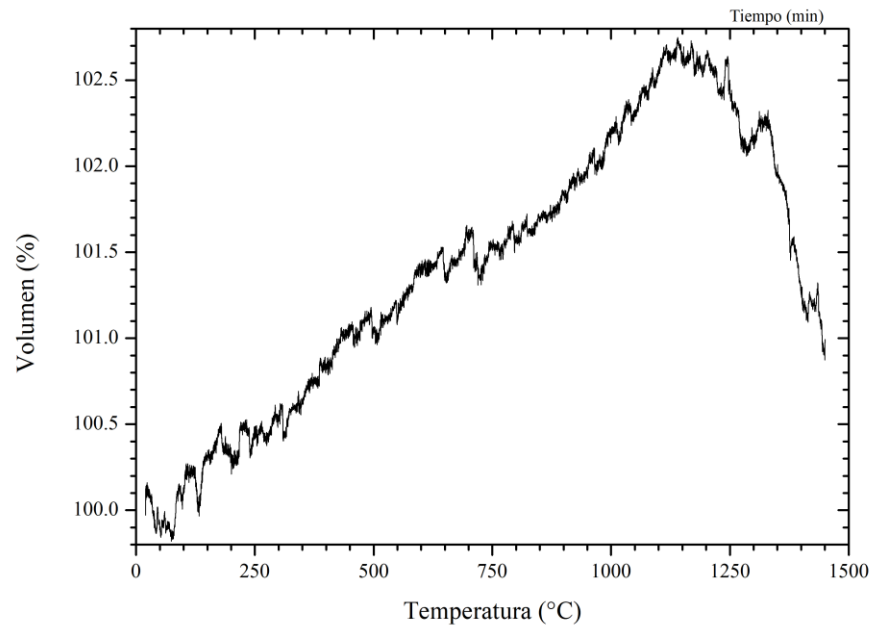


Figura 5.29 Dilatometría arena de Circón Fino



5.3 Composición química de la fundición

Para las pruebas de fusión y reactividad con las arenas se utilizó una fundición blanca alta en cromo, cuya composición puede observarse en la Tabla 5.8. Según la composición química, esta fundición puede ser clasificada según la norma ASTM A532 como una fundición blanca clase I tipo D (BORUI, 2019).

Tabla 5.8 Composición química elemental bola fundida alta en cromo

Bola	Composición química, % masa									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
	> 3,000	0,62	0,39	0,94	0,12	16,01	0,11	10,19	0,14	Resto

5.4 Reactividad entre la fundición blanca alta en cromo y las distintas arenas de moldeo

5.4.1 Preparación material

Para realizar las pruebas de reactividad del metal con la arena se extrajeron pequeños segmentos de este material obtenidos desde una sección de bola de molienda (Figura 5.30). Posteriormente, estos trozos fueron fracturados par tener pequeñas esquirlas inferiores a 1,5 cm tal como se muestra la Figura 5.31, los cuales fueron utilizados en las pruebas de reactividad.

Figura 5.30 Sección de bola de molienda utilizada para la extracción de trozos de fundición blanca alta en cromo

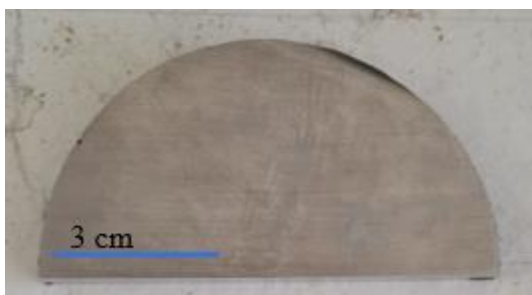
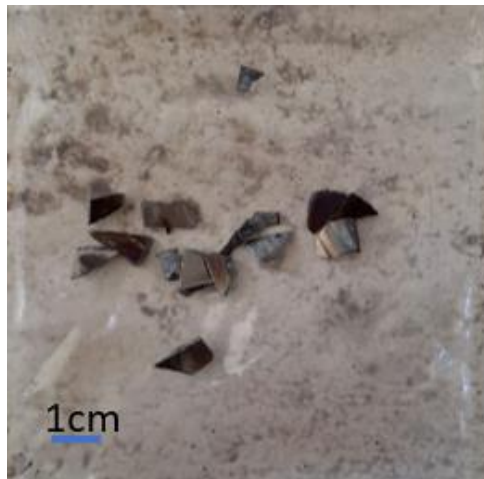


Figura 5.31 Esquirlas de fundición



5.4.2 Termobalanza

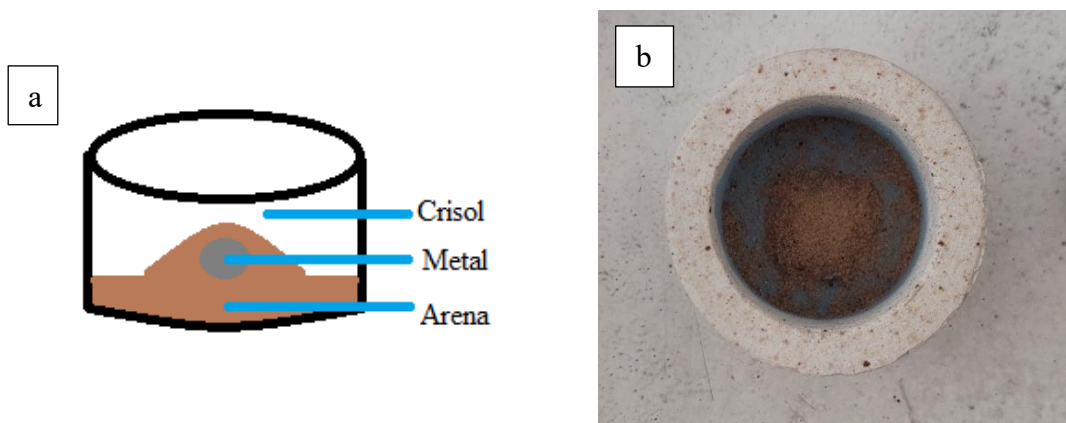
Para analizar la reactividad en primera instancia se utilizaron pequeños crisoles de alúmina, los cuales se prepararon pintando las murallas de la misma con pintura de circon para poder despegar el material fundido del crisol con mayor facilidad. Al realizarlo de esta manera, los cambios de volumen ocurridos durante la fusión y solidificación provocaban la fractura de los crisoles, tal como se aprecia en la Figura 5.32

Figura 5.32 Crisol de alúmina roto con el material



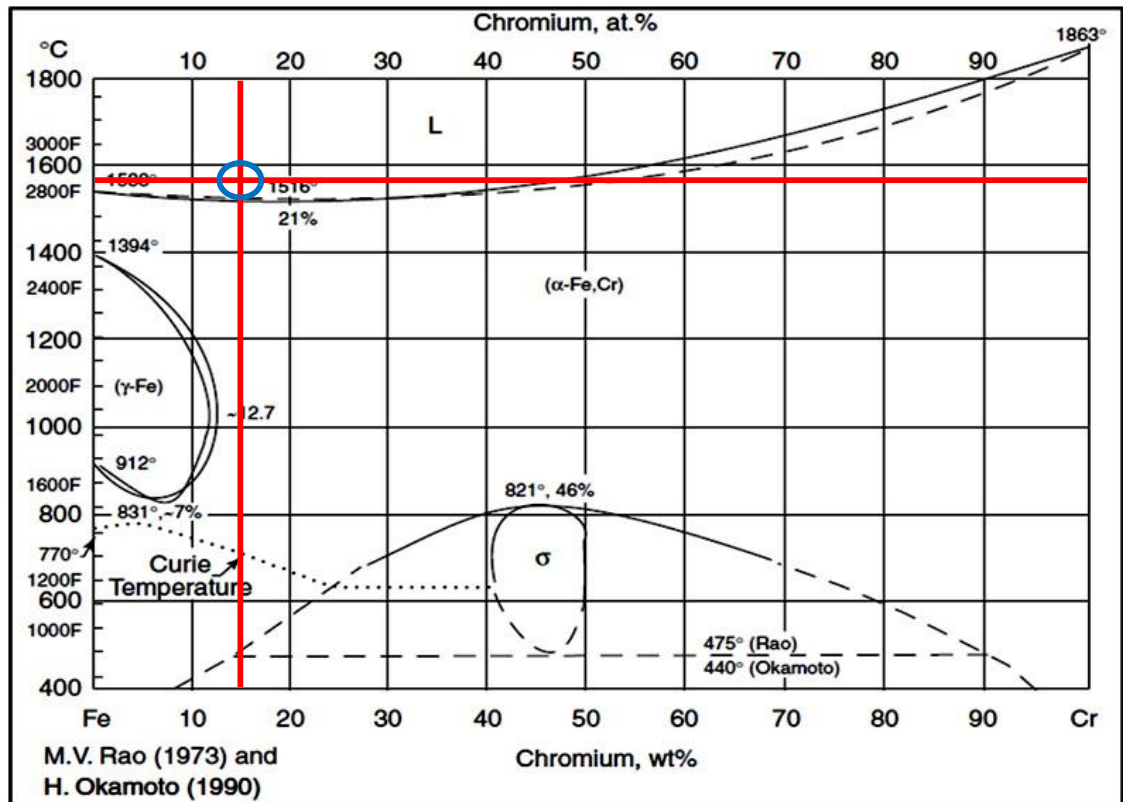
Considerando lo anterior, se cambió el crisol a uno de material refractario, el cual tiene mayor dimensión. Para este crisol también se pintaron las paredes del mismo y la fundición y arena se depositaron en forma de cúpula como muestra la Figura 5.33

Figura 5.33 Disposición arena y fundición dentro del crisol a) vista lateral crisol b) vista superior crisol



De modo de asegurar la fusión completa de la aleación metálica, las pruebas fueron realizadas a 1550°C por un tiempo de 1 h, ya que a esta temperatura la fundición bajo estudio según composición y diagrama de fase, se encontraría completamente en estado líquido (Figura 5.34)

Figura 5.34 Diagrama de fase Fe-Cr (AL-Mangour, 2013)



5.4.3 Metalografía y difracción rayos X de la arena de sílice post calentamiento

En la Figura 5.35 se observa la MEB y EDS de la fundición blanca alta en cromo junto con la arena de sílice. en esta podemos identificar 3 zonas distintas según sus colores y elementos presentados en el EDS, la más blanca siendo la fundición blanca alta en cromo (sector 1), la más oscura la base de arena de SiO_2 (sector 2) y una grisácea la cual corresponde a una nueva fase intermedia de óxidos de cromo y óxidos de hierro (sector 3) la cual se generó con la alta temperatura y la alta tendencia que tiene el cromo y el hierro de formar óxidos al aumentar la temperatura.

Se observa que el metal penetra parcialmente en la arena cerca de la interfase, lo que da lugar al ametalamiento o "burn-on". Este fenómeno ocurre a altas temperaturas, cuando los granos de arena se funden y se acoplan entre sí. A estas temperaturas, se forman silicatos con una temperatura de fusión más baja que la del metal, lo que provoca que los granos se adhieran a la superficie de la fundición, actuando como un pegamento debido a la baja temperatura de fusión (Campbell, 2011).

La Figura 5.36, muestra el patrón de difracción de Rayos X obtenido luego del calentamiento de la fundición alta en cromo junto a la arena de sílice. El análisis presenta dos fases distintas SiO_2 , que puede se puede atribuir a la transformación del cuarzo- α a cuarzo- β , durante el calentamiento. También es importante considerar que se obtuvo una fase $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, la cual indica la reacción arena-metal en su interfase, creando una fase intermedia de ametalamiento.

Figura 5.35 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de sílice Paraná 1000x

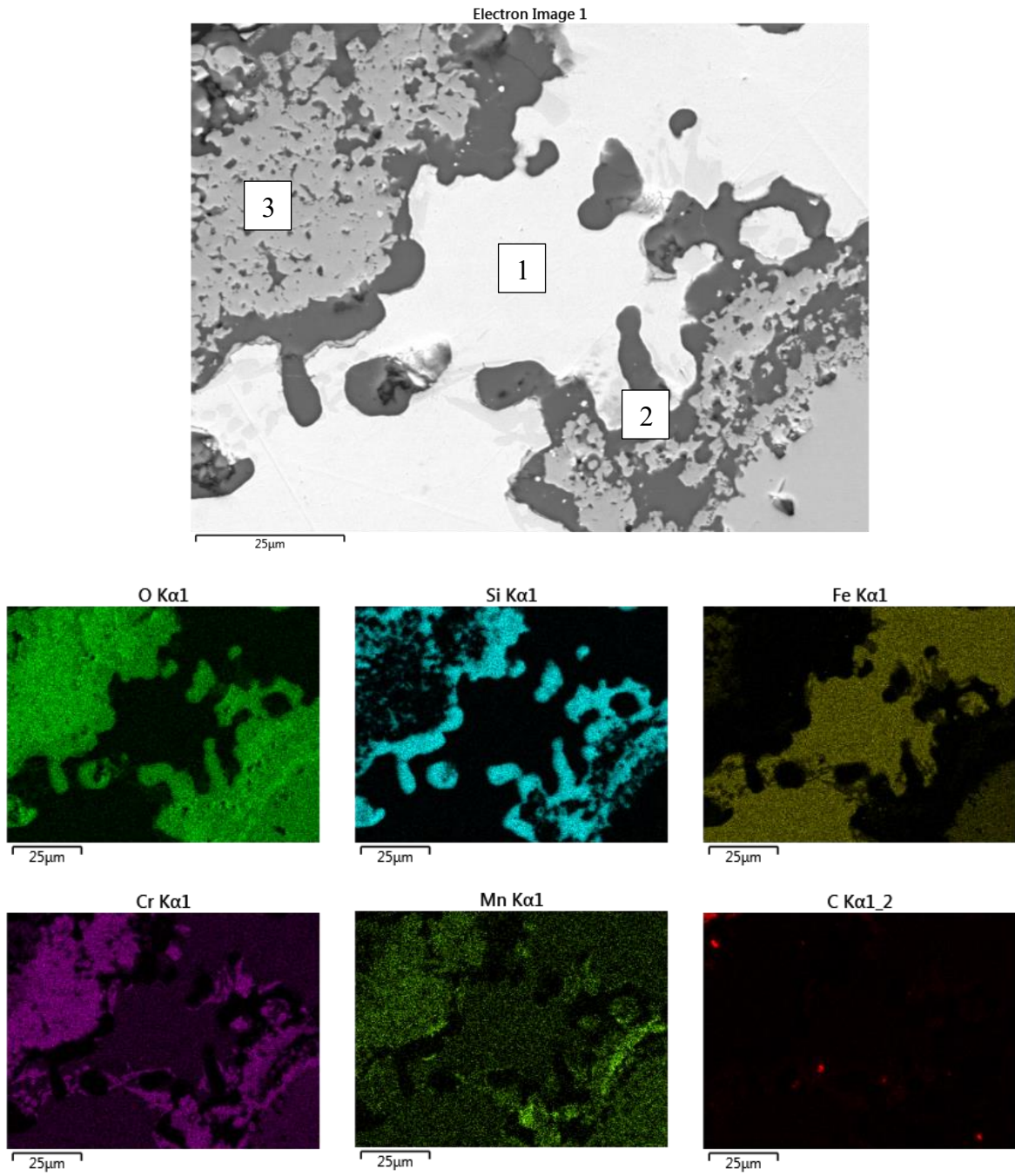
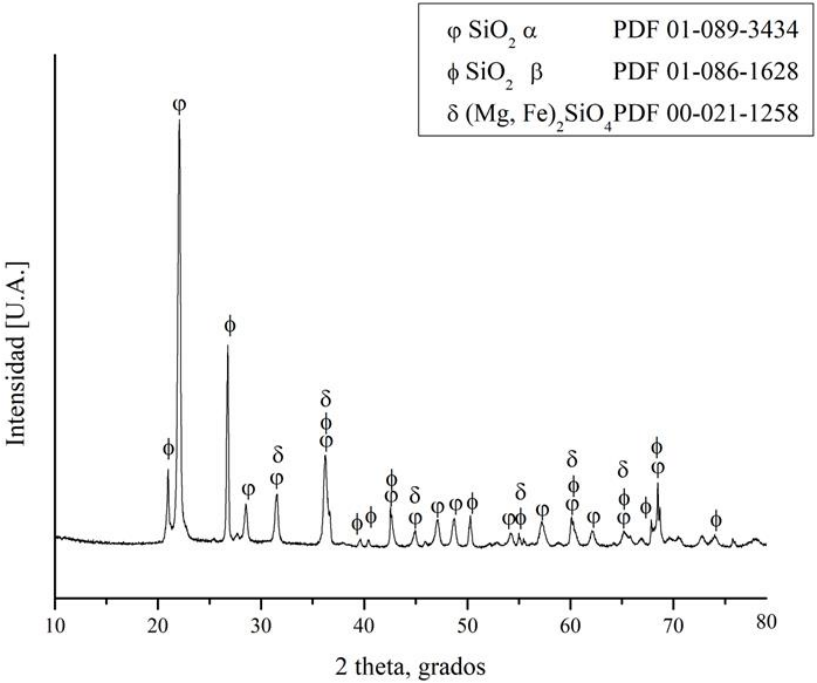


Figura 5.36 Difractograma de Rayos X de arena de sílice Somarriva post calentamiento



5.4.4 Metalografía y difracción rayos X de la arena de cromita post calentamiento

En la Figura 5.37 se observa la MEB y EDS de la fundición blanca alta en cromo junto con la arena de cromita Somarriva, se puede observar 2 colores, teniendo un color blanco una mezcla entre arena de cromita y fundición (sector 1), ya que ambas poseen los mismos elementos principales (Fe y Cr), es difícil determinar una clara interfase, además de esto se presenta un color negro (sector 2) el cual representa la briqueta en la que se encuentra embebida la arena.

Un problema adicional con la cromita es que no es particularmente estable a las temperaturas de fundición del acero. En condiciones oxidantes, se oxida lentamente a Fe_2O_3 y Cr_2O_3 , pero en presencia de carbono de aglutinantes orgánicos, su óxido de hierro puede reducirse a hierro líquido (Campbell, 2011).

El problema del ametalamiento también se reduce con la utilización de otras arenas que contienen menos sílice, como la arena de cromita. Sin embargo, las pequeñas cantidades de sílice presentes en la cromita aún pueden causar problemas en fundiciones de hierro, donde la temperatura extrema provoca que la sílice residual se fusione con la arcilla. Generalmente, la penetración de metal sigue a medida que los granos se funden entre sí, lo que provoca el colapso de la superficie del molde. La masa fundida se conoce a veces como "escoria de cromita". Es un tipo de quemadura superficial y es difícil de eliminar en fundiciones de hierro (Campbell, 2011).

En la Figura 5.38 se presenta el difractograma de Rayos X de la arena de cromita Somarriva luego del calentamiento junto a la fundición alta en cromo. Se puede observar cómo se oxidó formando óxidos de hierro y óxidos de cromo, de acuerdo a lo visto anteriormente, lo cual ratifica la alta reactividad que tiene la arena de cromita a altas temperaturas y su facilidad de formación de óxidos.

Figura 5.37 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de Cromita Somarriva 70x

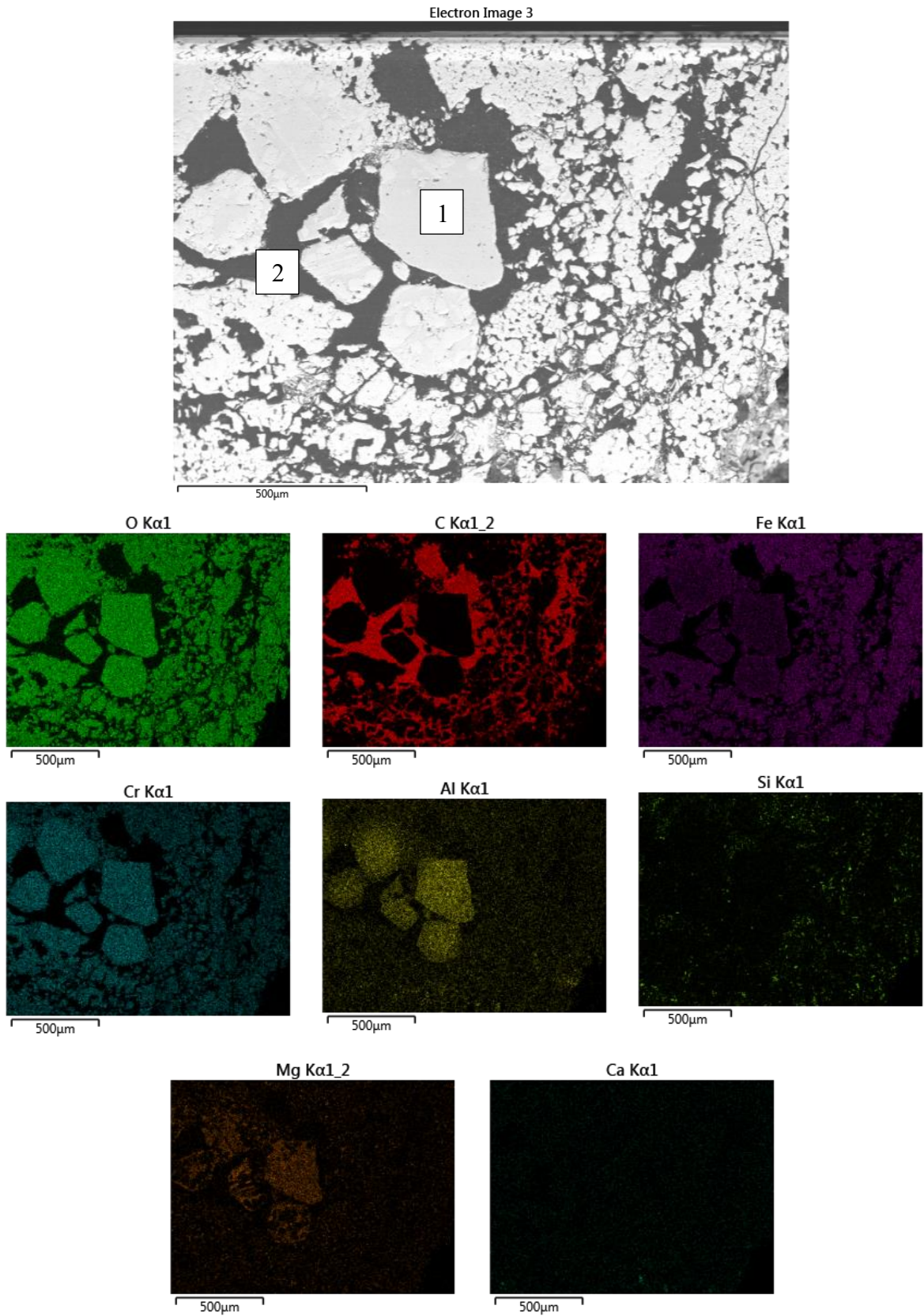
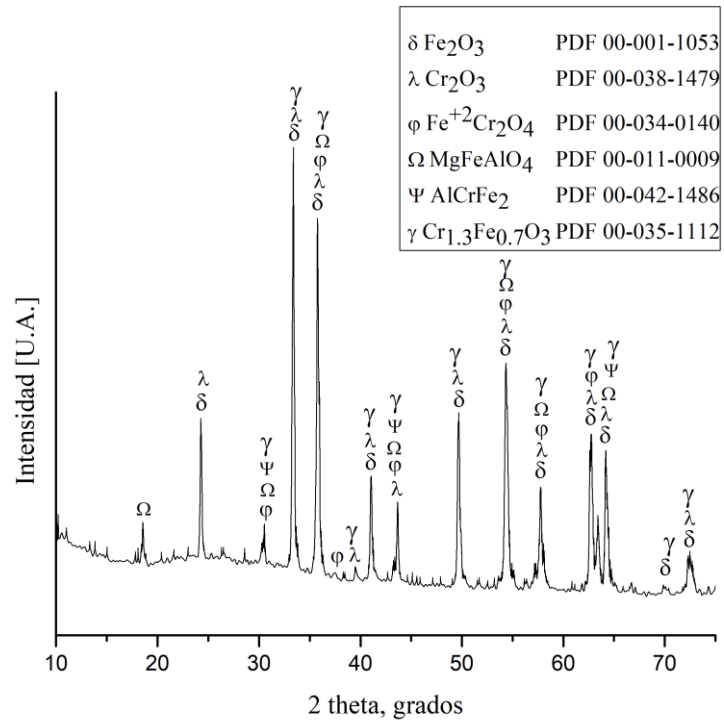


Figura 5.38 Difractograma Análisis DRX arena de cromita Somarriva post calentamiento



5.4.5 Metalografía y difracción rayos X de la arena de circón post calentamiento

En la Figura 5.39 se observa la MEB y EDS de la fundición blanca alta en cromo junto con la arena de circón grueso. En esta podemos apreciar 3 colores el color negro representa a la sílice presente en la arena de circón ($ZrSiO_4$) (sector 1), el color gris representa el metal teniendo sus principales elementos dispersos completamente (sector 2) y una zona blanca (sector 3) donde se puede apreciar el crecimiento de dendritas de circón en la interfase con el metal las cuales crecen perpendiculares a la interfase, hacia la fundición. Junto al crecimiento de dendritas se tiene que estas solamente poseen Zr. Con esto se puede interpretar que, al combinar la arena junto a la fundición, se obtuvo una precipitación de Zr durante el enfriamiento y solidificación del material, ya que este elemento no es muy soluble en hierro.

La Figura 5.40 presenta el difractograma de Rayos X de la arena de circón grueso luego del calentamiento junto a la fundición alta en cromo. Se puede observar que esta arena no tuvo ningún cambio en su estructura a nivel de detección de difracción de rayos X, dado que esta arena tiene muy poca reactividad a altas temperaturas teniendo un buen comportamiento térmico.

Figura 5.39 MEB y EDS fundición blanca junto a arena de Circón Grueso 1000x

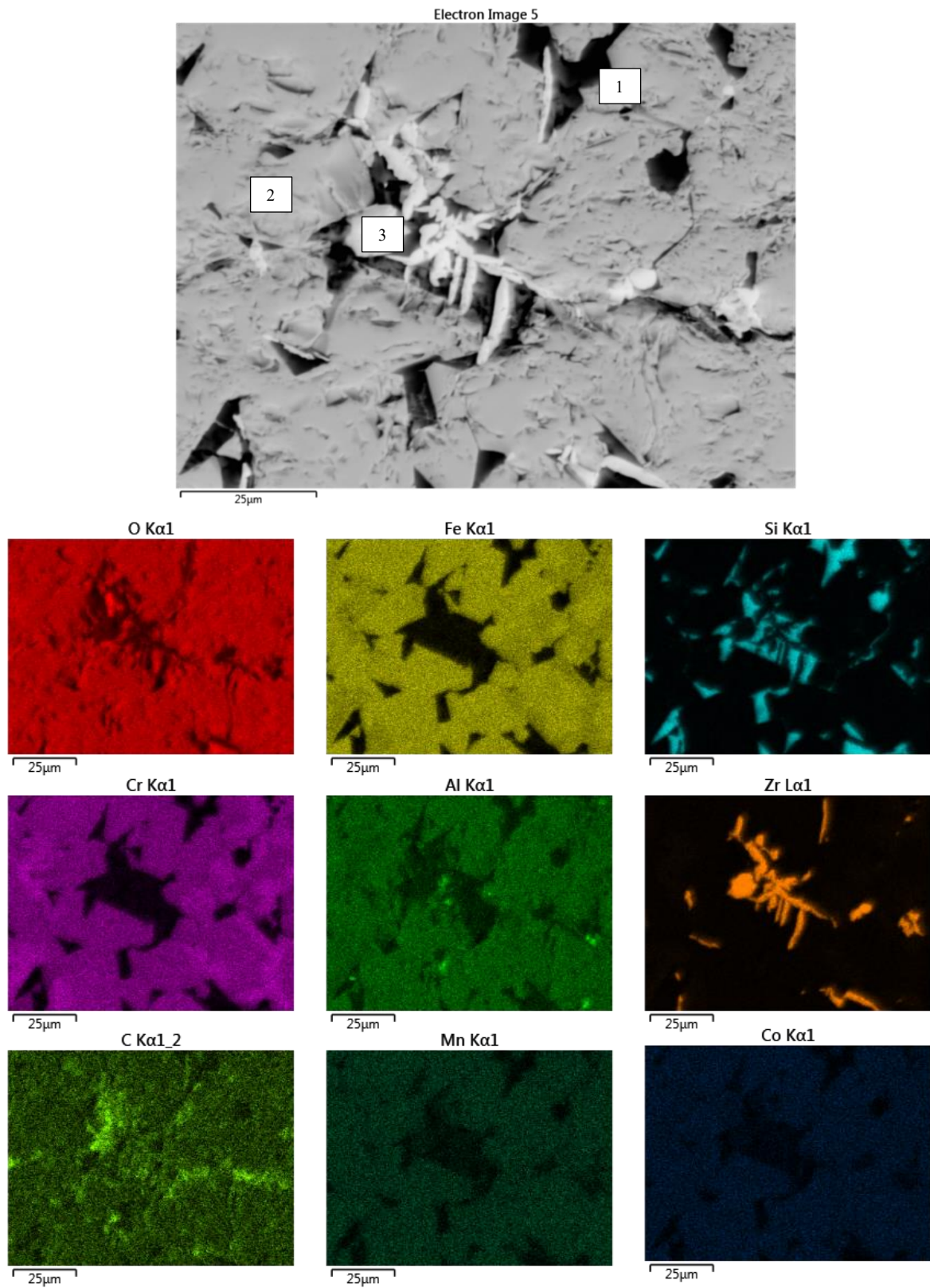
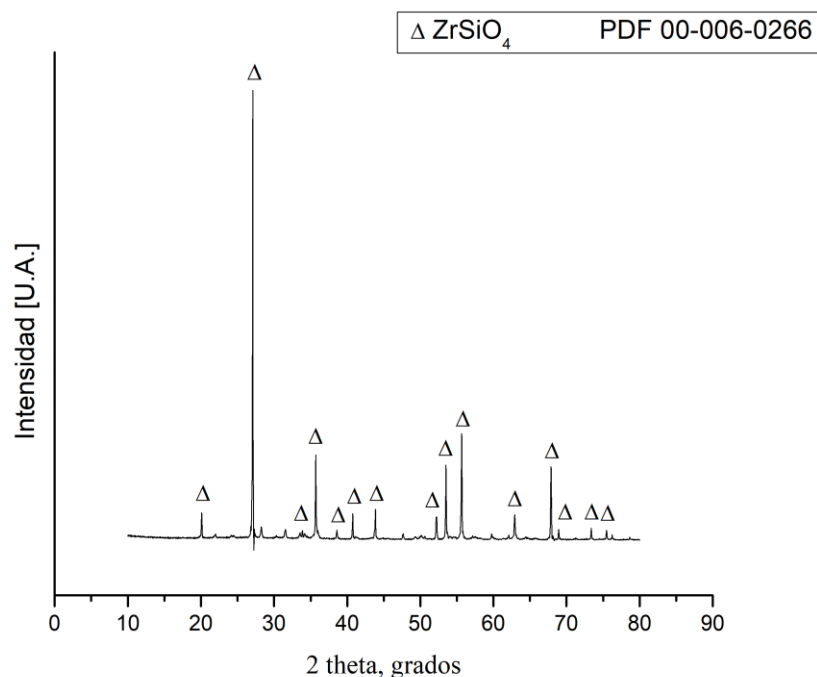


Figura 5.40 Difractograma Análisis DRX arena de circonio grueso post calentamiento



5.5 Estudio económico

Para realizar este estudio económico, se considerará la fabricación de pernos elaborados con fundición blanca alta en cromo. Los costos asociados a cada conjunto de pernos se estimarán en función de los valores de las arenas utilizadas presentadas en la Tabla 5.9, proporcionados por la empresa ME Elecmetal. Estos pernos se producen en moldes de arena que contienen cuatro unidades, con una masa total de arena de aproximadamente 48 kg. Los moldes de una pieza fundida deben tener un buen espesor para mantener su estabilidad y poder disipar el calor de la pieza correctamente sin fracturarse (Campbell, 2011).

Tabla 5.9 Valores de arena

Arena sílice nacional	USD 0,05 / kg
Arena sílice Paraná	USD 0,30 / kg
Arena cromita	USD 0,85 / kg
Arena circonio	USD 3,10 / kg

Tanto para la arena de cromita como para la arena de circonio, se presenta un solo valor, por ende, se tomará un promedio entre las dos masas de arena calculadas.

$$\text{Valor molde arena de sílice nacional} = 48 \text{ kg} \times 0,05 \text{ USD/kg} = 2,4 \text{ USD}$$

$$\text{Valor molde arena de sílice Paraná} = 48 \text{ kg} \times 0,30 \text{ USD/kg} = 14,4 \text{ USD}$$

$$\text{Valor molde arena de cromita} = 48 \text{ kg} \times 0,85 \text{ USD/kg} = 40,8 \text{ USD}$$

$$\text{Valor molde arena de circón} = 48 \text{ kg} \times 3,10 \text{ USD/kg} = 148,8 \text{ USD}$$

Al realizar este balance, se observa que las arenas de circón son las más costosas, con un valor de 148,8 USD por set de pernos, seguidas por la arena de cromita, cuyo costo asciende a 40,8 USD por set, y finalmente las arenas de sílice, que presentan los costos más bajos: 2,4 USD por set utilizando arena de sílice nacional y 14,4 USD por set con arena de sílice Paraná. Estos valores muestran una diferencia significativa en los costos que representa una barrera importante para el uso de arenas de circón a nivel industrial, a pesar de su excelente desempeño técnico. Por otro lado, las arenas de sílice, debido a su bajo costo, son ideales para procesos en los que el acabado superficial de las piezas no sea una prioridad. En este contexto, la arena de cromita se posiciona como una alternativa intermedia, combinando un buen desempeño térmico y un precio moderado, lo que la convierte en una opción viable y eficiente para aplicaciones a escala industrial.

6 CAPITULO 6 CONCLUSIONES

1. Con respecto a la caracterización física, térmica, estructural y química de las arenas se concluye lo siguiente:

- La arena de circón destacó por su alta refractariedad (temperatura de fusión de 2550 °C) y su baja expansión térmica, propiedades que la convierten en una excelente opción técnica para minimizar defectos asociados al ametalamiento. Su densidad elevada favorece una buena compactación del molde, contribuyendo a reducir la penetración del metal fundido y mejorando la calidad superficial de las piezas.
- La arena de cromita mostró un balance técnico interesante gracias a su buena conductividad térmica, adecuada refractariedad (temperatura de fusión de 2180 °C) y resistencia química moderada frente al metal fundido, aunque presenta una reactividad intermedia con el metal que podría ocasionar defectos en ciertas condiciones.
- La arena de sílice, aunque ampliamente utilizada por su bajo costo, mostró importantes limitaciones técnicas, como una menor refractariedad (temperatura de sinterización de 1100-1300 °C) y mayor reactividad química con el metal, lo que la hace propensa a defectos significativos como el ametalamiento. Es más adecuada para procesos menos exigentes o donde los defectos superficiales no son críticos.

2. Para el estudio de la reactividad entre la fundición blanca alta en cromo y las arenas de moldeo se obtuvo los siguientes resultados:

- La arena de circón presentó la menor reactividad química con la fundición, minimizando la formación de silicatos en la interfaz metal/molde. Esta baja reactividad se traduce en piezas fundidas con superficies más limpias y menor necesidad de operaciones de limpieza posteriores.
- La arena de cromita mostró un desempeño técnico adecuado, con una moderada formación de escorias. Aunque menos efectiva que el circón, sus propiedades son suficientes para procesos de fundición estándar.
- La arena de sílice fue la más reactiva de las tres, favoreciendo la formación

de silicatos de baja temperatura de fusión que propician el ametalamiento. Esto genera una adherencia significativa de los granos de arena a la superficie del metal, afectando negativamente la calidad final de las piezas.

3. Considerando los resultados técnicos y económicos obtenidos, se concluye que:

- La arena de circón, aunque técnicamente es la mejor opción, su alto costo limita su viabilidad para procesos industriales de gran escala. Es adecuada únicamente para aplicaciones de alta precisión donde la calidad justifica el costo.
- La arena de cromita, es la opción más viable en términos técnicos/económicos, posee buenas características físicas y sus características térmicas son aceptables, además de encontrarse en un valor apropiado para ser usado en procesos que necesiten una mejor calidad a la que pueda obtenerse con la arena de sílice.
- La arena de sílice, su uso debería restringirse a procesos donde la calidad superficial no sea crítica, ya que sus propiedades limitadas la hacen propensa a defectos significativos en condiciones de alta exigencia térmica y química.

El estudio demuestra que la arena de circón es la mejor opción técnica para minimizar defectos y mejorar la calidad superficial en la fundición de hierro blanco alto en cromo. Sin embargo, debido a su alto costo, la arena de cromita representa una alternativa más viable, combinando eficiencia económica y buen desempeño técnico. Este enfoque balanceado permite optimizar los procesos de fundición, reduciendo costos operativos sin comprometer significativamente la calidad de las piezas fundidas.

Para aplicaciones que requieran un mejor acabado superficial pero no justifiquen el costo de las arenas de circón, se pueden utilizar moldes de arena de cromita. Estos ofrecen un equilibrio óptimo entre costo y desempeño técnico. Además, se pueden emplear con una capa de pintura de circón, lo que mejora sus propiedades térmicas y proporciona un mejor acabado superficial a la pieza.

Este enfoque aprovecha las buenas propiedades de la arena de cromita, mejorando significativamente la refractariedad del sistema. También reduce los defectos de ametalamiento al actuar como una barrera que minimiza la interacción química directa entre la cromita y el metal fundido. Así, se logran menores costos y buenas conductividades térmicas.

7 CAPITULO 7 REFERENCIAS

Ajay, R., & Lovneesh, S. (2023). Experimental study on effect of sand grain size and heat dissipation on the properties of moulding sand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110(1), 012078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012078>

American Foundry Society. (2006). *Mold and core test handbook*.

Anwar, N., Sappinen, T., Jalava, K., & Orkas, J. (2021). Comparative experimental study of sand and binder for flowability and casting mold quality. *Advanced Powder Technology*, 32(6), 1902–1910. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.040>

Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (9.^a ed.). Cengage Learning.

Brooks, B., & Beckermann, C. (2006). Prediction of burn-on and mold penetration in steel casting using simulation. *Steel Founders' Society of America*.

BORUI. (2019). ASTM A532 standard abrasion resistant cast iron. *Iron Foundry*. <http://www.iron-foundry.com/ASTMA532-Standard-Abrasion-Resistant-Cast-Iron.html>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (9.^a ed.). Reverté.

Campbell, J. (2011). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-01548-1>

Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Universidad de Bogotá*.

Enrique, & Luis. (1988). *Ciencias para la metalmecánica*.

Florez, E. O., & Castaño, C. (2012). Comportamiento microestructural de una fundición blanca al alto cromo sometida a ciclos de tratamiento térmico. *Scientia et Technica*, 50(1), 1–8.

Foseco. (2000). *Ferrous foundryman's handbook: Sands and green sand*. Butterworth-Heinemann.

Gabbott, P. (2008). A practical introduction to differential scanning calorimetry. En *Principles and applications of thermal analysis* (pp. 1–50). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470697702.ch1>

Grantt, & Suryanarayana. (1979). *X-Ray diffraction: A practical approach*.

Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas* (3.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Holtzer, M. (1990). Interfacial reaction between high-manganese cast steel and silica sand or chromite sand. *Journal of Materials Processing Technology*, 36(4), 45–52.

Hsiao, K. T., Advani, S. G., & Kuang-Ting, H. (2012). *Manufacturing techniques for polymer matrix composites: Resin transfer molding*. Elsevier.

Juriani, A. (2015). Casting defects analysis in foundry and their remedial measures with industrial case studies. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(4), 1–7.

Kaiser, A., Lobert, M., & Telle, R. (2008). Thermal stability of zircon (ZrSiO₄). *Journal of the European Ceramic Society*, 28(11), 2199–2211.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.040>

Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5.^a ed.). Pearson Educación.

Kruse, B., Richards, V., & Jackson, P. (2006). An investigation of the causes that lead to burn-in/burn-on in heavy section steel castings. *Transactions of the American Foundry Society*, 114(1), 761–774.

Lamas, V., & Valderrama, L. (2005). Estudio de factibilidad técnica y económica para producir arenas de moldeo para fundición Metalnorte. *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro*.

Li, L., Xie, H., Huang, D., Tan, H., Zhou, J., & Jingyi, Z. (2008). Prevention of burn-on defect on surface of hydroturbine blade casting of ultra-low-carbon refining stainless steel. *China Foundry*, 5(3), 190–193.

Memoria Chilena. (s. f.). Origen de la gran minería del cobre (1904-1930). *Memoria Chilena: Portal*. <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3632.html>

Portal, C., & J., A. (2008). *Estructuras metalográficas de aleaciones hierro-carbono: Aceros al carbono y fundiciones*. Editorial Reverte.

Quintero, O. (2009). *Principios de tecnología de fundición*. Editorial Equinoccio.

Rossini, R. A. (1970). Dilatometría de arcillas refractarias. *Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas*.

Sarkar, S., & Ghose, J. (1990). Studies on the thermal stability of iron chromite in air. *Journal of Thermal Analysis*, 36(7–8), 2593–2599. <https://doi.org/10.1007/bf01913656>

Taipe, L. (2018). Molde para guardachoque mediante moldeo por resina [Tesis de maestría, Universidad Internacional SEK].

Trepczyńska-Łent, M. (2013). Directional solidification of ledeburite. *Archives of Foundry Engineering*, 13(1), 1–6.

Zircon Sand-Zhengzhou Haixu Abrasives Co., Ltd. (s. f.). *Zircon sand*. https://www.hxabrasive.com/products/Zircon_sand.html

8 CAPITULO 8 ANEXO

Tabla 7.1 Análisis granulométrico arena de sílice

Si Paraná					
Malla	Abertura [μm]	Retenido parcial [g]	Retenido parcial [%]	Retenido acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
12	1680	0,00	0,00	0,00	100,00
20	850	7,20	3,20	3,20	96,80
30	600	14,90	6,62	9,81	90,19
40	425	47,30	21,00	30,82	69,18
50	300	88,60	39,34	70,16	29,84
70	212	53,40	23,71	93,87	6,13
100	150	10,90	4,84	98,71	1,29
140	106	2,10	0,93	99,64	0,36
200	75	0,60	0,27	99,91	0,09
270	53	0,10	0,04	99,96	0,04
-270	0	0,10	0,04	100,00	0,00
		225,2	100,000		

Tabla 7.2 Análisis granulométrico arena de Cromita Urzquen

Cromita Urzquen					
Malla	Abertura [μm]	Retenido parcial [g]	Retenido parcial [%]	Retenido acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
12	1680	0,00	0,00	0,00	100,00
20	850	1,80	0,67	0,67	99,33
30	600	24,10	9,01	9,68	90,32
40	425	92,70	34,64	44,32	55,68
50	300	101,50	37,93	82,25	17,75
70	212	44,70	16,70	98,95	1,05
100	150	2,00	0,75	99,70	0,30
140	106	0,30	0,11	99,81	0,19
200	75	0,30	0,11	99,93	0,07
270	53	0,10	0,04	99,96	0,04
-270	0	0,10	0,04	100,00	0,00
		267,60	100,00		

Tabla 7.3 Análisis granulométrico arena de Cromita Somarriva

Cromita Somarriva					
Malla	Abertura [μm]	Retenido parcial [g]	Retenido parcial [%]	Retenido acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
12	1680	0,00	0,00	0,00	100,00
20	850	4,50	1,97	1,97	98,03
30	600	27,10	11,87	13,84	86,16
40	425	58,50	25,62	39,47	60,53
50	300	60,50	26,50	65,97	34,03
70	212	48,50	21,24	87,21	12,79
100	150	23,40	10,25	97,46	2,54
140	106	4,70	2,06	99,52	0,48
200	75	0,90	0,39	99,91	0,09
270	53	0,10	0,04	99,96	0,04
-270	0	0,10	0,04	100,00	0,00
		228,30	100,00		

Tabla 7.4 Análisis granulométrico Circón Grueso

Zr (Grueso) Somarriva					
Malla	Abertura [μm]	Retenido parcial [g]	Retenido parcial [%]	Retenido acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
12	1680	0,00	0,00	0,00	100,00
20	850	0,10	0,04	0,04	99,96
30	600	0,00	0,00	0,04	99,96
40	425	0,10	0,04	0,08	99,92
50	300	0,50	0,20	0,29	99,71
70	212	5,80	2,36	2,65	97,35
100	150	148,70	60,57	63,22	36,78
140	106	78,80	32,10	95,32	4,68
200	75	10,80	4,40	99,71	0,29
270	53	0,60	0,24	99,96	0,04
-270	0	0,10	0,04	100,00	0,00
		245,50	100,00		

Tabla 7.5 Análisis granulométrico arena de Circón Fino

Zr (Fino) Bodega					
Malla	Abertura [μm]	Retenido parcial [g]	Retenido parcial [%]	Retenido acumulado [%]	Pasante Acumulado [%]
12	1680	0,00	0,00	0,00	100,00
20	850	0,00	0,00	0,00	100,00
30	600	0,00	0,00	0,00	100,00
40	425	0,00	0,00	0,00	100,00
50	300	0,10	0,04	0,04	99,96
70	212	2,80	1,14	1,18	98,82
100	150	22,10	9,01	10,19	89,81
140	106	126,10	51,41	61,60	38,40
200	75	90,70	36,97	98,57	1,43
270	53	3,50	1,43	100,00	0,00
-270	0	0,00	0,00	100,00	0,00
		245,30	100,00		

Tabla 7.6 Finesa de grano arena de sílice

Si Paraná			
Malla	Retenido parcial [%]	Multiplicador	Producto
12	0,00	0,05	0,00
20	3,20	0,10	0,32
30	6,62	0,20	1,32
40	21,00	0,30	6,30
50	39,34	0,40	15,74
70	23,71	0,50	11,86
100	4,84	0,70	3,39
140	0,93	1,00	0,93
200	0,27	1,40	0,37
270	0,04	2,00	0,09
-270	0,04	3,00	0,13
	100,00	AFS GFN	40,45

Tabla 7.7 Finesa de grano arena de Cromita Urzquen

Cromita Urzquen			
Malla	Retenido parcial [%]	Multiplicador	Producto
12	0,00	0,05	0,00
20	0,67	0,10	0,07
30	9,01	0,20	1,80
40	34,64	0,30	10,39
50	37,93	0,40	15,17
70	16,70	0,50	8,35
100	0,75	0,70	0,52
140	0,11	1,00	0,11
200	0,11	1,40	0,16
270	0,04	2,00	0,07
-270	0,04	3,00	0,11
	100,00	AFS GFN	36,76

Tabla 7.8 Finesa de grano arena de Cromita Somarriva

Cromita Somarriva			
Malla	Retenido parcial [%]	Multiplicador	Producto
12	0,00	0,05	0,00
20	1,97	0,10	0,20
30	11,87	0,20	2,37
40	25,62	0,30	7,69
50	26,50	0,40	10,60
70	21,24	0,50	10,62
100	10,25	0,70	7,17
140	2,06	1,00	2,06
200	0,39	1,40	0,55
270	0,04	2,00	0,09
-270	0,04	3,00	0,13
	100,00	AFS GFN	41,48

Tabla 7.9 Finesa de grano arena de Circón Grueso

Zr (Grueso) Somarriva			
Malla	Retenido parcial [%]	Multiplicador	Producto
12	0,00	0,05	0,00
20	0,04	0,10	0,00
30	0,00	0,20	0,00
40	0,04	0,30	0,01
50	0,20	0,40	0,08
70	2,36	0,50	1,18
100	60,57	0,70	42,40
140	32,10	1,00	32,10
200	4,40	1,40	6,16
270	0,24	2,00	0,49
-270	0,04	3,00	0,12
	100,00	AFS GFN	82,55

Tabla 7.10 Finesa de grano arena de Circón Fino

Zr (Fino) Bodega			
Malla	Retenido parcial [%]	Multiplicador	Producto
12	0,00	0,05	0,00
20	0,00	0,10	0,00
30	0,00	0,20	0,00
40	0,00	0,30	0,00
50	0,04	0,40	0,02
70	1,14	0,50	0,57
100	9,01	0,70	6,31
140	51,41	1,00	51,41
200	36,97	1,40	51,76
270	1,43	2,00	2,85
-270	0,00	3,00	0,00
	100,00	AFS GFN	112,92

Tabla 7.11 Cálculo factor de forma arena de sílice Paraná

Arena sílice Parana		
Largo (μm)	Ancho (μm)	Factor de Forma
277,06	268,40	0,97
288,31	279,65	0,97
266,67	208,66	0,78
347,19	195,67	0,56
367,10	198,27	0,54
483,98	367,10	0,76
419,91	174,89	0,42
319,48	314,29	0,98
378,35	317,75	0,84
268,99	223,69	0,83
253,66	189,55	0,75
380,49	298,95	0,79
405,57	337,98	0,83
303,14	216,03	0,71
392,17	256,94	0,66
273,31	245,55	0,90
320,28	159,43	0,50
251,25	160,85	0,64
270,38	225,78	0,84
319,16	240,42	0,75
Promedio		0,75

Tabla 7.12 Cálculo factor de forma arena de cromita Somarriva

Arena Cromita Somarriva		
Largo (μm)	Ancho (μm)	Factor de Forma
308,93	276,79	0,90
308,93	212,50	0,69
435,71	308,93	0,71
480,36	312,50	0,65
571,43	367,86	0,64
517,86	353,57	0,68
698,21	458,93	0,66
1025,00	728,57	0,71
362,12	327,27	0,90
269,70	207,58	0,77
463,64	295,45	0,64
339,39	172,73	0,51
384,85	277,27	0,72
398,48	330,30	0,83
322,73	169,70	0,53
339,39	300,00	0,88
342,42	315,15	0,92
318,18	219,70	0,69
400,00	196,97	0,49
250,00	218,18	0,87
Promedio		0,72

Tabla 7.13 Cálculo factor de forma arena de cromita Urzquen

Arena Cromita Urzquen		
Largo (μm)	Ancho (μm)	Factor de Forma
671,43	526,79	0,78
344,64	321,43	0,93
653,57	557,14	0,85
485,71	380,36	0,78
317,86	308,93	0,97
376,79	341,07	0,91
421,43	353,57	0,84
394,64	271,43	0,69
462,50	321,43	0,69
258,93	235,71	0,91
460,50	410,08	0,89
460,50	231,93	0,50
610,08	512,61	0,84
460,50	388,24	0,84
460,50	349,58	0,76
504,20	457,14	0,91
618,49	443,70	0,72
379,83	354,62	0,93
425,21	208,40	0,49
436,97	341,18	0,78
Promedio		0,80

Tabla 7.14 Cálculo factor de forma arena de circón grueso

Arena Circón Grueso		
Largo (μm)	Ancho (μm)	Factor de Forma
693,67	506,11	0,73
919,94	392,98	0,43
881,23	562,68	0,64
717,49	506,11	0,71
646,04	387,03	0,60
788,94	476,34	0,60
693,67	422,75	0,61
601,38	446,57	0,74
809,78	601,38	0,74
952,68	476,34	0,50
845,51	372,14	0,44
723,44	422,75	0,58
714,51	446,57	0,63
863,37	392,98	0,46
628,18	604,36	0,96
717,49	372,14	0,52
836,58	416,80	0,50
976,50	360,23	0,37
997,34	449,55	0,45
702,60	500,16	0,71
Promedio		0,60

Tabla 7.15 Cálculo factor de forma arena de circón fino

Arena Circón Fino		
Largo (μm)	Ancho (μm)	Factor de Forma
139,06	80,69	0,58
230,90	93,56	0,41
165,67	124,46	0,75
184,55	96,14	0,52
157,08	113,30	0,72
178,54	102,15	0,57
178,54	84,98	0,48
172,53	99,57	0,58
206,87	87,55	0,42
152,79	104,72	0,69
173,39	117,60	0,68
170,82	84,98	0,50
188,84	102,15	0,54
141,63	102,15	0,72
154,51	91,85	0,59
200,86	85,84	0,43
267,81	117,60	0,44
221,46	107,30	0,48
137,34	111,59	0,81
109,01	69,53	0,64
Promedio		0,58

Tabla 7.16 Cálculo densidad alcohol isopropílico

Alcohol					
w1 [g]	w2 [g]	w3 [g]	t° agua	p agua	Densidad calculada
29,0500	74,170	68,230	23,360	0,997	0,866
Alcohol replica					
w1	w2	w3	t° agua	p agua	Densidad Calculada
29,0400	73,100	67,820	23,500	0,998	0,878
Promedio					0,872

Tabla 7.17 Cálculo densidad de las arenas

Densidad					
Base	Zr grueso	Zr fino	Cromita Urzquen	Cromita Somarriva	Si Paraná
W1	39,79	40,03	32,19	32,15	32,19
W2	42,96	44,50	36,30	37,50	36,52
W3	85,65	86,77	78,72	80,10	78,75
W4	83,05	83,15	75,46	75,78	75,80
Replica 1	Zr grueso	Zr fino	Cromita Urzquen	Cromita Somarriva	Si Paraná
W1	32,18	32,50	39,95	39,85	39,81
W2	36,98	36,44	44,20	46,43	42,82
W3	79,61	78,80	86,50	88,57	84,98
W4	75,60	75,62	83,16	83,30	83,16
Replica 2	Zr grueso	Zr fino	Cromita Urzquen	Cromita Somarriva	Si Paraná
W1	40,44	40,44	40,63	40,69	40,67
W2	45,19	44,19	45,38	44,98	43,70
W3	86,78	86,28	87,12	86,92	85,68
W4	83,38	83,33	83,38	83,65	83,64
Medición	Zr grueso	Zr fino	Cromita Urzquen	Cromita Somarriva	Si Paraná
1	4,82	4,56	4,19	4,50	2,72
2	5,27	4,49	4,05	4,35	2,19
3	3,05	4,06	4,08	3,65	2,65
Promedio	4,38	4,37	4,11	4,17	2,52