



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA

**“EFECTO DE FUNDENTES COMERCIALES SOBRE EL
NÚMERO DE DEFECTOS EN ALEACIONES Al-Si”**

TESIS

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

**PRESENTA
ELSA LÓPEZ DÍAZ**

DIRIGIDA POR

M.C. JOSÉ LUIS CAMACHO MARTÍNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2006.

No. Adq. H72539

No. Título _____

Clas 15

673.3

15.1



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EFECTO DE FUNDENTES COMERCIALES SOBRE EL
NÚMERO DE DEFECTOS EN ALEACIONES Al-Si”**

TESIS

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

PRESENTA

ELSA LÓPEZ DÍAZ

DIRIGIDA POR

M.C. JOSÉ LUIS CAMACHO MARTÍNEZ

SINODALES

M. en C. JOSÉ LUIS CAMACHO MARTÍNEZ _____
DIRECTOR

DR. GERARDO TORRES CAMACHO _____
SINODAL (ASESOR INTERNO)

Q.M. SALVADOR ALVARADO BALLEZA _____
SINODAL

I.Q.M JOSÉ LUIS JACOBO LÓPEZ _____
SINODAL

AGRADECIMIENTOS

A la persona que me dio la vida: mamá, gracias tu apoyo en este camino que hemos construido, porque en cada meta alcanzada y en cada paso que doy siempre estás ahí para sostenerme... te quiero mucho.

Adolfo y Mine sus palabras de aliento son mi inspiración para seguir mirando hacia un mañana casi incierto, porque han sido mis mejores amigos a lo largo de mi paso por este mundo: los adoro. Jessica gracias por escucharme, brindarme tu cariño y consejo cada vez que lo necesito.

David y Adolfo, ustedes son luz que da alegría a nuestras vidas, me enseñan que siempre hay momentos llenos de sonrisas, espero poder darles un poquito de todo lo que ustedes han sembrado desde que los tengo a mi lado.

José sabes que este esfuerzo es compartido y que en todo lo que hago siempre estás presente, gracias por ser más que un amigo y por ser mi compañero de vida...

Gracias al M. en C. José Luis Camacho y al Dr. Gerardo Torres, por haberme apoyado durante la realización de esta tesis, por ser mis asesores y por la amistad, confianza y tiempo en mi depositados.

Al Q.M. Salvador Alvarado, por sus consejos y por compartir sus experiencias a lo largo de mi estancia en la Facultad de Química.

Al Q.M. José Luis Jacobo, por aceptar ser sinodal de este trabajo y por su disponibilidad en la difícil tarea de ser profesor.

Mirna, Eliud, Karla, Lupita estuvieron siempre en el momento y tiempo precisos, gracias porque en ustedes encontré solo buenos deseos para que esto llegará a su fin.

A Paty, Alex, Erika y Víctor por la amistad incondicional que me han brindado este tiempo juntos, por compartir tanto de ustedes que han alimentado mi espíritu...

A mis compañeros de generación y amigos: Gualito, Miguel, Nicea, Adrianita, Esaú, Paty's, Javier, Mimis, Nohemí, Bety Castillo, Beti Morales, Erika Alonso, Tania porque me dieron la oportunidad de conocerlos y de compartir con ustedes este logro.

A los profesores Rafael Pérez, Luis Orlando Arcos, Rafael Frías, Luis Muñoz, Alfonso Pérez y Rafael Morales, por su compromiso para compartir conocimientos a las nuevas generaciones.

A Eleazar y Rive por la paciencia y disposición brindados durante el uso de los equipos de laboratorio en CINESTAV-Unidad Querétaro, donde el Dr. Arturo Juárez estuvo como responsable brindadome su apoyo y amistad.

Gracias, especialmente a todos los compañeros que integran el Área de Investigación del Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ A.C, porque me hicieron sentir que formaba parte de su equipo de trabajo.

Romu y Guillermo saben que sin ustedes no hubiera sido posible imprimir estas líneas, gracias por su paciencia y comprensión, por su amistad y por muchas cosas más...

A todos los que de algún modo se vieron involucrados en este trabajo, a quienes sin quererlo forman parte de mi ser... a quienes aún sin estar aquí han sido un ejemplo vivo para seguir adelante. ¡Gracias Abuel!

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice General	i
Índice de Cuadros	iii
Índice de Figuras	iv
Resumen	
I Introducción	1
II Antecedentes	3
2.1 Generalidades del Aluminio	3
2.2 Obtención del Aluminio	4
2.3 Aleaciones de Aluminio	6
2.3.1 Clasificación de Aleaciones	6
2.4 Fundición de Aluminio	8
2.5 Tratamiento del Metal Líquido	9
2.5.1 Desgasificación	10
2.5.2 Filtración	11
2.5.3 Aplicación de fundentes	12
2.6 Clasificación de fundentes	13
2.7 Características de los fundentes sólidos	17
2.7.1 Morfología de los fundentes sólidos	18
2.7.2 Composición química de fundentes	18
2.8 Métodos de adición de fundentes	21
2.9 Fenómenos Interfaciales Metal/Fundente	22
2.10 Problemas relacionados con los fundentes	24
III Objetivos	26
General	26

Específicos	26
IV Metodología	27
4.1 Materiales y equipo	27
4.2 Métodos	28
4.2.1 Pruebas en planta	28
4.2.2 Análisis metalográfico	29
4.2.3 Caracterización De Fundentes	31
4.2.4 Cuantificación De Defectos	35
V Resultados	39
5.1 Análisis Morfológico	39
5.2 Análisis Químico	43
5.3 Difracción de Rayos X	47
5.4 Análisis Cualitativo de escoria	50
5.5 Cuantificación de defectos	52
VI Discusión	57
VII Conclusiones	71
VIII Bibliografía	72

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1 Clasificación de aleaciones utilizadas en procesos de conformado	7
2 Clasificación de aleaciones destinadas a la fundición	8
3 Composiciones típicas de algunos fundentes	21
4 Porcentaje en peso retenido para cada uno de los fundentes	39
5 Análisis químico semi-cualitativo COVERAL 75	43
6 Análisis químico semi-cualitativo INAFUSA-ITALPURO	44
7 Análisis químico semi-cualitativo MAPRID SF 225.	45
8 Análisis químico semi-cualitativo PROVEEDORA DEL BAJÍO	46
9 Compuestos identificados en los fundentes comerciales	50
10 Características de la reacción y escoria generadas	51
11 Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal	52

INDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
1	Obtención de Aluminio primario	4
2	Obtención de Aluminio secundario	5
3	Variación del punto de fusión con la composición de la mezcla NaCl-KCl (Gruzleski y Closset, 1990)	14
4	Limpieza de la escoria por medio de una reacción exotérmica (Gruzleski y Closset, 1990)	16
5	Variación de la tensión superficial en función de adiciones de fluoruros (Martínez, 2002)	20
6	Remoción de la película de óxido (Yogeshwar, 1993)	23
7	Corte longitudinal de la muestra metálica Al-Si	29
8	Equipo para preparación metalográfica. Cortesía CINVESTAV-Qro	30
9	Estereoscopio para muestras sólidas. Cortesía CINVESTAV - Qro	32
10	Microscopio Electrónico de barrido (SEM). Cortesía CINVESTAV- Qro	33
11	Prensa hidráulica para la preparación de pastillas	34
12	Zona de la muestra metálica para el análisis de imágenes	37
13	Escala utilizada para el análisis cuantitativo de defectos	37
14	Rutina establecida para el análisis cuantitativo de defectos	40
15	Distribución del tamaño de partícula de fundentes comerciales	40
16	Morfología del fundente COVERAL 75	41
17	Morfología del fundente INAFUSA ITALPURO	41
18	Morfología del fundente MAPRID SF 225	42
19	Morfología del fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO	42
20	Composición química para diferentes tamaños de tamiz COVERAL 75	44
21	Composición química para diferentes tamaños de tamiz INAFUSA ITALPURO	45
22	Composición química para diferentes tamaños de tamiz MAPRID SF 225	46
23	Composición química para diferentes tamaños de tamiz PROVEEDORA DEL BAJÍO	47
24	Difractograma del fundente COVERAL 75	48
25	Difractograma del fundente INAFUSA ITALPURO	48
26	Difractograma del fundente MAPRID SF 22	51

27	Difractograma del fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO	49
28	Escoria obtenida después del tratamiento de limpieza	51
29	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 1A	54
30	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 2A	54
31	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal	55
32	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 2B	55
33	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 3B	56
34	Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 3A*	56

RESUMEN

Dentro del proceso de fundición de aleaciones de Aluminio, comúnmente se presentan problemas relacionados con la calidad del metal, la mayoría de éstos provenientes de un proceso de refinación deficiente. Las operaciones de refinación consisten básicamente en filtración, desgasificación y aplicación de fundentes, ésta última es una práctica semi-empírica, por lo que para determinar el fundente más adecuado es necesario realizar pruebas en laboratorio o directamente en planta con la finalidad de evaluarlos.

En este proyecto de tesis se caracterizaron y se probaron cuatro fundentes comerciales: COVERAL 75, INAFUSA, MAPRID SF 225 y PROVEEDORA DEL BAJÍO. La evaluación de los fundentes se realizó bajo una serie experimental propuesta por la planta, siguiendo las condiciones de operación normales (transferencia del metal al horno de retención, filtración, desgasificación, aplicación de fundentes, temperatura del metal y tiempo de reacción) se valoraron aspectos como la reactividad del fundente, generación de humos, desprendimiento de olores, cantidad de escoria producida y características de la misma. Para el análisis cuantitativo de defectos se tomaron muestras de metal antes y después del tratamiento, se prepararon metalográficamente y se obtuvieron micrografías en el microscopio óptico que se analizaron con una técnica de análisis de imágenes.

Para la caracterización de los fundentes se utilizaron técnicas complementarias entre sí tales como: análisis granulométrico, estereoscopia, microscopia electrónica de barrido (SEM/EDS) y Difracción de Rayos X.

La distribución del tamaño de partícula fue muy heterogénea en los cuatro fundentes, la morfología es diferente de un fundente a otro. Para un fundente, la cantidad relativa de las sales que lo constituyen, en ocasiones varía mucho con el tamaño de grano y no siempre se observan los mismos componentes.

Las composiciones químicas de todos los fundentes son muy diferentes, pero están basadas en los compuestos que normalmente se utilizan para la formulación de los mismos; cloruros de sodio y potasio, sulfatos, fluoruros y carbonatos.

El fundente INAFUSA, genera humos muy irritantes y produce escoria abundante y húmeda. Los otros fundentes producen escoria seca y no generan humos, especialmente el MAPRID SF 225. El fundente de PROVEEDORA DEL BAJÍO, reacciona violentamente y produce burbujeo intenso. El MAPRID SF 225 de acuerdo al análisis cuantitativo de defectos, es el que disminuyó el número de defectos presentes en la muestra después de su aplicación, mientras que el resto de los fundentes no mostró un efecto considerable.

I. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones Aluminio-Silicio son ampliamente utilizadas en la industria automotriz por su alto valor en la relación resistencia/densidad, además de reducir el peso del vehículo e incrementar la eficiencia del combustible poseen propiedades mecánicas deseables como la ductilidad y tenacidad. Lo anterior se atribuye a un tratamiento eficiente del metal líquido que atiende los requerimientos de calidad que hoy en día son cada vez más rigurosos.

Dentro de la etapa de limpieza del metal se llevan a cabo una serie de procedimientos que comprenden: *filtración* para minimizar la cantidad de inclusiones, óxidos y partículas exógenas contenidas en el metal líquido; *aplicación de fundentes* para eliminar elementos no deseables, proteger al metal de oxidación severa y facilitar la separación de óxidos e inclusiones sólidas en la parte superior del metal líquido, y *desgasificación* para eliminar el gas hidrógeno disuelto en el metal y reducir de esta manera la porosidad del metal solidificado.

El adicionar fundentes representa darle un tratamiento al Aluminio empleando compuestos químicos, usualmente inorgánicos que tienen varias funciones tales como desgasificar, limpiar, modificar y alear. La mayoría de los fundentes están basados en una mezcla de KCl-NaCl, sin embargo existen mezclas más complejas con pequeñas adiciones de fluoruros, sulfatos, carbonatos y nitratos.

Los fundentes deben emplearse a temperaturas recomendadas por el proveedor para asegurar su efectividad, también evalúa aspectos técnicos tales como la concentración de óxidos e impurezas en el metal, los fenómenos interfaciales que se llevan a cabo, así como el método de adición utilizado en la planta. No menos trascendentes resultan los factores económicos y ambientales, que en una industria resultan prioritarios.

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se buscó obtener información acerca de la composición química, morfología y granulometría de cuatro fundentes comerciales probados en planta, lo cual se consiguió utilizando técnicas complementarias entre sí y haciendo uso de la bibliografía disponible acerca de las sales empleadas en la elaboración de los mismos.

Para conocer el efecto de los cuatro fundentes comerciales probados en seis hornos de retención en planta, se tomaron muestras metálicas antes y después de haberse realizado el tratamiento de limpieza, éstas fueron preparadas metalográficamente para su observación en el microscopio óptico cuyas microfotografías fueron utilizadas en el posteriormente en el analizador de imágenes en donde se obtuvieron cuantitativamente los defectos presentes en el metal.

Se consideraron defectos todos aquellos relacionados con la presencia de inclusiones, hidrógeno disuelto y contracciones. No se hizo una distinción entre los tipos de defectos puesto que en ocasiones las causas que los originan están vinculadas, la porosidad por ejemplo, se presenta por el Hidrógeno disuelto, la contracción durante la solidificación y la presencia de inclusiones, lo que hace difícil determinar el origen de este problema.

II. ANTECEDENTES

En el siglo XX las aplicaciones del Aluminio eran de uso ornamental y decorativo; fue después de la Segunda Guerra Mundial que se desarrollaron nuevas aleaciones y procesos de fundición, de esta manera se extenderían las aplicaciones comerciales e industriales. Hoy en día se encuentra en el segundo lugar en producción después del acero, lo que lo convierte en el más importante de los metales no ferrosos.

2.1 GENERALIDADES DEL ALUMINIO

El Aluminio es un material versátil, posee excelente conductividad térmica y eléctrica, su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre, es maleable, dúctil, apto para el conformado mecánico y la fundición. En estado puro es blando y frágil, pero sus aleaciones con pequeñas adiciones de cobre, manganeso, silicio, magnesio y otros elementos que en su totalidad constituyen el 10 % de la composición nominal, presentan una gran variedad de características adecuadas a las más diversas aplicaciones (Metals Handbook, 1998). Una de las propiedades más importantes del Aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajado, se puede fundir mediante todos los métodos conocidos, laminar a cualquier espesor deseado, forjar, rolar y extruir a casi todas las formas de perfil disponibles (Degamo y col., 2002).

El Aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre sin embargo su proceso de obtención requiere altos consumos de energía mientras que en los procesos de recuperación de chatarra el consumo energético se reduce hasta un 95%, esto, aunado a los problemas de disposición de desechos y a la excelente reciclabilidad del Aluminio, han propiciado el uso creciente de chatarra en las fundiciones de todo el mundo.

2.2 OBTENCIÓN DEL ALUMINIO

El Aluminio primario se obtiene en dos etapas, en la primera se produce hidrato de alúmina que se filtra, lava y calcina para convertirse en alúmina; en la segunda etapa se produce el Aluminio metálico por reducción electrolítica de la alúmina pura en un baño de criolita fundida. Se puede resumir la serie de operaciones en la producción primaria en el siguiente diagrama.

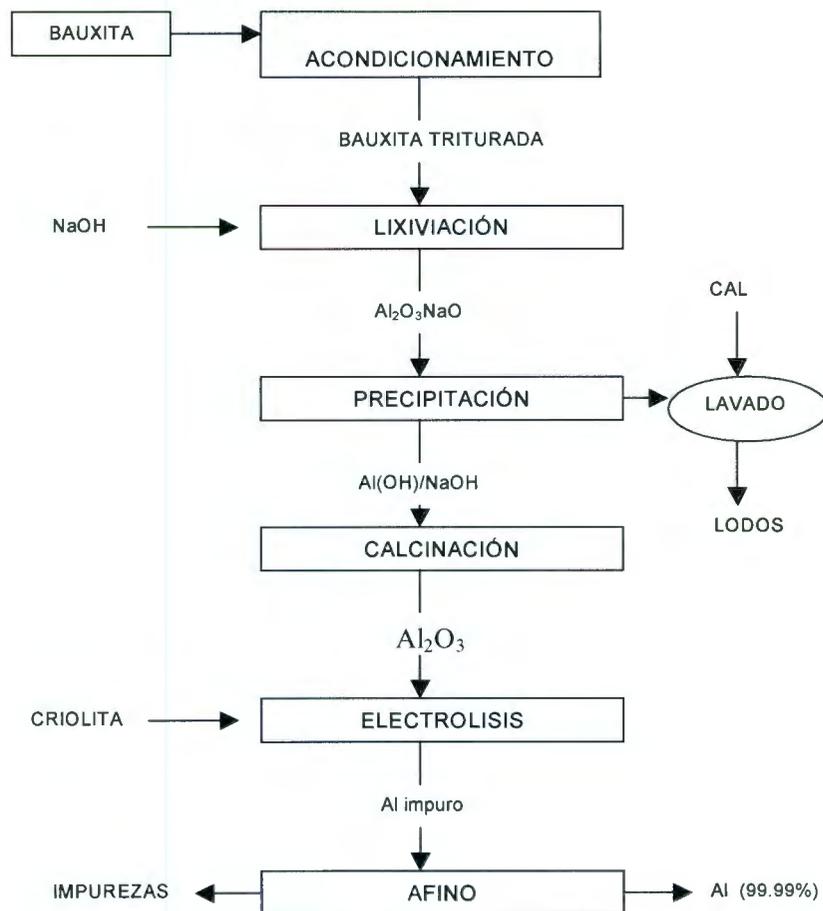


Figura 1. Obtención de Aluminio primario.

Dentro de la producción secundaria del Aluminio destacan dos procesos que se diferencian por el tipo de horno empleado (rotatorio y de retención) esta distinción radica en el empleo o no de sales fundentes para la fusión de las chatarras. Mediante el uso de sales se obtiene mayor grado de recuperación del metal, ya que se reduce la oxidación durante la fusión (Metals Handbook, 1998).

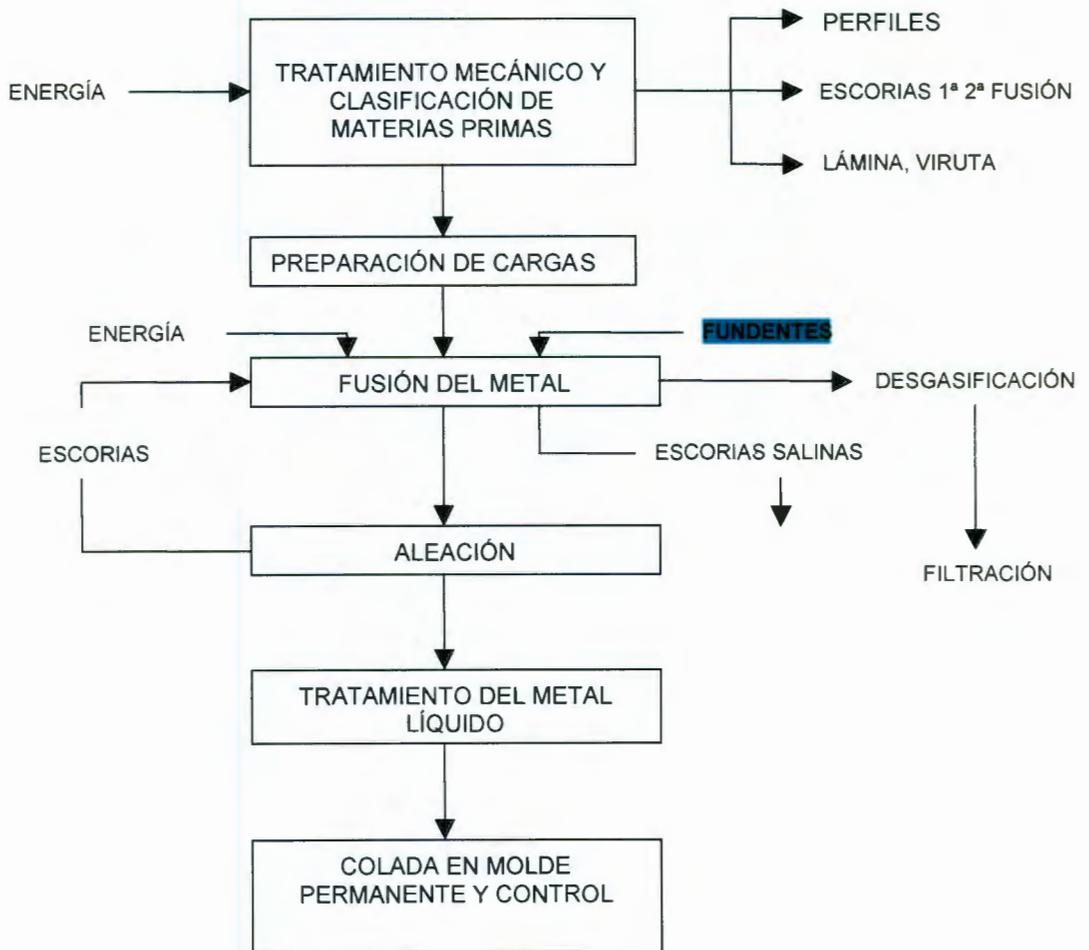


Figura 1. Obtención de Aluminio secundario.

2.3 ALEACIONES DE ALUMINIO

Algunas aleaciones de Aluminio están diseñadas específicamente para la industria de la fundición, y existen otras que se destinan para la elaboración de productos conformados. Las características de las aleaciones son: bajo punto de fusión y elevada fluidez que permite el fácil llenado de secciones delgadas. Las aleaciones Al-Si conforman el 85-90% del total de las piezas fundidas de Aluminio, contienen suficiente Silicio para llevar a cabo una reacción eutéctica, ofrecen excelente moldeabilidad, resistencia a la corrosión; pueden soldarse y maquinarse con facilidad, se caracterizan por tener un bajo punto de fusión, elevada resistencia y fluidez. Se utilizan ampliamente en la industria automotriz especialmente por su alto valor en la relación resistencia/peso, constituyen el componente principal de aviones y cohetes, en donde el peso es un factor crítico (Gruzleski y Closset, 1990).

Recientemente se han desarrollado nuevas aleaciones de Aluminio que incluyen:

- Mejora en aleaciones conocidas.
- Aleaciones de Aluminio-Litio.
- Aleaciones fabricadas por métodos pulvimetalúrgicos.
- Aleaciones reforzadas con fibras o partículas cerámicas (The Materials Selector, 1997).

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE ALEACIONES

Las aleaciones de Aluminio pueden dividirse en dos grandes grupos basándose en el método de fabricación: aleaciones que se utilizan en productos conformados y aleaciones destinadas a la fundición.

Las primeras se caracterizan por tener atractivas características de formado tales como baja resistencia a la deformación permanente, elevada ductilidad, resistencia a la fractura y endurecimiento por deformación.

Las aleaciones de fundición poseen un bajo punto de fusión, elevada fluidez y microestructuras que al solidificar brindan buenas propiedades mecánicas. Las aleaciones utilizadas en procesos de conformado se dividen en dos tipos: las que se trabajan en frío y las que son endurecibles por solución sólida. Para su clasificación se utilizan cuatro dígitos, el primero indica al elemento o elementos de aleación, el segundo usualmente es cero. Los números distintos de cero se utilizan para indicar la modificación de la aleación. Los últimos dos dígitos indican el grupo al que pertenece la aleación. Por ejemplo el número 2024 significa que es una aleación 24 dentro del sistema aluminio-cobre, en el siguiente cuadro se muestra la clasificación de este tipo de aleaciones.

Cuadro. 1 Clasificación de aleaciones utilizadas en procesos de conformado.

ELEMENTO ALEANTE EN MAYOR PROPORCIÓN.	CLASIFICACIÓN
Aluminio	1xxx
Cobre	2xxx
Silicio con Cobre o Magnesio	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Zinc	6xxx
Estaño	7xxx
Otros	8xxx

Para las aleaciones de fundición, el sistema de clasificación es similar al anterior, se tiene cuatro dígitos en donde el primero indica el grupo al cual pertenece la aleación, el segundo y tercer dígito identifican la aleación o la pureza del Aluminio, y el último dígito separado por un punto indica la forma del producto (fundición o lingote). Ejemplos de la clasificación de estas aleaciones se observan en el cuadro 2; en algunos casos se coloca una letra después de la designación numérica lo que indica una modificación a la aleación original (Degamo y col., 2002).

Cuadro. 2 Clasificación de aleaciones destinadas a la fundición.

ELEMENTO ALEANTE EN MAYOR PROPORCIÓN.	CLASIFICACIÓN
Aluminio	1xx.x
Cobre	2xx.x
Silicio con Cobre o Magnesio	3xx.x
Silicio	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Zinc	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otros	9xx.x

2.4 FUNDICIÓN DE ALUMINIO

El proceso de fundición de Aluminio incluye varias etapas desde que se obtiene la materia prima hasta tener la pieza con las características finales. Los pasos más importantes son la recepción del lingote, la fusión y tratamiento del metal, que se refiere a la desgasificación, limpieza, refinación, modificación y escoriado; una vez terminado el paso anterior se prepara el molde, en donde posteriormente es vaciado el metal.

Las piezas de fundidas de Aluminio se producen generalmente por más de uno de los siguientes procesos: molde permanente, moldeo en arena y fundición en molde metálico. Como regla general las aleaciones susceptibles a un tratamiento térmico son aquellas que se obtienen por los dos primeros métodos mencionados y las que son producto de la fundición en molde metálico generalmente no se someten a tratamiento térmico, a menos que hayan sido elaboradas para un propósito específico.

Debido a que existen diversos factores que influyen en la selección de un proceso de fundición como la factibilidad, calidad y costo, la decisión de utilizar moldes permanentes está relacionada con el diseño, dimensión y cantidad de piezas a fundir. Las ventajas que ofrece este proceso son la reducción de porosidad, un acabado superficial y dimensional más fino, en comparación con el moldeo en arena; una de las desventajas es que las piezas no deben pesar más de 10 kg, y si se requiere una geometría compleja de tolerancias críticas se recomienda utilizar un proceso de fundición con molde metálico (Gruzleski y Closset, 1990).

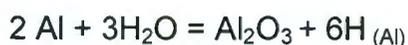
2.5 TRATAMIENTO DEL METAL LÍQUIDO

Se considera que la diferencia entre un metal limpio y un metal sucio radica en la cantidad de inclusiones, así como en el contenido de hidrógeno disuelto. En condiciones ideales de fusión y teniendo una carga libre de contaminantes, homogénea en composición química, el fundidor no llevaría a cabo operaciones de limpieza y desgasificado en el metal. Debido a los problemas que se presentan en esta etapa del proceso de fundición se han desarrollado productos y equipos para eliminar impurezas e hidrógeno (Manzano, 1997).

Anteriormente los fundidores se habían enfocado solamente al baño de metal fundido y al vaciado en moldes permanentes, sin embargo desde 1921 el Dr. Pacz descubrió que las propiedades mecánicas de ciertas aleaciones de Al-Si podían aumentar cuando el metal fundido era tratado con un fundente de NaF.

El tratamiento del metal en estado líquido fue el comienzo de lo que en la actualidad constituye el procesamiento del metal fundido, en donde se aplican una serie de tratamientos físicos y químicos al metal para mantener la calidad que en la industria se requiere (Aluminum Permanent Mold Handbook, 2001).

Es sabido que el Aluminio líquido tiende a absorber gas hidrógeno, además de oxidarse con facilidad. Se ha encontrado que las aleaciones de Aluminio al estar en contacto con la humedad de la atmósfera forman películas continuas de Al_2O_3 , sobre la superficie del baño, de acuerdo con las siguientes reacciones.



La formación de películas de Al_2O_3 , es una característica inherente en el proceso de fusión y protege al baño de oxidaciones subsecuentes. Sin embargo la superficie del baño está sujeta a un constante movimiento consecuencia de las prácticas usuales de fusión: 1) carga, 2) descorificado, 3) desgasificado, 4) adición de fundente, 5) transferencia del metal y 6) vaciado, lo anterior provoca la ruptura de la película, aumentando de esta manera su grosor y encapsulando aluminio líquido sin oxidar, dando como resultado una escoria húmeda con un contenido de Aluminio del orden del 60-80 %.

Por lo tanto la escoria es el factor que mayor influencia tiene en la pérdida del metal durante el proceso de fusión, no obstante este problema se puede resolver aumentando la eficiencia del horno y mejorando las prácticas de fundición.

2.5.1 DESGASIFICACIÓN

La precipitación de hidrógeno durante el proceso de solidificación ha sido perfectamente identificada como la causa principal de la formación de porosidad debido a gas en el Aluminio y sus aleaciones.

Por lo anterior, el proceso de fusión generalmente debe involucrar prácticas que prevengan la absorción de gas y la eliminación del hidrógeno disuelto ya que de esta manera se logran obtener baños metálicos “libres de gas” (Manzano, 1997).

Existen diversos métodos para llevar a cabo la desgasificación entre los que destacan el tratamiento en vacío, que se puede realizar con o sin un gas de purga; el tratamiento con un gas de arrastre, éste puede ser neutro, químicamente activo o una mezcla de ambos. Estas técnicas tienen el mismo principio: generar pequeñas burbujas de gas inerte y mediante el uso de boquillas rotatorias producir una turbulencia que permita la difusión de hidrógeno hacia la burbuja que conforme asciende en el metal líquido se enriquece de hidrógeno hasta que explota en la superficie del baño.

Para que el proceso de desgasificación sea eficiente es necesario generar una cantidad considerable de burbujas que cubran un mínimo de tiempo de permanencia en el baño metálico (Gruzleski y Closset, 1990).

2.5.2 FILTRACIÓN

Para asegurar la calidad del metal se requiere remover inclusiones, eliminar elementos no deseables así como el gas disuelto. La filtración se lleva a cabo antes del que el metal sea vaciado, su objetivo principal es el de minimizar la cantidad de impurezas que el metal fundido contenga; lo anterior mejora la fluidez hasta un 30% y produce piezas con propiedades mecánicas deseables, principalmente las tensiles.

La utilización de filtros es una buena alternativa para la eliminación de inclusiones, existen los de fibra de vidrio y de espuma cerámica, estos últimos proveen una red con huecos de gran área superficial, evitando el paso de partículas sólidas (Frisvold y col. 1992). Entre los filtros más utilizados en el ámbito industrial destaca por su buen funcionamiento el filtro de paleta que está constituido por un elemento filtrante fabricado con una espuma cerámica cuyo alto grado de porosidad evita que las partículas de un tamaño $< 20 \mu\text{m}$ estén contenidas en el metal.

2.5.3 APLICACIÓN DE FUNDENTES

Un fundente es una sustancia empleada en el refinamiento de metales líquidos, su principal función es remover elementos indeseables, prevenir la formación de óxidos, evitar la vaporización prematura de elementos activos y facilitar la remoción de inclusiones (Aluminum Permanent Mold Handbook, 2001). En general los fundentes pueden agruparse en dos clases: gaseosos o sólidos. Los primeros son mezclas de un gas inerte y de un gas químicamente activo que es inyectado dentro del baño. Los fundentes sólidos son mezclas de sales en forma granular y son los que comúnmente se utilizan en la industria. Se caracterizan por ser activos o pasivos, y protegen la superficie del aluminio fundido.

La calidad del metal fundido está relacionada con una composición química adecuada de la aleación, libre de elementos contaminantes, con un nivel mínimo de inclusiones y gas disuelto. No existe un tratamiento universal que provea calidad al metal, cada uno se aplica para controlar un parámetro distinto; por lo que en muchas ocasiones el operador recurre a varios procedimientos durante la etapa de limpieza del metal.

Las finas partículas de óxido tienden a mantenerse suspendidas, flotando en la superficie, debido a que su densidad es parecida a la del Aluminio; otros óxidos que se separan del metal fundido atrapan cantidades importantes de Aluminio metálico aumentando la cantidad de escoria húmeda. Para estos inconvenientes existen fundentes que tienen propósitos particulares como evitar la oxidación, remover inclusiones, recuperar el metal líquido de la escoria y desgasificar.

La eficiencia en la limpieza del metal fundido se caracteriza por el uso correcto de los fundentes; algunos aceleran el proceso de separación de inclusiones e impurezas, debido a que "humectan" la superficie de las partículas con las que tiene contacto, aumentando el efecto de la tensión superficial del Aluminio que permite repeler óxidos.

El efecto del fundente sobre el metal líquido depende de la composición química del primero, su morfología, cantidad empleada, temperatura del metal fundido, tiempo de contacto y técnica de agitación, entre otros aspectos importantes (Crepeau, 1995).

Distintas combinaciones y proporciones de sales en los fundentes promueven diversas propiedades tales como densidad, fluidez, mojabilidad y reactividad. El efecto (actividad o reactividad) de cualquier sal individual cuando está en contacto con aleaciones de Aluminio fundido, a diferentes temperaturas del metal, no necesariamente es el mismo cuando se mezcla con otras sales, pero puede proporcionar información para un mejor entendimiento, evaluación y desarrollo de nuevas formulaciones de fundentes (Utigard, 2001). El mecanismo de cómo trabajan los fundentes ha sido atribuido a la termodinámica de las reacciones químicas y efectos de tensión superficial entre Inclusiones- fundente, inclusiones-metal fundido y metal fundido-fundente.

2.6. CLASIFICACIÓN DE FUNDENTES

Fundentes de cobertura: forman una delgada capa en la superficie del metal fundido para prevenir la oxidación y reducir así la cantidad de escoria en la superficie del baño; contienen cloruros álcalis en varias proporciones y algunos tienen como ingredientes principales fluoruros. Aíslan el metal líquido de la atmósfera y se caracterizan por no adicionar componentes a la aleación.

Los fundentes de cobertura se formulan a partir de una mezcla de NaCl y KCl y se adicionan otras sales. El punto de fusión suele ser el criterio para determinar su composición química. Los fundentes que son líquidos a la temperatura de utilización son los más recomendables; en la figura 3 se muestra la curva de liquidus del sistema NaCl-KCl y es evidente que el punto más bajo de fusión se presenta con las cantidades equimolares de NaCl y KCl.

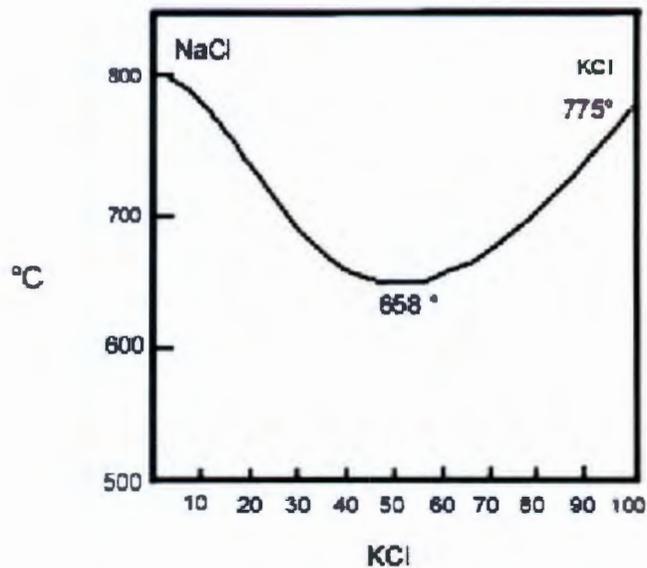


Figura 2. Variación del punto de fusión con la composición de la mezcla NaCl-KCl (Gruzleski y Closset, 1990).

Este tipo de fundentes no realizan una limpieza eficiente del metal debido a la poca capacidad de mojabilidad que poseen, además no contribuyen a la coalescencia de las impurezas no metálicas suspendidas en la superficie del baño.

Fundentes desgasificantes: se utilizan en forma de tabletas y son adicionados al baño metálico para sufrir una descomposición térmica están elaborados basándose en cloruros; uno de los fundentes más comunes es el hexacloroetano, sin embargo su uso se ha reducido debido estrictas regulaciones ambientales. Los fundentes desgasificantes en forma de polvo pueden ser introducidos en el baño metálico usando un gas de inerte que puede ser argón o nitrógeno que se hace pasar a través de una lanza metálica haciendo posible la inyección del fundente hacia el fondo del crisol.

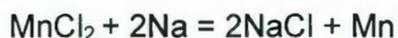
Fundentes desescorificantes: este tipo de fundentes se aplica antes de vaciar el horno para prevenir pérdidas excesivas de metal; están diseñados para reaccionar con el Al_2O_3 presente en la escoria y recuperar el Aluminio atrapado. Comúnmente contienen compuestos capaces de reaccionar exotérmicamente produciendo un aumento de la temperatura e incrementando la fluidez local.

Fundentes de limpieza: usualmente tienen altos contenidos de sales álcalis como los fluoruros que facilitan la separación del metal fundido. Están elaborados para remover del metal partículas como la alúmina y óxidos de aluminio. Uno de los compuestos más importantes es el fluorosilicato de sodio Na_2SiF_6 , que permite la remoción de óxidos, por acción mecánica o química entre los ingredientes del fundente y el elemento o compuesto que se desea eliminar, además remueve los óxidos de Aluminio produciéndose sílica como se muestra en la siguiente reacción:



Contienen pequeñas cantidades de compuestos oxidantes tales como los sulfatos y nitratos, promoviendo reacciones exotérmicas que permiten la coalescencia de las gotas de Aluminio líquido atrapado en la escoria como se observa en la figura 4.

Para algunos casos especiales, cuando se desean remover ciertos elementos, se utiliza un fundente a base de una mezcla de NaCl-KCl y se adiciona otro compuesto reactivo, como es el caso del MnCl_2 que se utiliza para eliminar al sodio por medio de la siguiente reacción:



Para eliminar al calcio puede adicionarse AlF_3 como se muestra en la reacción:



Por lo anterior la acción de limpieza del fundente requiere una reacción ya sea mecánica o física, entre los ingredientes activos y elementos o compuestos que desean eliminarse.

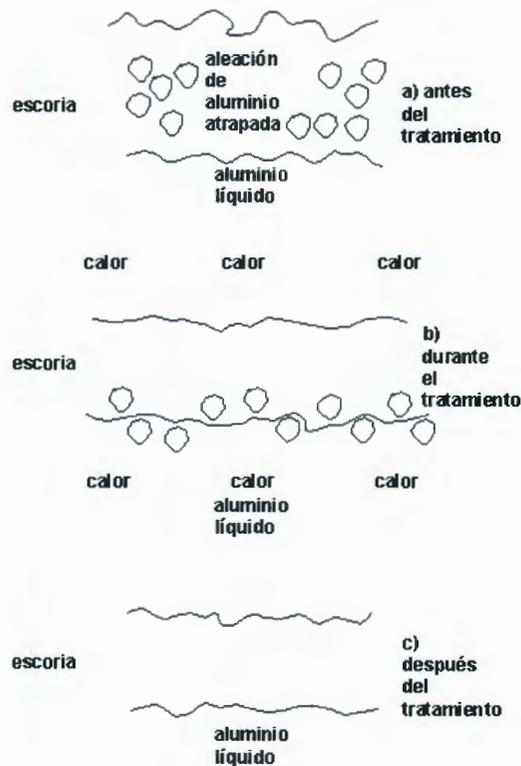


Figura 3. Limpieza de la escoria por medio de una reacción exotérmica (Gruzleski y Closset, 1990).

Fundentes refinadores: la mayoría de estos fundentes contienen cloruros, que reaccionarán con el magnesio, calcio, sodio y potasio disueltos en el aluminio líquido para formar partículas de cloro insolubles, que flotan en la superficie para ser tratadas posteriormente con un fundente de cobertura.

Fundentes para limpieza de hornos: en los hornos utilizados en la fundición de Aluminio se forma una capa de residuos de óxido, por lo que se requiere su eliminación con un fundente que genere reacciones exotérmicas en donde el calor permita que los residuos de metal atrapado regresen al fondo del horno, esto también se puede realizar utilizando herramientas que remuevan fácilmente estos residuos.

2.7. CARACTERISTICAS DE LOS FUNDENTES SÓLIDOS

Los componentes de los fundentes sólidos pueden clasificarse en cuatro grupos, basándose en la influencia que tienen sobre la mezcla: fluoruros, cloruros, compuestos oxidantes y solventes de óxidos de Aluminio.

Las sales son empleadas en los fundentes debido a las siguientes características:

- Bajo costo.
- Fácil manejo.
- Facilidad para combinarse con otros ingredientes.
- Densidad menor a la del Aluminio.
- Bajo punto de fusión.
- Capacidad para absorber óxidos.
- Habilidad para cubrir la superficie del baño.

Los constituyentes de los fundentes brindan fluidez al metal, como es el caso de las mezclas de NaCl-KCl, se descomponen, nitratos, carbonatos y sulfatos para generar aniones capaces de reaccionar con las impurezas del metal fundido.

Otro de sus propósitos es del crear impurezas de óxidos metálicos u otros compuestos con densidades diferentes a los del metal base para facilitar su separación física (Friesen y Utigard, 1997).

La mayoría de los compuestos son higroscópicos por lo que deben almacenarse en un lugar seco; si no se tiene precaución en eliminar la humedad existe la posibilidad de que ocurra una explosión además de introducir hidrógeno al metal fundido. Las herramientas empleadas para la adición de fundentes deben mantenerse limpias, secas y precalentadas antes de su uso para evitar emisiones del metal líquido (ASM, 1998).

Algunos de los factores fisicoquímicos deseables en las sales que constituyen a los fundentes son:

- Punto de fusión menor a 660 °C.
- Densidad menor que 2.3 g/cm³.
- Bajos valores de presión vapor.
- No higroscópico.
- Inerte a la pared del horno.
- No tóxico.

2.7.1 MORFOLOGÍA DE LOS FUNDENTES SÓLIDOS

Para la formulación de los fundentes se requiere que los ingredientes cumplan con requerimientos de calidad tales como la pureza y homogeneidad en el tamaño de grano, que aseguran la consistencia de los productos.

Un fundente granular puede o no tener la misma formulación del fundente en polvo, sin embargo debido a su morfología ofrece otras ventajas operacionales sobre los fundentes en polvo, como la reducción de olor y emisión de humos, facilitando el trabajo cerca del horno durante las operaciones de fusión. Los fundentes granulares tienen una mejor consistencia en la composición química de grano a grano además no hay segregación durante su manejo o transportación.

2.7.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE FUNDENTES

La composición específica de los reactivos utilizados como fundentes depende del propósito específico de éste. Pero en general se puede decir que los fundentes están basados en el sistema binario NaCl-KCl, con aproximadamente iguales cantidades molares de cada constituyente. Para aleaciones con contenidos de magnesio mayores de 2% en peso no se utilizan sales con sodio, ya que este reemplaza al magnesio deteriorándose las propiedades mecánicas de la aleación.

De las casi 150 composiciones propuestas para fundentes utilizados en la metalurgia del Aluminio, la mayoría está basada en la mezcla equimolar NaCl-KCl. A esta mezcla se le adicionan otras sales para aumentar la efectividad del fundente o para un propósito especial. Dentro de estos aditivos se encuentran: CaF_2 , NaF, AlF_3 , AlCl_3 , NaAlCl_4 , KAlCl_4 , K_3AlF_6 . Las funciones principales de los fundentes son proteger al metal expuesto a la atmósfera de una oxidación subsiguiente, promover la coalescencia de gotas metálicas y disolver o eliminar material contenido en el metal como impureza (Friesen y Utigard, 1997).

Los cloruros se utilizan para brindarle fluidez al fundente, no tienen efectos considerables sobre la tensión superficial comparados con los fluoruros y no reaccionan con el Aluminio fundido.

Los fluoruros tienen una ligera solubilidad de óxidos, lo cual facilita la penetración en películas de óxidos que contienen Aluminio metálico. Esto permite la humectación del metal líquido que favorece a la separación de inclusiones del metal, se consideran los compuestos más efectivos que se emplean en los fundentes para la recuperación del metal. Debido a regulaciones ambientales, el contenido de estas sales no debe exceder el 20% en peso.

En la figura 5 se muestra el efecto de la adición de fluoruros alcalinos sobre la tensión superficial. Se observa que la tensión superficial disminuye hasta 50% lo que afecta la recuperación del Aluminio, pues aumenta la capacidad del fundente para liberar al metal de la capa de óxidos. El orden de la efectividad de los fluoruros es: Criolita (Na_3AlF_6) > LiF > NaF > KF.

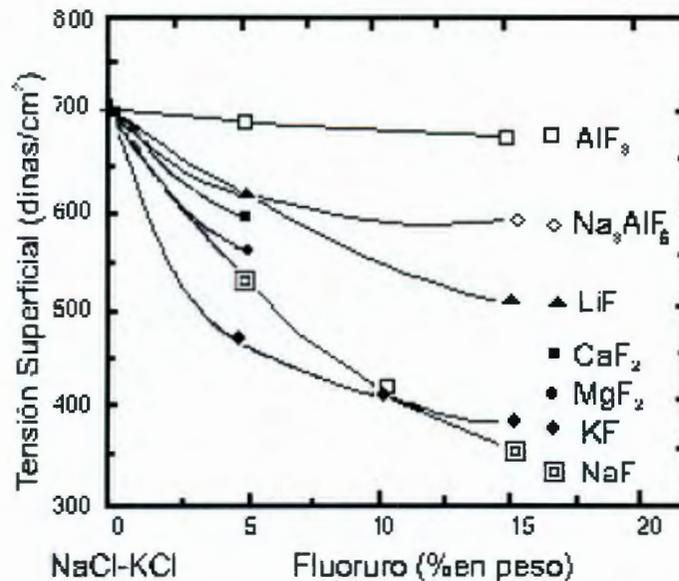
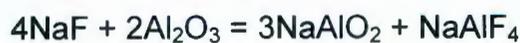


Figura 4. Variación de la tensión superficial en función de adiciones de fluoruros (Martínez, 2002).

Los compuestos oxidantes se emplean para promover las reacciones exotérmicas que facilitan la coalescencia de Aluminio atrapado en la escoria aumentando así el grado de recuperación del metal (Flores y Valdés, 1997). En el cuadro siguiente se tienen algunas composiciones químicas de fundentes comerciales.

La remoción de óxidos en Aluminio líquido por medio de haluros se basa en el sistema NaF-AIF₃-Al₂O₃, y se ha observado que la solubilidad del óxido de Aluminio aumenta con el contenido de NaF, la eliminación del óxido de Aluminio se lleva a cabo de acuerdo a la siguiente reacción:



Cuadro. 3 Composiciones típicas de algunos fundentes comerciales (Gruzleski y Closset, 1990).

COMPONENTE	PORCENTAJE EN PESO APROXIMADO DE CADA COMPONENTE EN FUNDENTES COMERCIALES								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
NaCl	10-50	85	20-40	35	24	4	30		53
KCl	30-60		26-30		34	13	40	20	16
NaF	10-30				4	13			
Na₃AlF₆ (criolita)			20	50		13			20
CaF₂		15							10
KF			2				15		
CaCl₂						60			
MgCl₂					38			60	
Na₂CO₃				15			15		
MgF₂								20	

2.8 MÉTODOS DE ADICIÓN DE FUNDENTES

El uso de dispositivos que adicionan fundentes al baño, se ha desarrollado en los últimos años debido a la importancia que posee esta etapa en la limpieza del aluminio, en donde hasta la fecha se realiza de manera manual, sin tener una agitación homogénea, tiempo de permanencia y condiciones constantes.

Uno de los métodos es la inyección del fundente con la ayuda de una lanza cerámica, en donde a diferencia de la práctica usual se reduce el consumo de fundente, el nivel de inclusiones e hidrógeno disuelto. El contenido de aluminio metálico en la escoria es menor y la emisión de humos también decrece, lo cual reduce los riesgos para el del operador que realiza la adición.

Existen muchos fundentes disponibles que pueden adicionarse por medio de este método, y la ventaja que ofrece es que en una sola operación es posible limpiar, desgasificar, modificar y refinar el grano.

En la siguiente figura se esquematiza cómo se adiciona el fundente a una cámara de mezclado en donde se combina con un gas de arrastre que puede ser Nitrógeno o Argón, esta mezcla se inyecta en el baño metálico por medio de una lanza cerámica, teniendo como resultado reacciones químicas y mecánicas con mayor eficiencia.

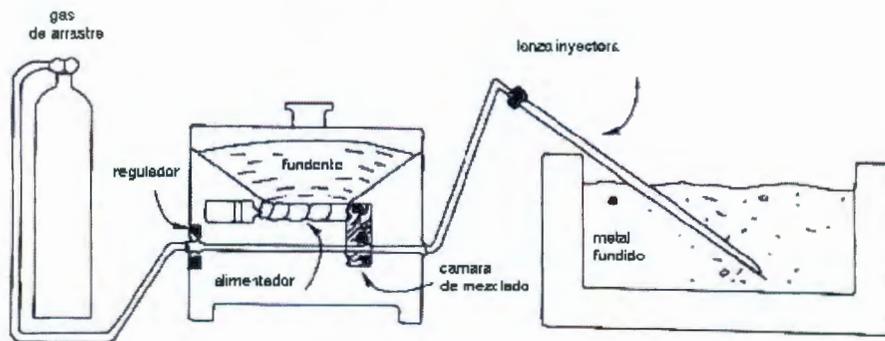


Figura 5. Inyección de fundentes en un baño metálico (King, 1995).

El principio de la inyección de fundentes se basa en tener un tamaño de grano controlado, un material distribuido y mezclado con el gas de arrastre. Ofrece costos efectivos, seguridad ambiental, así como una alternativa en el tratamiento de las fundiciones de aluminio y sus aleaciones.

2.9. FENÓMENOS INTERFACIALES METAL/FUNDENTE

Las propiedades interfaciales del aluminio líquido en contacto con los fundentes, juegan un papel muy importante en el fenómeno de coalescencia, en donde la película de óxido deber estar separada parcial o totalmente. Aunque el óxido de aluminio puede ser disuelto por fluoruros como la criolita, la presencia de NaCl en los fundentes disminuye su solubilidad a niveles insignificantes.

El tiempo de contacto entre el fundente y el Aluminio líquido es de gran importancia, ya que la separación de la capa de óxido está en función de este parámetro. Van Linden y Steward encontraron que la mayor recuperación de Aluminio se obtiene cuando el tiempo de contacto es superior a los 10 minutos, usando agitación constante ya que esto permite un contacto íntimo entre las partículas del fundente y el metal líquido.

Las propiedades interfaciales de las gotas de Aluminio en contacto con los fundentes, tienen un papel muy importante en la determinación de su coalescencia que se lleva a cabo separando parcial o completamente la película de óxido. Generalmente la separación de la capa de óxido se atribuye al uso de fundentes, sin embargo el mecanismo de remoción aun es confuso y las investigaciones al respecto se basan en los fenómenos interfaciales.

Una teoría expuesta por Sully y col. (Yogeshwar, 1993) sostiene que la remoción de la película de óxido se debe a las fuerzas de tensión superficial entre ésta y el metal. De acuerdo a lo anterior para que la película de óxido sea removida, la suma de las tensiones interfaciales Al/fundente y Al_2O_3 /fundente, debe ser menor que la tensión interfacial entre el Al y Al_2O_3 , como se observa en la siguiente figura:

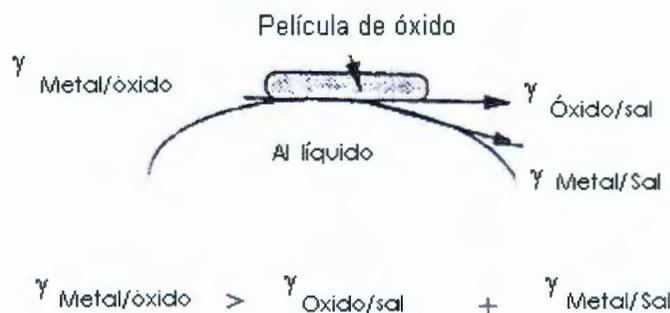


Figura 6. Remoción de la película de óxido (Yogeshwar, 1993).

2.10 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS FUNDENTES.

Inclusiones: la acción de limpieza que lleva a cabo un fundente está relacionada con el contacto existente entre éste y el metal, los métodos de adición ofrecen una agitación mecánica sin embargo no aseguran que se lleve a cabo un contacto completo. Por lo que el proceso requiere de un tiempo de flotación adecuado así como de la temperatura del metal, pues los baños con baja temperatura serán excesivamente viscosos y harán más difícil la separación del fundente en el metal. El rango de temperaturas recomendado es de 750 °C – 780 °C, ya que a esa temperatura la mayoría de las sales se encuentran fundidas.

Si no existe una separación completa fundente-metal, las partículas remanentes de éste permanecerán en el baño, de no efectuarse una filtración se presentan como inclusiones no metálicas en el producto final.

Solubilidad de hidrógeno: muchas de las sales que constituyen a los fundentes son higroscópicas por lo que pueden introducir hidrógeno al baño metálico, por ello es importante que se almacenen en contenedores impermeables y libres de humedad, se recomienda que las herramientas con la que sean manipulados estén precalentadas.

Interacción de los fundentes con la aleación: debido a que los fundentes contienen sales reactivas, éstas pueden interactuar con los elementos aleantes o modificadores como sucede con el estroncio que reaccionará para producir un haluro muy estable (SrCl_2 o SF_2), por lo que al estar combinado perderá su efecto como modificador (Gruzleski y Closset, 1990).

Con revisión de la bibliográfica anterior se puede inferir que la industria del Aluminio ha tenido un fuerte crecimiento, pues se han ido descubriendo las bondades de este metal y sus aleaciones en una importante cantidad de sectores manufactureros principalmente el sector automotriz en donde los requerimientos son cada vez más estrictos. Las prácticas de fusión y limpieza del horno tienen un impacto considerable en la calidad del metal y es importante implementar un procedimiento regular cuyas condiciones sean constantes. El uso de fundentes forma parte del tratamiento al metal fundido, en ocasiones se emplean sales en forma de polvo, gránulos o como tabletas sólidas, y pueden agregarse al baño metálico en forma manual o inyectarse automáticamente.

Si bien es cierto que el uso de fundentes es una práctica semi empírica, en los últimos años la investigación y desarrollo de nuevas formulaciones y variación de mezclas tradicionales ha evaluado los fenómenos que se presentan durante la adición de estos agentes químicos al baño metálico presentan durante la adición de estos agentes químicos al baño metálico.

En la industria automotriz, durante la etapa de limpieza del metal fundido se le ha dado mucha importancia a los aspectos relacionados con la problemática que se presenta en la elección del fundente idóneo, pues existen muchas variables a considerar cuando se emplean. El propósito por el cual el metal es tratado y la composición de la aleación, deben determinar la composición química del fundente, pues un fundente que es adecuado para una aleación de Aluminio puede no ser el más recomendable para otra aleación debido a los rangos de oxidación.

Las formulaciones comerciales no siempre ofrecen los resultados que el fundidor desea porque no son apropiadas para el tipo de materiales y condiciones del proceso específico donde se aplican. En este trabajo se presentan pruebas a nivel planta en donde se evalúan los efectos de cuatro fundentes, tomando en cuenta aspectos relacionados con el tipo de reacción, escoria y defectos encontrados.

III. OBJETIVOS

GENERAL

Determinar el efecto de diferentes fundentes comerciales sobre la eliminación de defectos en una Aleación de Al-Si.

ESPECIFICOS

- Caracterización de los fundentes comerciales, utilizando técnicas complementarias como análisis granulométrico, estereoscopia, microscopia electrónica y difracción de rayos X.
- Establecer y utilizar una metodología para cuantificación de defectos utilizando una técnica de análisis de imágenes.
- Determinar el efecto de cada fundente en la limpieza del metal.

IV METODOLOGÍA

4.1 MATERIALES Y EQUIPO

Desarrollo experimental y prueba de fundentes en planta

- Unidades de producción de la planta
- Fundentes comerciales: COVERAL 123, INAFUSA, MAPRID SF 225
PROVEEDORA DEL BAJÍO

Caracterización de fundentes

- a) Análisis granulométrico
 - Criba vibratoria (Porter Sand Shaker)
 - Tamices para pruebas físicas mallas: 16, 20, 30, 60, 80
 - Balanza analítica (Sartorius)
- b) Análisis morfológico
 - Estereoscopio (Olympus SZ-CTV)
 - Cámara digital (Sony).
- c) Análisis químico
 - Microscopio Electrónico de Barrido (PHILIPHS XL 30 ESEM)
 - Equipo de difracción de rayos X. (Bruker AXS).

Análisis cualitativo y cuantitativo de defectos en una aleación de aluminio.

- a) Preparación metalográfica
 - Lijas para desbaste grueso y fino
 - Pasta de diamante (1 μm)
 - Paño para pulir aleaciones base Aluminio
 - Microscopio óptico (Carl Zeiss)

b) Análisis cuantitativo de defectos

- Cámara Digital (Sony)
- Licencia de Aphelion 3.1 e
- PC

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Pruebas en planta

Se efectuó una primera visita a la empresa dedicada a la producción de pistones con la finalidad de familiarizarse con el proceso de fundición de Aluminio, principalmente con las etapas de limpieza y desgasificación. Posteriormente se realizaron una serie de experimentos en conjunto con el responsable de producción y el personal operativo para probar cuatro fundentes comerciales, proporcionados por proveedores de la planta, COVERAL 75, INAFUSA ITALPURO, MAPRID y PROVEEDORA DEL BAJÍO en una aleación de Aluminio-Silicio, cuya composición química es muy similar a la aleación comercial 319. La capacidad de los hornos de retención, donde se realizó el tratamiento del metal, es de 400 kg el metal se vacía a una temperatura de aproximadamente 700 °C, haciéndolo pasar por un filtro.

La experimentación se realizó durante la etapa de limpieza del metal fundido bajo un procedimiento previamente elaborado por la empresa, que consistió en adicionar 700 gr de fundente utilizando una cuchara precalentada y con una pala metálica sumergir en el centro del horno dicha cantidad hasta no observar reacción metal / fundente; posteriormente se agitó el baño metálico con la ayuda de la misma pala. El tiempo recomendado para que el fundente reaccionara fue de 10 minutos y una vez transcurrido se retiró la escoria de la superficie del baño colocándola en un contenedor metálico, de donde se tomó la muestra correspondiente para observar el aspecto de la escoria.

Los cuatro fundentes se probaron en las seis unidades de experimentación: 1A, 2A, 3A, 2B, 3B que se diferenciaban por el elemento modificador (Estroncio/Fósforo) que adicionado durante el proceso de fusión. Durante la adición del fundente se observó la intensidad de la reacción e intensidad de humos generados.

4.2.2. Análisis metalográfico

Durante la experimentación se tomaron dos muestras del metal fundido, la primera antes de haberse adicionado el fundente y una más después del tratamiento. Con las muestras metálicas se prepararon metalografías para ser analizadas en el microscopio óptico y de barrido, para lo cual fue necesario hacer un corte longitudinal utilizando una cortadora con disco abrasivo de diamante; el tamaño de la muestra era apropiado para continuar con el desbaste por lo que no fue necesario montarla en resina.

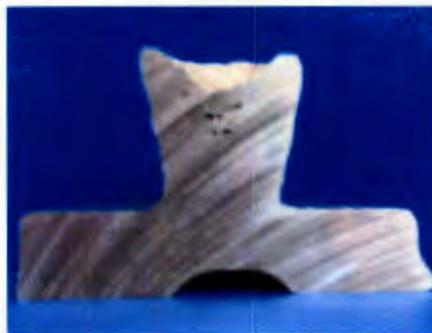


Figura 7. Corte longitudinal de la muestra metálica Al-Si.

En la preparación metalográfica se debían eliminar las líneas del corte, por lo que se inició con un desbaste grueso de acuerdo a la norma E1078 (ASM,1998) utilizando lijas de carburo de silicio con granulometría de 120 y 180, aplicando poca presión y girando la muestra 90°.

Se continuó con la siguiente lija grado 240, girando la muestra y reduciendo la presión conforme se avanzaba. Para terminar, se realizó un desbaste fino con las lijas 360, 400, 600, 800 y 1000.

Para obtener mejores resultados cada vez que se continuaba con una nueva lija, la muestra se colocó en un limpiador ultrasónico para eliminar las partículas de lijas anteriores y así evitar que se presentaran nuevas líneas.



Figura 8. Equipo para preparación metalográfica. Cortesía CINVESTAV-Qro.

Un pulido óptimo se llevó a cabo en dos partes, la primera consistió en un pulido grueso en un paño de pelo corto Texmet con pasta de diamante de $3\ \mu\text{m}$, así se eliminaron las líneas del desbaste, si éstas persistían un paso intermedio consistió en pulir la muestra con pasta de diamante de $1\ \mu\text{m}$. En la segunda etapa se pulió con un paño de pelo medio Microcloth pasta de diamante de $\frac{1}{4}\ \mu\text{m}$ y un lubricante para aleaciones de Aluminio, las muestras se lavaron con agua y jabón, se secaron con alcohol cada vez que eran cambiadas de paño. El objetivo del pulido fue obtener una superficie sin rayas adecuada para realizar metalografías de calidad.

Las probetas preparadas se observaron en un microscopio óptico Carl Zeiss utilizando 50X y 15X, en donde se evaluó cualitativamente el efecto del fundente en la eliminación de defectos. Se hizo un barrido de la muestra tomándose microfotografías con una cámara digital adaptada para ser procesadas posteriormente por medio de un software de análisis de imágenes.

La escoria retirada de la superficie del baño fue colocada en un contenedor metálico de donde se tomaron muestras representativas y se observaron sus características físicas para determinar si la escoria era húmeda o seca.

4.2.3 Caracterización de fundentes

a) Análisis granulométrico y morfológico

Por lo general, la granulometría de polvo se encuentra sobre varios órdenes de magnitud y puede ser (1) caracterizada en términos de un único diámetro medio, (2) presentada como un listado de valores de una tabla, (3) representada como un gráfico, o (4) descrita matemáticamente. La presentación gráfica suele ser la más aceptable debido a la inmediata información visual que proporciona y a la facilidad con que pueden compararse distintos conjuntos de datos.

Con el propósito de obtener el tamaño y distribución de partícula de cada fundente se llevó a cabo un análisis granulométrico mediante el uso de una criba vibratoria y tamices de acero inoxidable. Se colocó una muestra de 100 gr en la criba durante 15 minutos para permitir la separación en los diferentes tamaños de partícula utilizando las siguientes mallas: 16 (1190 μm), 20 (841 μm), 30 (595 μm), 60 (250 μm) y 80 (177 μm). El porcentaje retenido en cada tamiz se pesó en una balanza analítica, los pesos correspondientes a cada malla se registraron para la elaboración de una gráfica de la distribución de tamaños de partícula.

Son muchos los métodos desarrollados para la medición del tamaño de una partícula y esto se debe a la casi infinita variedad de necesidades. Sólo unos poseen una aplicación generalizada y ninguno de ellos satisface todos los requerimientos. El examen microscópico, es uno de los más comunes y por medio de éste se puede obtener una descripción cualitativa acerca de la forma y tamaño de las partículas que raramente exhiben una morfología uniforme, pueden ser esféricas, cúbicas y granulares.



Figura 9. Estereoscopio para muestras sólidas. Cortesía CINVESTAV - Qro.

Para observar la forma de las partículas así como para determinar de manera cualitativa el tamaño de estas, se realizó un análisis morfológico en el que se utilizó un estereoscopio Olympus SZ-CTV en donde la muestra no requirió una preparación previa.

Se tomó aproximadamente 1 gr del porcentaje retenido en cada malla y se colocó debajo del ocular eligiendo la intensidad de luz óptima para tomar la fotografía correspondiente a cada tamaño de grano. La escala utilizada fue de 1/64 " (397 μm) colocándose junto a la muestra en la parte inferior lo que permitió definir la morfología y el tamaño de las partículas.

Análisis químico

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Philips modelo XL 30 ESEM con microsonda de análisis químico elemental marca EDAX. El haz de electrones fue de 20 keV, el tiempo de exposición de la muestra fue de 60 seg. y la técnica utilizada fue espectroscopia de energía dispersiva (EDS), con la cual es posible calcular en forma semicuantitativa la presencia de elementos en una zona o punto determinado de la muestra.



Figura 10. Microscopio Electrónico de barrido (SEM). Cortesía CINVESTAV- Qro.

Ambos elementos, SEM y EDS (siglas en inglés de este último equipo acoplado) son hoy en día indispensables para la caracterización adecuada de cualquier material.

Para realizar el análisis químico de los fundentes fue necesario elaborar pastillas de 6 mm de diámetro por 3 mm de alto tomándose una muestra del porcentaje de muestra retenido en cada malla. Se pulverizó 1gr de fundente en un mortero de ágata seco y limpio, el polvo se colocó en el interior de un dado de acero D-2.

Se utilizó una prensa hidráulica cuya presión establecida fue de 750 ± 25 psi, ésta se accionaba empleando un software que mantiene constante la presión aplicada durante el tiempo de compactación.

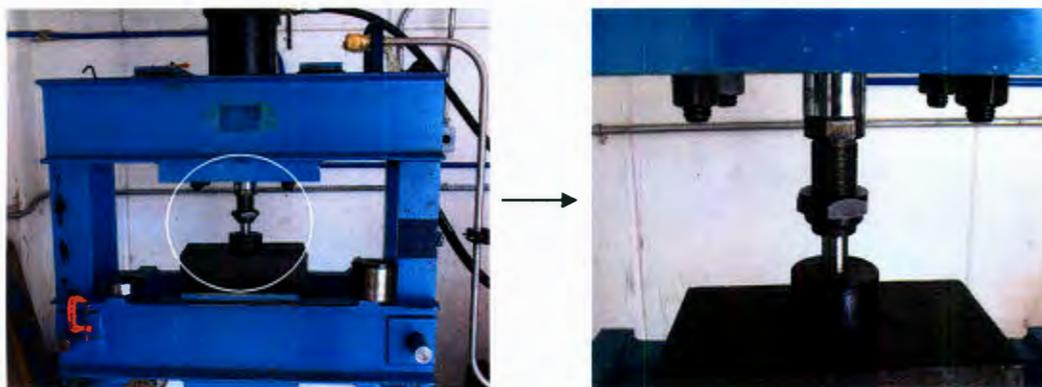


Figura 11. Prensa hidráulica para la preparación de pastillas de fundentes comerciales. Cortesía CIATEQ, A.C.

Las pastillas así preparadas se analizaron con SEM EDS colocándolas sobre una placa de aluminio de 5 x 5 cm, y realizando un análisis químico puntual se determinaron semicuantitativamente los elementos químicos presentes en cada fundente.

Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido se pudo observar la porosidad y fases presentes en las metalografías preparadas previamente; para ello se colocaron 3 muestras en una placa de aluminio de 5 x 5 cm, unidas con una cinta conductora y pintura de plata, cuidando de no tocar la superficie para mantenerla libre de polvo.

La preparación de las muestras requirió limpieza ultrasónica con un solvente como acetona, tolueno o alcohol para asegurarse que la superficie estuviera libre de grasa y contaminantes que pudiesen tener efectos en el análisis.

Difracción de Rayos X

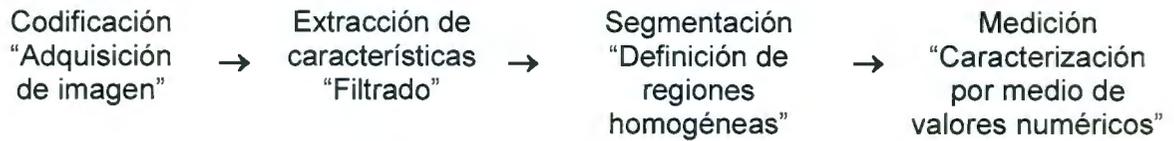
La técnica de difracción de rayos X es una técnica clásica utilizada en el estudio y caracterización cristalina de materiales. Cuando un haz incidente de rayos X interacciona con una estructura atómica periódica y monocristalina se generan una serie de reflexiones de Bragg o haces difractados, asociados a cada uno de los planos cristalográficos característicos del material estudiado. El estudio de las posiciones relativas de los puntos presentes en un diagrama de difracción, brinda información acerca de la calidad cristalina y de la orientación de la red cristalográfica asociada al material estudiado.

Por anterior la identificación de una fase cristalina por este método se basa en el hecho de que cada sustancia en estado cristalino tiene un diagrama de rayos X que le es característico. Estos diagramas están coleccionados en fichas, libros y bases de datos del Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) y agrupados en índices de compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales.

En la identificación de compuestos se utilizó un difractómetro Bruker AXS (radiación CuK α) en el intervalo angular de 10 a 90° en 2 θ , con un paso de 0.02° y un tiempo de conteo de 10 seg/paso, proporcionado por el Instituto Tecnológico de Morelia (ITM). Se preparó 1 gr de muestra por cada fundente pulverizándose en un mortero de ágata hacerse sin presionar el polvo demasiado para impedir la orientación de planos preferenciales que interfieran en el análisis, cuyo tiempo fue de 1:30' obteniéndose cualitativamente la composición química de cada fundente.

4.2.4 Cuantificación de defectos

El análisis de imágenes consiste en la descripción y reconocimiento del contenido de una imagen digital. Es un proceso de manipulación de la imagen adquirida para extraer información de alto que se analiza por medio de una computadora, y se puede resumir en 4 etapas principales:



Las características de interés están relacionadas con la forma de las regiones, es decir la morfología de un objeto se refiere a su perfil y estructura física. Las características pueden estar representadas por límites o propiedades externas y son esenciales para el reconocimiento y medición de objetos.

Operaciones morfológicas

En el contexto de morfología matemática una imagen no posee información si no es analizada por un observador quien extrae aspectos de interés para el análisis y descripción de objetos. Esta interacción se realiza utilizando un conjunto simple que es llamado elemento estructurante, lo cual permite obtener información acerca del tamaño, forma y orientación del objeto.

Las operaciones morfológicas pueden simplificar los datos de la imagen, conservar las características esenciales y eliminar datos irrelevantes; se utilizan para propósitos específicos tales como la detección de bordes, segmentación y realce de objetos.

Para la cuantificación de los defectos se utilizó un microscopio óptico y se obtuvieron una serie de microfotografías a partir de las metalografías preparadas previamente en donde se trazo una línea imaginaria. La zona de análisis contiene 11 imágenes cada una con un área de 1.84 mm^2 que constituye el 6 % del área total de la muestra.

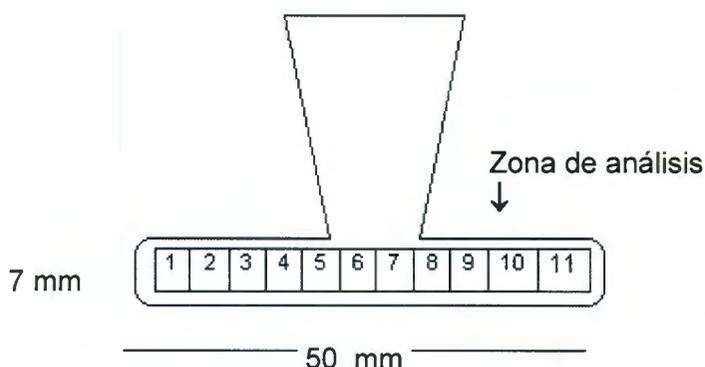


Figura 12. Zona de la muestra metálica para el análisis de imágenes.

Las microfotografías obtenidas se sometieron a un análisis de cuantitativo utilizando un programa de procesamiento de imágenes (Aphelion versión 3.1e.) en donde se aplicó una rutina de operaciones morfológicas. Para dimensionar las imágenes se utilizó una escala calibrada de 1 mm, por lo que se obtuvo una microfotografía, en donde se midió la distancia en pixeles para tener el factor de conversión a μm . La siguiente figura muestra la equivalencia de $200 \mu\text{m} = 81.6 \text{ pix}$. Con el factor de escala se puede determinar el número defectos por unidad de área.

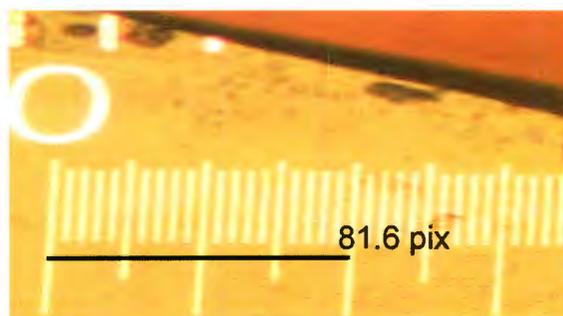


Figura 13. Escala utilizada durante la obtención de microfotografía para el análisis cuantitativo de defectos.

Para el análisis cuantitativo de defectos se trabajó con imágenes en blanco y negro por lo que fue necesario realizar una operación denominada “binarización” obteniéndose una imagen en escala de grises con un valor de umbral de 103 (0-255) lo que generó una separación de los defectos respecto al fondo.

Posterior a esto se llevó a cabo una eliminación de bordes. Se eligió como elemento estructurante un cuadrado con área de $2 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, se aplicó una apertura para remover el ruido del fondo y separar objetos tocándose. De esta manera los objetos (defectos) se nombraron para su identificación como “poros” y se cuantificaron por medio del análisis de objetos.

Todas las microfotografías siguieron la misma secuencia de operaciones y ésta se mantenía guardada en el software para su fácil manipulación. En la siguiente figura se observa una microfotografía analizada y las diferentes operaciones aplicadas.

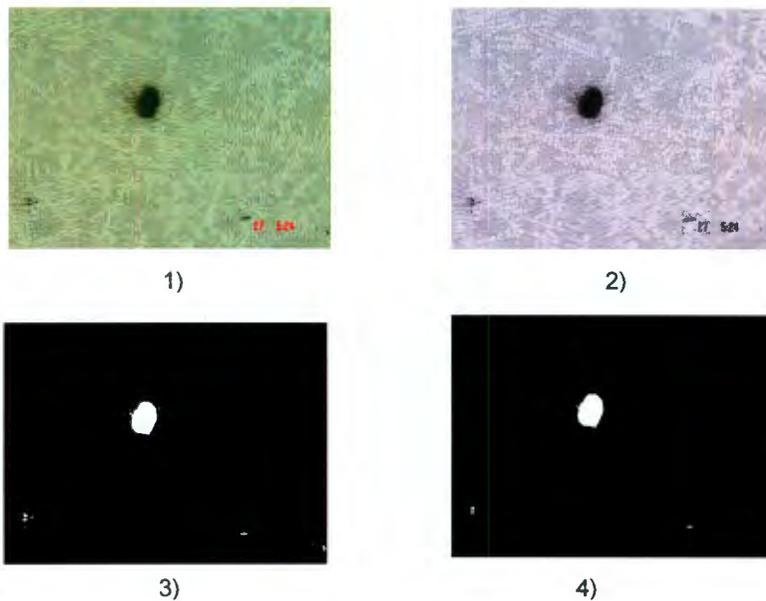


Figura 14. Rutina establecida para el análisis cuantitativo de defectos 1) Adquisición y almacenamiento de imagen; 2) Binarización de la imagen; 3) Eliminación de bordes; 4) Apertura y reconstrucción.

Con el analizador de imágenes también se determinó el tamaño de los defectos identificados como poros, ya que de acuerdo a la información proporcionada por la planta la longitud debe ser menor a $500 \mu\text{m}$ para evitar rechazos en las piezas automotrices; si se asume que la geometría del poro es circular el área de éste no debe exceder a $1.96 \times 10^5 \mu\text{m}^2$; conociendo este dato se elaboró un gráfico para cada muestra del número de poros encontrados contra el área en μm^2 .

V RESULTADOS

5.1 Análisis morfológico

Como parte de la caracterización de los fundentes en polvo se llevó a cabo un análisis granulométrico para obtener la distribución del tamaño de partícula, en la siguiente tabla se muestra el porcentaje en peso retenido en cada malla, correspondiente a cada uno de los fundentes comerciales probados en planta.

Cuadro 4. Porcentaje en peso retenido para cada uno de los fundentes.

TAMAÑO DE MALLA	FUNDENTE			
	COVERAL 75	INAFUSA ITALPURO	MAPRID SF 225	PROVEEDORA DEL BAJÍO
+16 1990 μm	2.17	0.44	0.68	12.85
-16+20 1990-841 μm	7.91	0.66	0.67	5.37
-20+30 841-595 μm	4.19	11.35	1.54	9.69
-30+60 595-250 μm	15.33	26.31	51.6	22.43
-60+80 250-177 μm	27.34	5.24	14.27	12.71
-80 < 177 μm	43.03	55.96	31.20	36.96

La distribución de tamaño de partícula fue heterogénea, el porcentaje retenido en mayor proporción fue en la malla 80 (< 177 μm); la siguiente gráfica se construyó con los porcentajes en peso retenidos correspondientes a cada malla, con ella se obtuvo información visual que permitió comparar la distribución de tamaño de partícula en los cuatro fundentes.

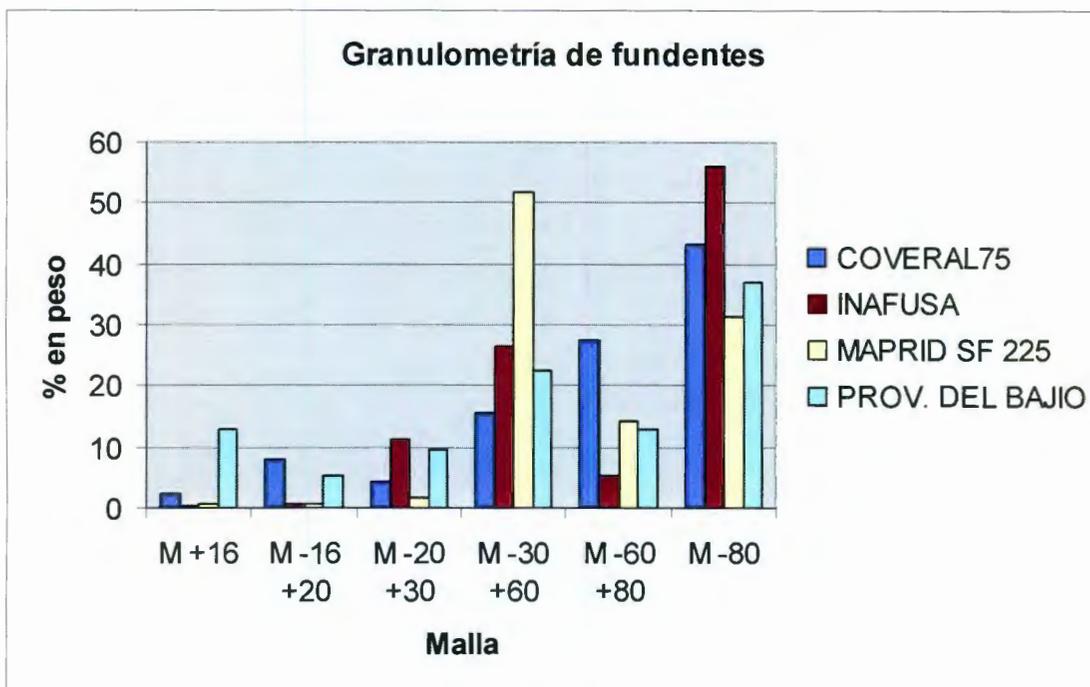


Figura 15. Distribución del tamaño de partícula de fundentes comerciales.

Para conocer la forma y tamaño de las sales constituyentes de los fundentes se llevó a cabo un análisis morfológico utilizando un estereoscopio. Esta técnica es utilizada para muestras en estado sólido y que no requieran preparación previa al análisis. Se muestran series de fotografías ordenadas por tamaño de partícula para cada uno de los fundentes.

COVERAL 75



Malla +16



Malla -16



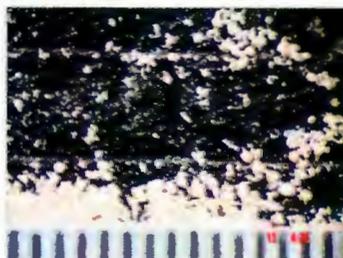
Malla -20



Malla -30



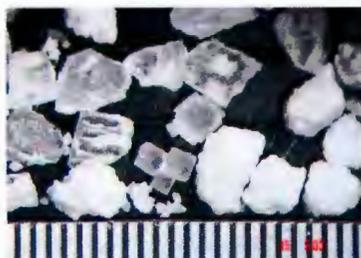
Malla -60



Malla -80

Figura 16. Morfología del fundente COVERAL 75.

INAFUSA ITALPURO



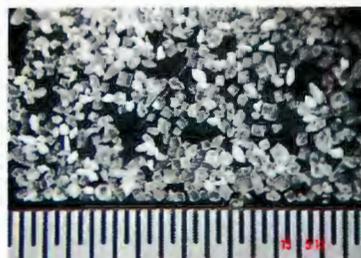
Malla +16



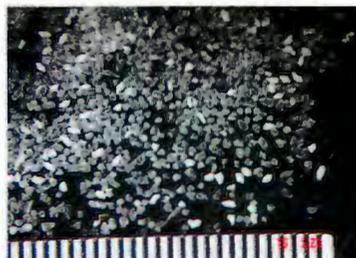
Malla -16



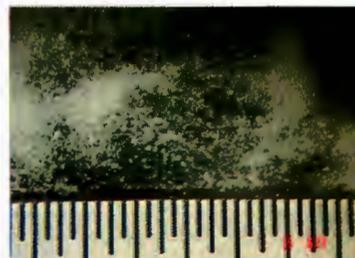
Malla -20



Malla -30



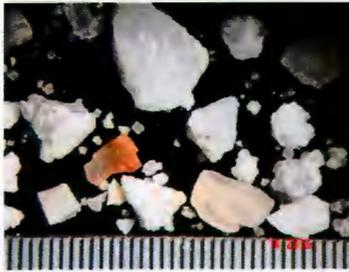
Malla -60



Malla -80

Figura 17. Morfología del fundente INAFUSA ITALPURO.

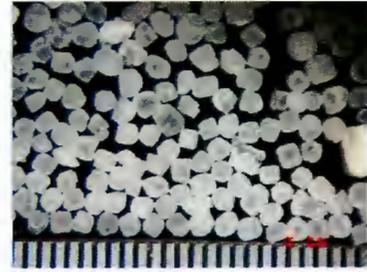
MAPRID SF 225



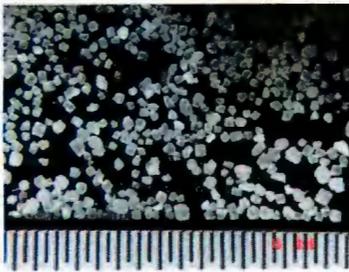
Malla +16



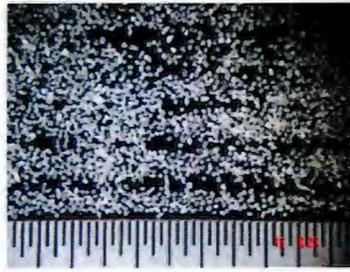
Malla -16



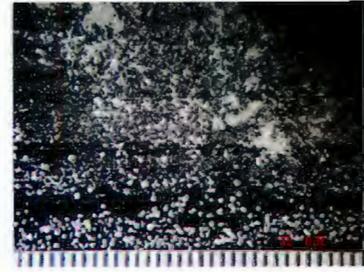
Malla -20



Malla -30



Malla -60



Malla -80

Figura 18. Morfología del fundente MAPRID SF 225.

PROVEEDORA DEL BAJÍO



Malla +16



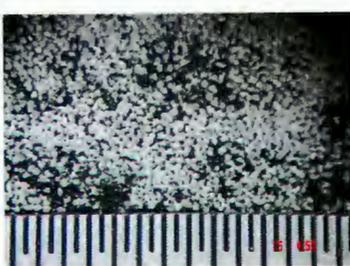
Malla -16



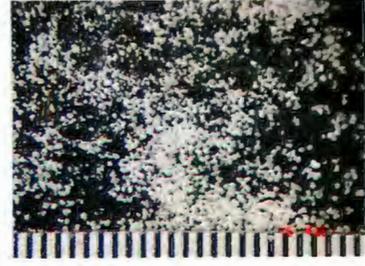
Malla -20



Malla -30



Malla -60



Malla -80

Figura 19. Morfología del fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO.

5.2 Análisis químico

Utilizando el SEM/EDS (Scanning Electron Microscope, Energy Dispersive Spectroscopy) se realizó un análisis químico puntual de cada fundente, la muestra fue tomada del porcentaje retenido en cada malla. El objetivo principal fue determinar los elementos químicos presentes en las muestras; los resultados obtenidos en esta etapa se integraron en el análisis por difracción de rayos X, lo cual permitió la identificación de los compuestos presentes en los fundentes. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con SEM del fundente comercial COVERAL 75.

Cuadro 5. Análisis químico semi-cualitativo realizado en SEM del fundente COVERAL 75.

Tamaño de malla	%C	%O	%F	%Na	%Si	%S	%Cl	%K	%Ca
+16	17.01	20.38	3.39	11.90	1.09	1.03	24.48	19.62	1.09
-16 +20	14.47	21.44	3.56	21.00	0.65	0.89	25.74	10.92	1.32
-20 +30	14.98	26.32	4.03	23.28	0.69	0.97	19.57	8.86	1.31
-30 +60	12.96	19.30	2.53	8.96	0.54	0.94	28.20	25.78	0.78
-60 +80	15.15	30.87	5.23	24.34	1.24	2.83	12.75	5.24	2.36
-80	11.73	31.85	12.26	26.13	2.07	3.54	3.55	2.61	6.26

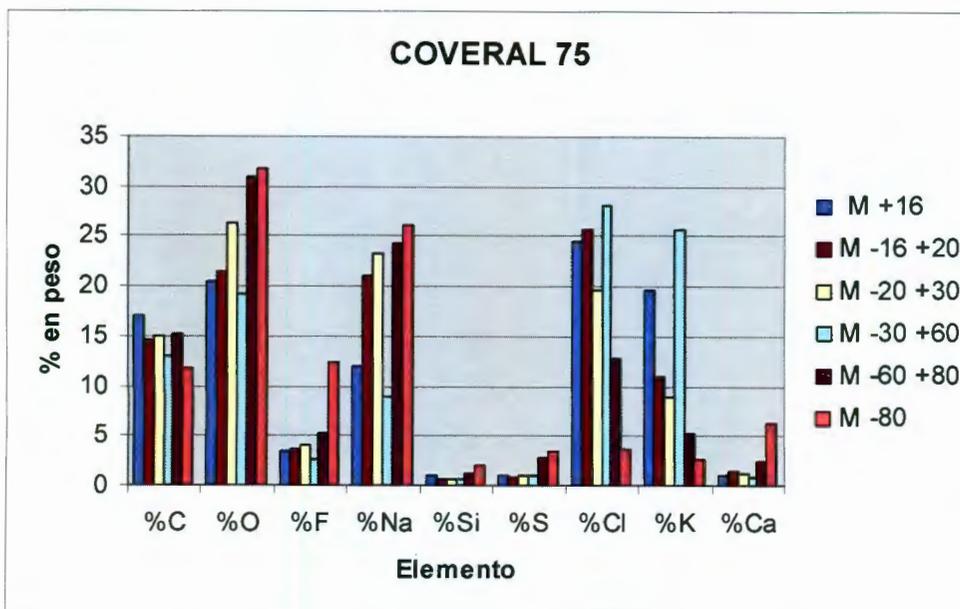


Figura 20. Composición química para diferentes tamaños de tamiz fundente COVERAL 75.

Cuadro 6. Análisis químico semi-cualitativo realizado en SEM del fundente INAFUSA-ITALPURO.

Tamaño de malla	%C	%O	%F	%Na	%Al	%Si	%S	%Cl	%K	%Ca
+16	9.85	5.50	1.62	32.62	0.58	0.75	--	46.65	1.29	1.12
-20 +30	16.47	11.49	2.68	31.75	0.68	0.48	--	36.45	--	--
-60 +80	11.04	21.22	23.90	19.70	4.33	1.58	7.00	2.32	--	8.91

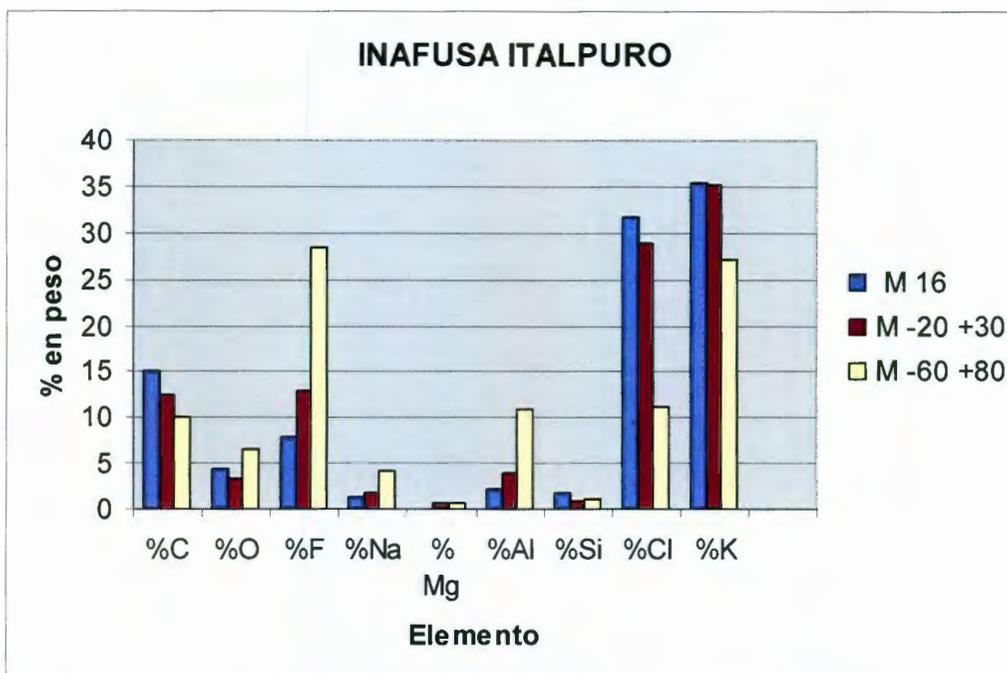


Figura 21. Composición química para diferentes tamaños de tamiz fundente INAFUSA ITALPURO.

Cuadro 7. Análisis químico semi-cualitativo realizado en SEM del fundente MAPRID SF 225.

Tamaño de malla	%C	%O	%F	%Na	% Mg	%Al	%Si	%Cl	%K
-20 +30	15.16	4.42	7.92	1.29	--	2.20	1.78	31.75	35.48
-30 +60	12.47	3.37	12.95	1.69	0.61	3.96	0.89	28.83	35.22
-60 +80	10.05	6.46	28.50	4.19	0.71	10.86	1.02	11.16	27.05

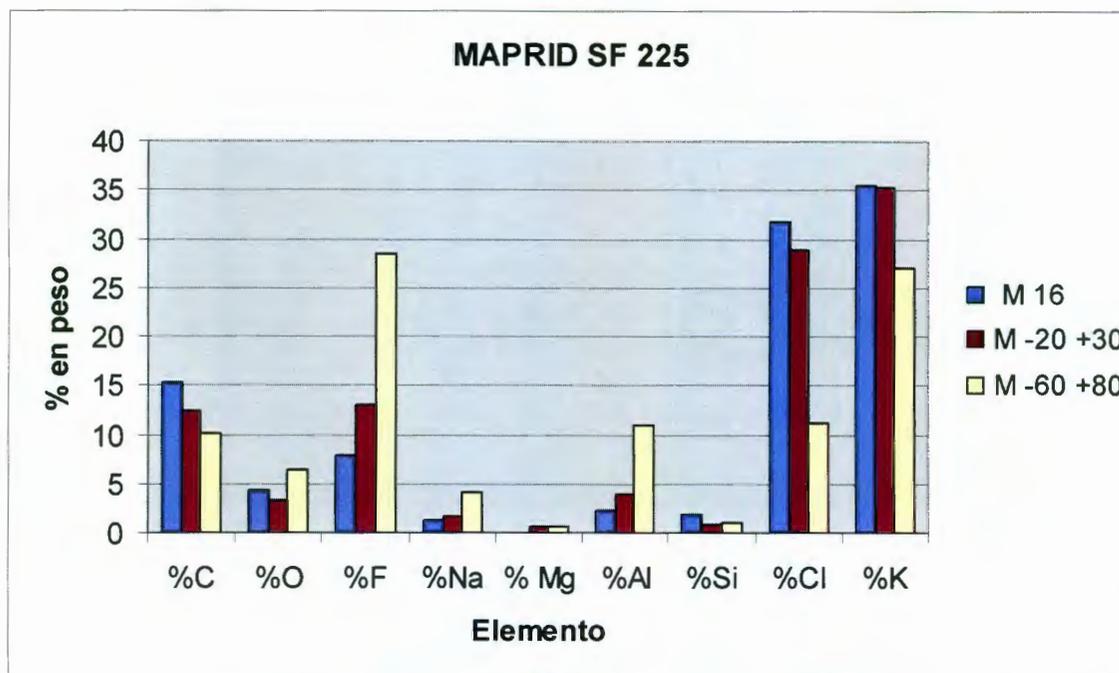


Figura 22. Composición química para diferentes tamaños de tamiz fundente MAPRID SF 225.

Cuadro 8. Análisis químico semi-cualitativo realizado en SEM del fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO.

Tamaño de malla	%C	%O	%F	%Na	%Mg	%Si	%S	%Cl	%K	%Ca
+16	10.56	8.85	4.95	10.95	1.66	1.54	1.71	34	23.28	2.50
-16										
+20	9.13	9.89	8.07	20.99	3.06	3.15	2.45	31.37	8.06	3.81
-20										
+30	10.32	9.27	4.89	10.91	1.31	1.48	1.28	34.01	24.25	2.29
-30										
+60	9.17	10.32	6.98	18.60	1.40	2.02	2.80	32.23	13.55	2.93
-60										
+80	8.23	12.15	11.78	24.68	1.62	3.60	3.13	27.18	4.59	3.05
-80										
-80	12.91	18.09	9.55	20.88	2.61	3.00	1.98	21.19	3.06	6.74

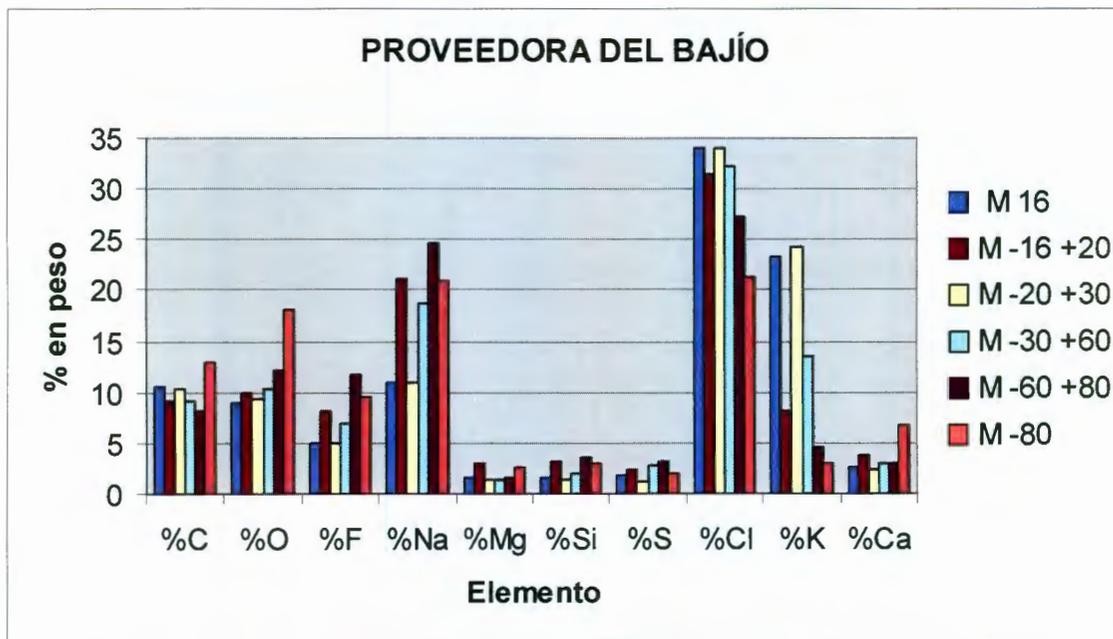


Figura 23. Composición química para diferentes tamaños de tamiz fundente PROVIDORA DEL BAJÍO.

5.3 Difracción de Rayos X

Para tener una interpretación parcial de los resultados en esta etapa fue necesario revisar información en la literatura acerca de la composición química típica de fundentes comerciales utilizados en la limpieza del Aluminio líquido. El análisis químico cualitativo en el SEM permitió la caracterización de algunos de los compuestos presentes, sin embargo aun quedaron picos sin identificar.

Se obtuvieron dos difractogramas para cada fundente, excepto para el fundente PROVIDORA DEL BAJIO. Se compararon la intensidad y ubicación de los picos correspondientes a los compuestos identificados utilizando patrones de difracción revisados en la base de datos del equipo utilizado (Instituto Tecnológico de Morelia), también se consulto información en los equipos de difracción de rayos X del CINVESTAV, Qro. así como de la UNAM.

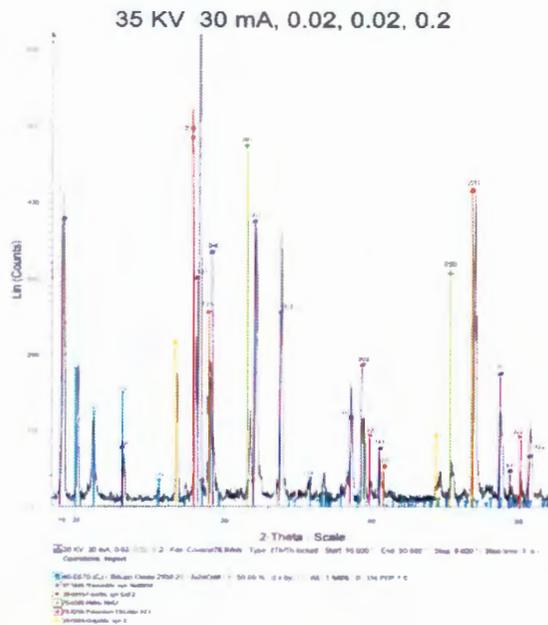


Figura 24. Difractograma del fundente COVERAL 75.

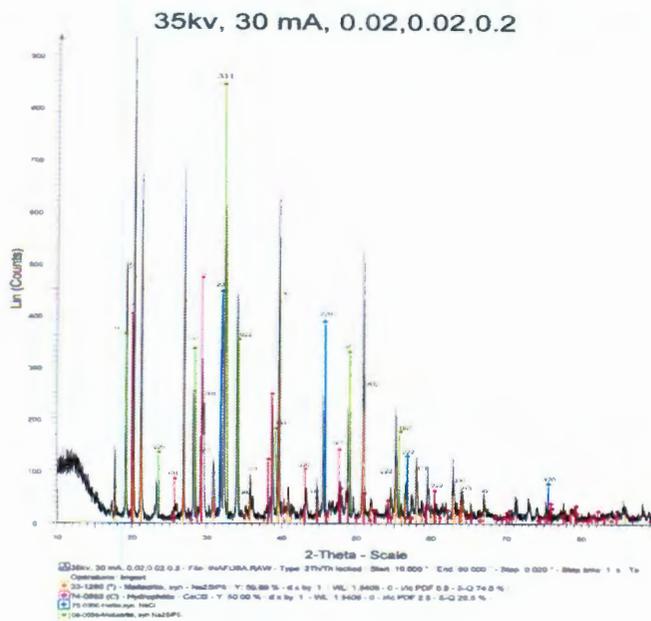


Figura 25. Difractograma del fundente INAFUSA.

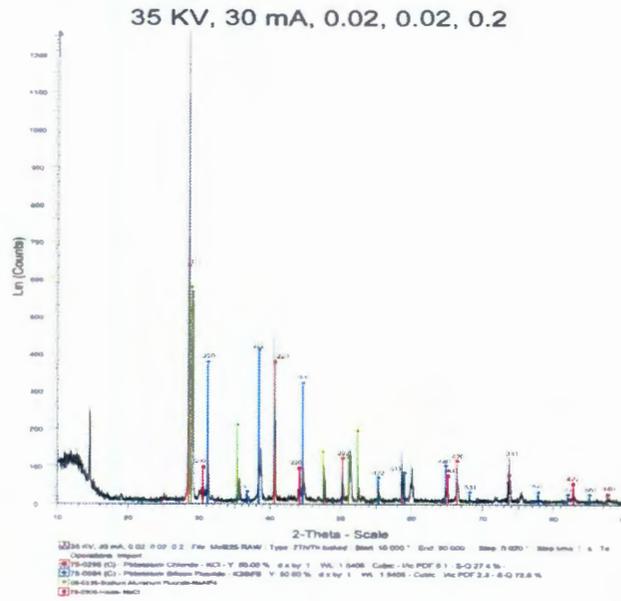


Figura 26 Difractograma del fundente MAPRID SF 225.

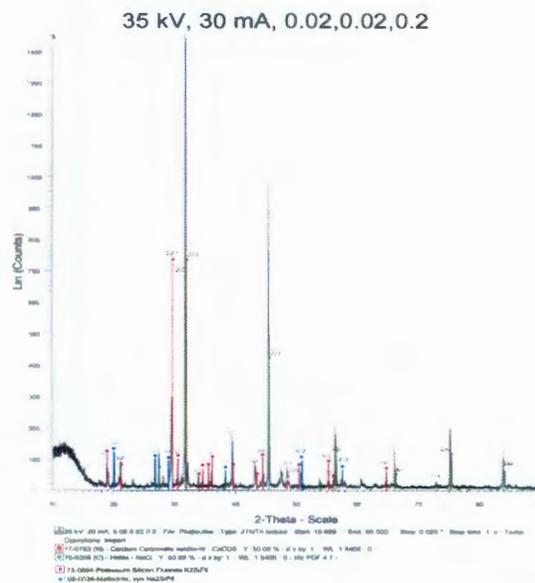


Figura 27. Difractograma del fundente PROVEEDORA DEL BAJÓ.

En el siguiente cuadro se hace un resumen de los compuestos identificados por medio del análisis de difracción de R-X para cada fundente comercial.

Cuadro 9. Compuestos identificados en los fundentes comerciales.

COMPUESTO IDENTIFICADO	COVERAL 75	INAFUSA	MAPRID	PROV. BAJÍO
CaCl ₂		▲		
CaCO ₃				▲
CaF ₂	▲			
KCl	▲		▲	
K ₂ SiF ₆			▲	▲
NaAlF ₆			▲	
NaCl	▲	▲	▲	▲
Na ₂ SiF ₆		▲		▲
Na ₂ SO ₄	▲	▲		
SiO ₂	▲			

5.4 Análisis cualitativo de escoria

Al retirar la escoria del baño metálico se obtuvo una muestra representativa y por medio de un análisis visual fue posible clasificar la escoria como húmeda o seca. De acuerdo a la bibliografía consultada se encontró que la cantidad de metal atrapado en la película de óxido determina la efectividad de un fundente. La siguiente serie fotografías muestra la escoria obtenida durante la experimentación, y partir de su observación se elaboró una tabla con las principales características físicas.



Figura 28. Escoria obtenida después del tratamiento de limpieza.

Al adicionar el fundente al baño metálico fue posible determinar el tipo de reacción generada, así como la presencia de humos y olor que se desprendían durante la adición, lo cual se registro en la siguiente tabla durante la experimentación.

Cuadro 10. Características de la reacción y escoria generada durante la adición de fundentes.

Fundente	Ignición	Humos	Olor	Escoria	Observaciones
COVERAL 75	Sí, al agitar.	No	No perceptible	Seca	Poca escoria, aglomerados de fundente sin reaccionar.
INAFUSA ITALPURO	Sí	Sí	Sí, muy irritante	Húmeda	Escoria húmeda / abundante.

Fundente	Ignición	Humos	Olor	Escoria	Observaciones
MAPRID SF 225	No	No	No	Seca	Poca escoria adherida en las paredes del horno
PROV. DEL BAJÍO	Sí	No	No	Seca	Reacción violenta, abundante burbujeo. Poca escoria.

5.5 Cuantificación de defectos

Se calculó el área en píxeles² de cada microfotografía; la escala utilizada fue de 100 μm y se transformó en píxeles para obtener un factor de conversión que permitió expresar el número de defectos por unidad de área.

$$\text{Área} = (640 \times 480) = 307200 \text{ pix}^2$$

$$307200 \text{ pix}^2 = \left(\frac{1 \text{ mm}}{408 \text{ pix}} \right)^2 307200 \text{ pix}^2$$

$$\text{Área} = 1.84 \text{ mm}^2 = 1.84 \times 10^6 \mu\text{m}^2$$

Cuadro 11. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal.

MUESTRA	Total de defectos	N_A Defectos/ μm^2	$\frac{\text{Área de poros}}{\text{Área total}}$
1 A [†]	39	1.92×10^6	1.27×10^{-4}
1 A [†]	71	3.51×10^6	2.31×10^{-4}
2 A [†]	45	2.20×10^6	1.46×10^{-4}

MUESTRA	Total de defectos	N_A Defectos/ μm²	<u>Área de poros</u> Área total
2 A †	26	1.28 x 10 ⁶	8.08 X 10 ⁻⁵
3 A †	106	5.24 x 10 ⁶	2.93 X 10 ⁻⁴
3 A †	93	4.59 x 10 ⁶	2.87 X 10 ⁻⁴
2 B †	60	2.96 x 10 ⁶	1.92 X 10 ⁻⁴
2 B †	62	3.06 x 10 ⁶	2.02 X 10 ⁻⁴
3 B †	34	1.68 x 10 ⁶	1.10 X 10 ⁻⁴
3 B †	46	2.27 x 10 ⁶	1.50 X 10 ⁻⁴
3 A* †	68	3.71 x 10 ⁶	2.44 X 10 ⁻⁴
3 A* †	28	1.38 x 10 ⁶	9.13 X 10 ⁻⁵

† Antes del tratamiento de limpieza

† Después del tratamiento de limpieza

Con el analizador de imagen fue posible medir el número de poros presentes en las muestras metálicas y a partir de los datos obtenidos se elaboraron las gráficas siguientes.

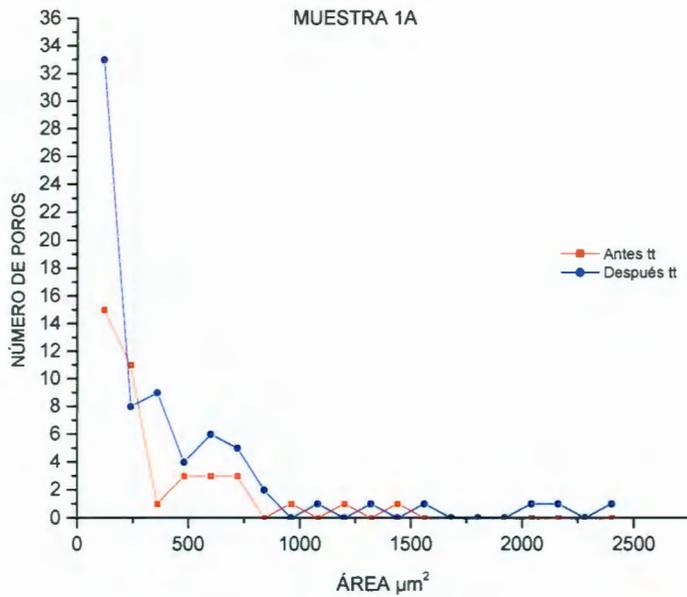


Figura 29. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 1 A.

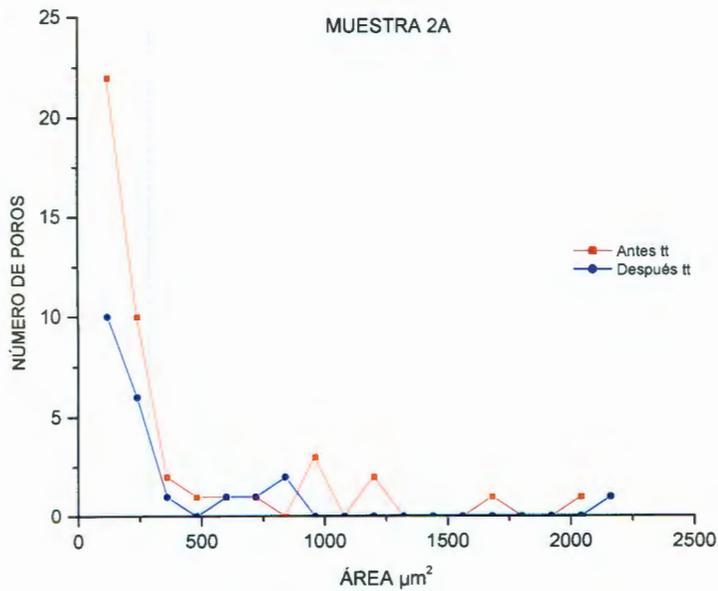


Figura 30. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 2 A.

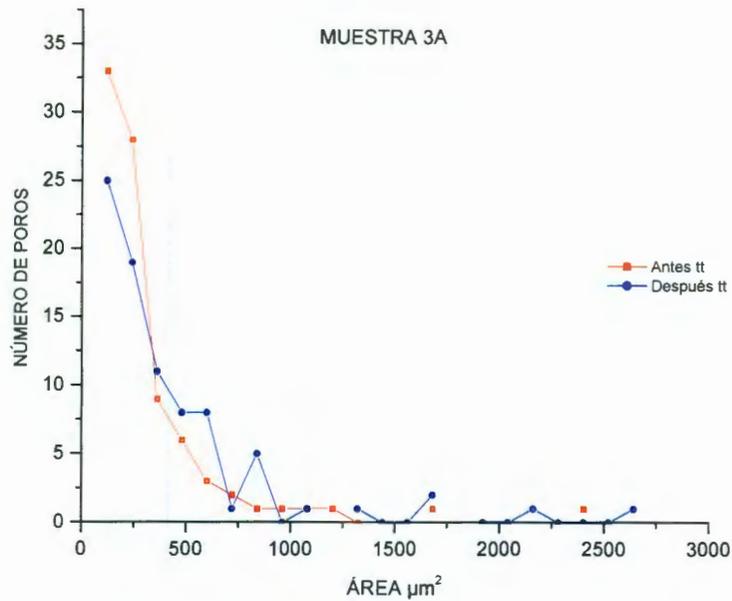


Figura 31. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 3A.

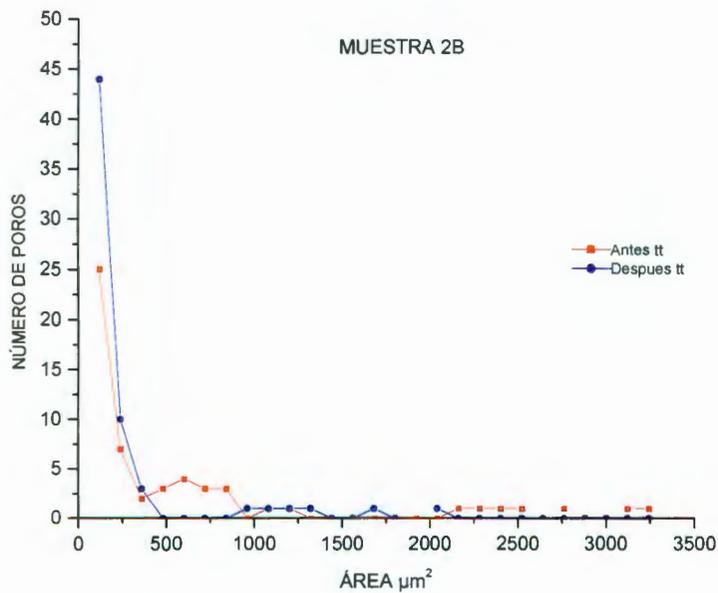


Figura 32. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 2B.

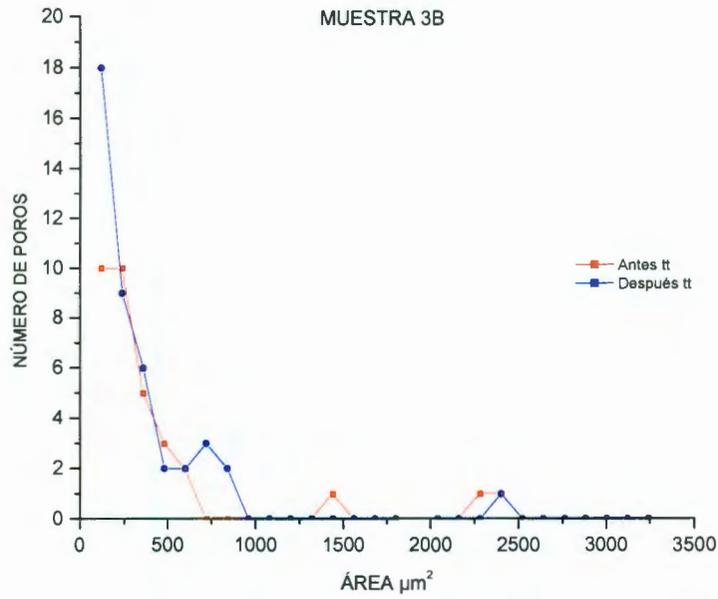


Figura 33. Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 3B.

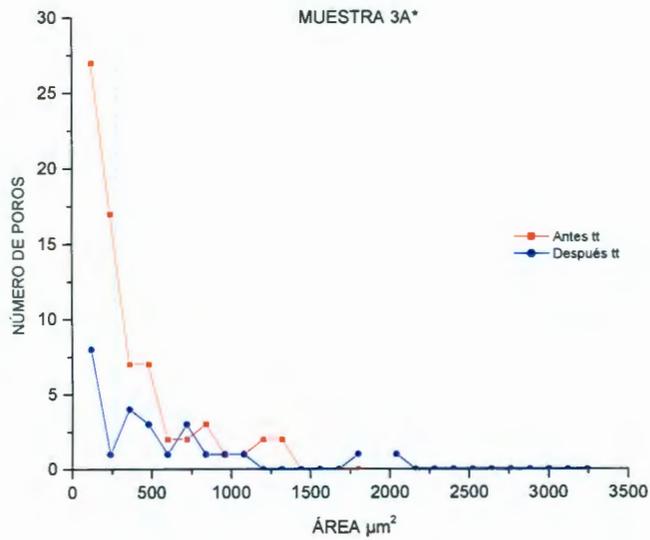


Figura 34 Número de defectos encontrados antes y después del tratamiento de limpieza del metal, muestra 3A*.

VI DISCUSIÓN

Dentro de la caracterización de fundentes se incluyó un análisis granulométrico cuyos resultados se presentaron en la figura 16, se observa que los cuatro fundentes probados en planta tienen una distribución de tamaño de partícula muy heterogénea. Todos mostraron distribuciones parecidas en los tamaños retenidos en el tamiz 30 e incluso hasta el tamiz 60, en este caso el MAPRID SF 225 fue la excepción. El COVERAL 75, fue el que mostró un comportamiento más regular, principalmente a partir del tamaño de partícula entre los tamices 20 y 30 donde se observa una relación lineal entre la cantidad de fundente y el tamaño, a menor tamaño de partícula mayor cantidad de fundente. El INAFUSA ITALPURO mostró un comportamiento muy irregular, aunque la mayor parte se concentro en la malla - 80, más del 50%, el MAPRID SF 225 muestra un comportamiento muy irregular no se aprecia ninguna tendencia clara en cuanto a la distribución de tamaño, en este caso la mayor parte del fundente se concentra en el rango de tamaño que corresponde a la mallas -30+60, más del 50%; el fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO tiene una distribución más homogénea, como se muestra en el cuadro 4 en el cual todos los rangos se encuentran cantidades importantes de 10 a 35% aprox., incluso presenta una mayor proporción de partículas de tamaño malla +16 más del 10 % del fundente.

Se han propuesto varias ecuaciones para correlacionar la cantidad de material con su tamaño de partícula con el fin de obtener una relación de distribución, sin embargo, en este caso no fue factible utilizar ninguna ya que todas estas relaciones empíricas presuponen que el polvo debe seguir alguna distribución y en este caso no se observo una tendencia en particular.

La presencia de partículas muy finas en el fundente, en el ámbito industrial, tiene la desventaja de generar pérdidas importantes durante su aplicación y manejo si estas actividades no se realizan cuidadosamente.

Idealmente el fundente debe tener un tamaño homogéneo, para facilitar su manejo, aplicación y repetibilidad en los resultados, ya que el tamaño es un factor que afecta el comportamiento del fundente en la operación de limpieza del metal (Brown, 1999).

Como puede verse en la figura 16, ninguno de los fundentes analizados muestra homogeneidad en el tamaño y distribución de las partículas, ya que todos contienen cantidades importantes de partículas muy finas, malla -80, en ninguno de los casos es menos del 30%, y todos muestran una distribución de tamaño de partícula en un rango amplio, con tamaños ≤ 0.2 mm.

A partir de la caracterización física de los fundentes se realizó un análisis morfológico utilizando el estereoscopio, y se obtuvieron una serie de fotografías. Con estos análisis fue posible determinar las morfologías predominantes para cada fundente en los diferentes tamaños de malla. El fundente COVERAL 75, como puede observarse en Figura 16 mostró en los dos primeros tamaños de malla (+16 +20) cristales esféricos irregulares y cubos con aristas redondeadas; en la malla +30 se observó una mezcla de cristales cúbicos y cúbicos con aristas redondeadas; en todos los casos se observó una cubierta de un polvo color rosa pálido, esta morfología fue la misma para los tamaños de malla restantes y en el retenido (malla >80) la mayor parte de las partículas se presentó en forma de polvo. En general en este fundente se observaron cuatro tipos de morfología cristales esféricos irregulares, cristales cúbicos, cúbicos con esquinas redondeadas y polvo, distribuidos como ya se ha mencionado.

La figura 18 muestra la serie de microfotografías correspondientes al fundente INAFUSA ITALPURO, observándose en el primer tamaño de malla aglomerados de sales, así como cristales irregulares con ángulos agudos; en el resto de las mallas se observaron cristales cúbicos y cristales irregulares. Las partículas finas retenidas en la malla -80, tienen morfología cristalina, no se observa polvo en cantidades importantes.

La morfología que presentó el MAPRID SF 225 fue de aglomerados y cristales irregulares; los cuales prevalecieron en todos los tamaños de malla, aunque en la malla -80 se observaron cristales esferoides finos poco parecidos al polvo.

Por último el fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO tuvo una morfología muy similar en todas las mallas, encontrándose aglomerados de sales y cristales irregulares, las partículas en forma de polvo se presentaron en pequeño porcentaje tal como se observa en la figura 22.

De acuerdo a lo anterior se puede mencionar que todos los fundentes tuvieron un porcentaje mayor al 25 % en el rango de -80, pero solamente el COVERAL 75 se observó mayor porcentaje en polvo y el resto de los fundentes exhibió una morfología preponderantemente cristalina.

La importancia de los análisis morfológicos y de distribución del tamaño de partículas radica en que de acuerdo con literatura consultada la morfología de un fundente y la uniformidad en el tamaño de grano tienen un efecto importante en su eficiencia, lo anterior porque los fundentes en polvo son mezclas de sales en donde cada grano generalmente representa sólo uno de los diferentes compuestos químicos que integran la mezcla, por lo que si los fundentes, como se observó, tienen una distribución amplia de tamaños de partícula y además la morfología es distinta para cada uno de estos tamaños, es muy probable que su composición química no sea consistente y que pueda ser distinta al variar la distribución de tamaños en la porción del fundente que se utiliza en cada aplicación, lo cual es muy común en planta por efecto de almacenaje, manejo de los contenedores y técnica de aplicación.

Esta problemática se había presentado en ocasiones anteriores pues en reportes técnicos elaborados por el CIATEQ se observó inconsistencia en la composición química al analizar por Difracción de Rayos X muestras de un mismo fundente recibidas en diferentes fechas, donde las cantidades relativas de los compuestos identificados cambiaron de manera importante y en algunos casos se detectaron composiciones diferentes.

Con el análisis anterior se encontró que todos los fundentes analizados, tienen una distribución muy heterogénea de tamaño de partícula y cierta mezcla en las morfologías observadas en cada uno de los diferentes tamaños de partícula.

En la segunda parte de la caracterización, se llevo a cabo el análisis químico cualitativo utilizando dos técnicas: Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X, la información obtenida con cada una de ellas permitió complementar los resultados anteriores.

Primero se utilizó Microscopía Electrónica de Barrido con un dispositivo EDS integrado, con la intención de obtener semicuantitativamente, la composición química elemental de cada una de los fundentes para diferentes tamaños de partícula; posteriormente se realizaron análisis con Difracción de Rayos X para determinar los compuestos presentes en algunas de las mismas muestras.

En los cuadros 5-8 se muestran los resultados de los análisis realizados con SEM para cada uno de los fundentes y en las figuras 21-24 se muestran estos mismos datos en forma gráfica. Como puede observarse existe una variación muy importante en la composición química de los fundentes para los diferentes tamaños de tamiz, el fundente que mostró una mayor variación fue el COVERAL 75, donde todos los elementos muestran comportamientos muy irregulares, principalmente Oxígeno, Sodio, Cloro, Potasio y Flúor.

El fundente de PROVEEDORA DEL BAJÍO, muestra un comportamiento muy parecido al COVERAL 75, excepto en el contenido de Flúor que en este caso muestra un comportamiento más regular. Para el caso de los otros dos fundentes INAFUSA ITALPURO y MAPRID SF 225, solo se analizaron tres tamaños de tamiz: uno grande (-16+20) un intermedio (-30+60) y uno pequeño (-80), por lo que no se pudo observar el comportamiento completo de la composición química en relación al tamaño de partícula, sin embargo también se aprecian cambios importantes de un tamaño a otro, aunque en menor grado que en los otros fundentes.

Para realizar la identificación de compuestos en los difractogramas, (figuras 25-28), fue necesario: considerar los resultados obtenidos del análisis químico puntual realizado en SEM, utilizar diferentes bases de datos disponibles en el software especializado en la identificación de compuestos, consultar bibliografía relacionada con composiciones químicas típicas de fundentes comerciales, y revisar información de trabajos acerca de la caracterización de fundentes previamente realizados en CIATEQ, A. C. donde se utilizaron diferentes técnicas de análisis como microscopía electrónica de barrido (SEM) y acoplado a éste EDS (energy dispersive spectroscopy), Difracción de Rayos X, Espectroscopias Infrarrojo, Ultravioleta-Visible y RAMAN.

La información anterior se utilizó de la siguiente manera: con los datos de SEM se elaboró una lista de elementos que podrían estar presentes en los compuestos químicos, tomando como referencia esta lista, se utilizaron las bases de datos disponibles las cuales fueron tres, CINVESTAV Qro, UNAM e Instituto Tecnológico de Morelia. En la UNAM y el CINVESTAV, la identificación fue realizada por el personal responsable de los equipos, mientras que en el caso del Instituto Tecnológico de Morelia se realizó de manera personal.

Durante la identificación, los datos bibliográficos permitieron restringir la búsqueda elaborándose una lista de compuestos que comúnmente se utilizan en la fabricación de fundentes, debido a que las bases de datos consultadas contienen aproximadamente 120,000 patrones de difracción y esto puede generar confusiones al identificar los picos intensos, principalmente en mezclas de compuestos donde aparecen una gran cantidad de ellos.

Para confirmar los compuestos encontrados e identificar algunos picos aún pendientes, se compararon los difractogramas obtenidos contra los patrones de difracción de los compuestos identificados y de los más probables, considerando ubicación, altura relativa y traslape de picos; con ello se logró confirmar la identificación de algunos compuestos en los que existía confusión y de esta forma complementar la identificación, aunque aún quedaron algunos picos sin identificar.

En la figura 27 se muestra el difractograma correspondiente al fundente COVERAL 75, en cual no se identificó la señal ubicada en la posición $2\theta=37^\circ$; en la figura 28 se observa el difractograma del INAFUSA ITALPURO los picos que no se identificaron están en $2\theta=17^\circ$, $2\theta=31^\circ$, $2\theta=71^\circ$ y $2\theta=73^\circ$. En el difractograma del MAPRID SF 225 el pico cuya señal está en $2\theta=60^\circ$ no se identificó; en el difractograma del fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO, los picos ubicados en $2\theta=47^\circ$, $2\theta=54^\circ$ y $2\theta=61^\circ$ están asociados con ningún compuesto por lo que no fue posible su identificación.

Como puede observarse las composiciones químicas de los fundentes son muy diferentes, pero todas ellas basadas en los compuestos que se reportan en la literatura como componentes típicos de los fundentes.

Las composiciones químicas obtenidas por SEM para cada rango de tamaños, están relacionadas con los compuestos identificados y la cantidad presente, por lo que se analizaron los resultados de SEM y DR-X en conjunto, a continuación se comentan los resultados de estos análisis.

En el cuadro 5 se muestra el porcentaje en peso de los elementos presentes en los diferentes tamaños para el COVERAL 75, y en la figura 21 se observa la variación en el porcentaje de cada elemento químico identificado. El comportamiento del Oxígeno y del Sodio sigue cierta similitud en cuanto al porcentaje encontrado, excepto en el rango de (-16+20) en donde el porcentaje de Sodio aumenta comparado con el porcentaje de Oxígeno; en el caso del Potasio y el Carbono, éstos mantienen cierta similitud respecto a sus cantidades relativas, el compuesto identificado como Cloruro de Potasio KCl podría estar en mayor proporción en el rango -30+60; observando el comportamiento del Oxígeno, Azufre y Sodio se puede inferir que el Na_2SO_4 se concentra en una mayor proporción en el último tamiz -80.

El Calcio y al Flúor, tuvieron un comportamiento uniforme y muy similar aumentando el porcentaje en el último tamiz, lo que puede relacionarse con un contenido mayor de fluoruro identificado como CaF_2 . Los contenidos porcentuales de Carbono y Oxígeno, están presentes en cantidades importantes por lo que se presume que se trata de algún carbonato, que es uno de los componentes típicos de fundentes comerciales y además es uno de los compuestos reactivos que genera gases, lo cual se observó en todos los casos durante la aplicación del fundente.

En el cuadro 9 se muestran los compuestos identificados en cada uno de los fundentes. Se puede observar que los fluoruros están presentes en los cuatro fundentes, lo cual coincide con bibliografía consultada que menciona que éstos son los compuestos más efectivos utilizados en los fundentes para recuperar el Aluminio atrapado en la escoria húmeda (Anderson, 1997); el cloruro de sodio NaCl se identificó en todas las muestras y la mezcla de NaCl-KCl se presentó en dos de los fundentes.

La figura 22 presenta el comportamiento de la composición química del fundente INAFUSA ITALPURO se observó que Sodio y el Cloro, siguieron la misma tendencia encontrándose una mayor proporción en el tamiz 16, en el cual posiblemente el cloruro de sodio esté presente en mayor proporción; en cuanto al Silicio y al Flúor el porcentaje reportado fue muy bajo en este rango, quizá el compuesto presente sea el Na_2SiF_6 , y posiblemente algo de CaCl_2 en el análisis del siguiente tamiz el porcentaje de Calcio no se reportó, por lo que quizá la proporción de cloruros identificados haya disminuido; en el último tamiz el porcentaje de Flúor y Calcio aumentó considerablemente hasta un 23.9 y un 8.91 % respectivamente, por lo que probablemente exista un fluoruro de calcio o de sodio en una proporción mayor en comparación con los cloruros identificados. El porcentaje de Oxígeno y Carbono, prevalece en los tres tamices analizados, también se encontró cierto porcentaje de Aluminio.

La gráfica del fundente MAPRID SF 225 que se muestra en la figura 23, en donde el porcentaje de Potasio y Cloro en mayor proporción se encontró en la malla +16, relacionándolo con el contenido de KCl; el Flúor se presentó en forma de fluoruros de Sodio y Potasio; el NaCl tal vez esté presente en cantidades mínimas. En el rango -20+30 la cantidad de Flúor aumento en comparación con el Cloro, por lo que quizá el contenido de los fluoruros identificados haya sido mayor que en el rango anterior.

Los compuestos encontrados en mayor proporción en el tamiz 80 probablemente son el fluorosilicato de potasio K_2SiF_6 , seguido por el KCl; el porcentaje de Aluminio mostró un incremento que se asoció con el compuesto identificado como NaAlF_6 , en este tamiz probablemente se presentó una pequeña cantidad de NaCl. El porcentaje de Carbono mayor al 10% disminuyó conforme lo hizo el tamaño de partícula, el Oxígeno por el contrario aumento de acuerdo al tamaño del tamiz.

En el fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO, de acuerdo con la figura 24 el porcentaje de Carbono, Oxígeno y Calcio se mantuvo muy similar en los diferentes tamices, incluso en el tamiz más fino se observó un aumento de los tres elementos, por que puede suponerse que el contenido de CaCO_3 sea mayor en este tamaño de partícula; el porcentaje de Cl disminuyo de un tamiz a otro, mientras que el porcentaje de K y de Na siguió un comportamiento inverso. Los fluoro-silicatos de Sodio y Potasio pueden encontrarse en las mismas proporciones, existe la posibilidad de que el fundente contenga cloruro de potasio que no pudo ser identificado.

En tres de los fundentes se observó un aumento muy importante en el porcentaje de F en el retenido (-80), lo que indica que la mayor proporción de fluoruros se encuentra en las partículas más finas.

Por lo tanto al adicionar el fundente éste no posee las características deseables como son homogeneidad en el tamaño de partícula y en la composición química, que pueden afectar la eficiencia del fundente y su función dentro del proceso de limpieza (Gallo, 1999).

Para superar estos inconvenientes en la actualidad se han desarrollado fundentes granulares, que además de ofrecer ventajas técnicas son más amigables con el medio ambiente y por lo tanto los operadores pueden trabajar con un menor riesgo durante la etapa de limpieza del metal, lo más importante es que poseen una composición química consistente de un grano a otro (Brown,2000).

Al adicionar los fundentes al baño metálico se hicieron observaciones relacionadas con el tipo de reacción, humos, flama y escoria. Las muestras de la escoria fueron tomadas del contenedor metálico donde es colocada una vez que se retira de la superficie del baño; mediante la observación directa se determinó cualitativamente si la escoria era húmeda o seca.

El aspecto físico de la escoria está relacionado con la cantidad de Aluminio atrapado, si se tiene de un 60-80 % se dice la escoria es húmeda y con un valor menor al 30 % de Aluminio atrapado la escoria es seca (Gallo, 2000) en la figura 28 se presentan las fotografías de la escoria generada durante el tratamiento del metal. En el cuadro 10 se hizo un resumen acerca de la reacción generada durante la adición del fundente, así como del aspecto y características de las escorias.

Al adicionar en célula 3A, el fundente COVERAL 75 la reacción estuvo acompañada de flama, no se generó una cantidad considerable de humos ni se percibieron olores irritantes durante la agitación del baño. La escoria recolectada mostró una cantidad importante de fundente sin reaccionar formando aglomerados y observándose poco Aluminio metálico atrapado, dándole las características de una escoria seca.

Durante la adición del INAFUSA ITALPURO en las células 1A, 2A se percibieron humos y flama irritante además se observó burbujeo al agitar el baño metálico. La muestra de escoria analizada cualitativamente contenía cantidad considerable de Aluminio líquido, por lo que se clasificó como una escoria húmeda.

La escoria corresponde a la prueba realizada con el fundente MAPRID SF 225 en la célula 3A* se adhirió a las paredes del horno formando aglomerados y generando muy poca cantidad de Aluminio atrapado, por lo que se consideró como una escoria seca y en poca cantidad.

En las células 2B, 3B se probó el fundente PROVEEDORA DEL BAJÍO, la reacción generada fue muy violenta seguida por la presencia de una flama, no se percibieron humos irritantes. La escoria mostró poco Aluminio atrapado así como muy poco remanente de fundente el aspecto que se observa es el de una escoria seca y poco abundante.

El fundente MAPRID SF 225 al adicionarse al baño produjo poca o casi nula cantidad de humos y olor irritante, además la escoria que se generó tuvo muy poco contenido de Aluminio líquido en comparación con el resto de las escorias.

Este análisis cualitativo de la escoria generada durante la experimentación permitió conocer cuáles son las características de una escoria húmeda y de una escoria seca, la importancia de esto radica en que la escoria es considerada el mayor contribuyente de la pérdida de metal durante el proceso de fundición, y la cantidad de ésta puede disminuirse si se adicionan fundentes desdescorificantes y mejorando las prácticas de fusión (Crepeau, 1995).

Cuantificación de defectos

Durante la experimentación se tomaron probetas para cuantificar el contenido de defectos antes y después del tratamiento de limpieza utilizando cada uno de los fundentes proporcionados por la planta.

Para realizar la cuantificación de defectos se obtuvieron las microfotografías en el microscopio óptico utilizando una magnificación de 150 X para tener un área mayor de análisis en cada una de las muestras metálicas. Una vez teniendo las microfotografías éstas se procesaron con la rutina establecida en el analizador de imágenes Aphelion (versión 3.1 e), obteniéndose los resultados que se observan en el cuadro 11.

Como puede verse en la figura 29 la muestra tomada de la célula 1A después de haberse realizado el tratamiento de limpieza con el fundente INAFUSA ITALPURO presentó mayor número de defectos/ μm^2 .

Lo mismo ocurrió con las muestras 2B y 3B, en las cuales el fundente adicionado fue el de PROVEEDORA DEL BAJÍO y las gráficas correspondientes se observan en la figura 33-34. En el resto de las muestras el número de defectos/ mm^2 disminuyó muy poco, siendo considerable el resultado en la muestra 3A* en donde se probó el fundente MAPRID SF 225 encontrándose antes del tratamiento 3.71/ μm^2 defectos y después 1.38/ μm^2 .

En célula 2 A se adicionó el fundente INAFUSA, y en la 3A se probó el COVERAL 75, sin encontrarse un cambio muy significativo como se espera suceda al finalizar con la etapa de limpieza del Aluminio.

Al cuantificar los defectos en el analizador de imágenes también fue posible calcular el área ocupada de cada uno la finalidad de compararse con el criterio establecido en la planta para la aceptación o rechazo de las piezas, en el análisis de las muestras fue necesario establecer un criterio propio en el cual los defectos con áreas mayores a 1000 μm^2 , se consideran importantes.

La gráfica que corresponde a la muestra 1A se observa en la figura 29, en la cual la distribución del tamaño de defectos antes del tratamiento y después fue muy similar, se observó que la cantidad de defectos con un área mayor a 1000 μm^2 fue mínima en comparación con el número de defectos de área menor.

La gráfica de la figura 30 corresponde a la muestra 2A en donde el la distribución del tamaño de los defectos es la misma: muy pocos poros con un área mayor 1000 μm^2 , y una cantidad mayor de poros con áreas menores.

En la figura 31 se muestra la gráfica que pertenece a la muestra 3A, en la cual se encontró que la mayoría de los defectos tuvieron un área menor a 1000 μm^2 , y muy pocos estuvieron por encima de este valor.

En esta muestra se observó que el tratamiento de limpieza tuvo un efecto favorable en la eliminación de defectos ya que el número de poros disminuyó de $5/\mu\text{m}^2$ - $4/\mu\text{m}^2$ después de haberse llevado a cabo este procedimiento.

La siguiente gráfica (figura 32) que corresponde a la muestra 2B, muestra varios defectos con un área mayor a los $1000 \mu\text{m}^2$, y se siguió presentando el mismo comportamiento que en la muestra 1A en donde la cantidad de defectos encontrados después del tratamiento aumentó considerablemente, aunque el tamaño de estos fue menor a $1000 \mu\text{m}^2$.

El comportamiento que se observa en la figura 33, corresponde a la muestra 3B en donde el número de defectos encontrados con área menor a $1000 \mu\text{m}^2$, es mucho mayor que el que se encuentra por encima de este valor.

La muestra 3 A* exhibió un comportamiento en el que el número de defectos con un área mayor a $1000 \mu\text{m}^2$, es muy similar antes y después del tratamiento, mientras que los defectos con área menor a $1000 \mu\text{m}^2$ disminuyen de manera muy importante al realizarse el tratamiento.

En general, no se observaron cambios notorios en las probetas obtenidas antes y después del tratamiento con los fundentes. En el caso del fundente MAPRID SF 225 se observaron mejoras, mientras que en el INAFUSA y PROVEEDORA DEL BAJÍO sucedió lo contrario y para el caso del COVERAL 75 no se tuvieron cambios significativos.

Estos resultados no coinciden con lo esperado en lo relacionado a la presencia de defectos, sin embargo, considerando otras funciones del fundente como protección contra la oxidación y recuperación de metal de la escoria, se observa que la aplicación de los fundentes: COVERAL 75, MAPRID SF 225 y el PROVEEDORA DEL BAJÍO tienen la ventaja de generar escoria seca.

Por otro lado, el hecho de que no se aprecien diferencias importantes en la cantidad de defectos en las probetas de antes y después de los tratamientos no significa que los fundentes probados en planta no tengan un impacto en la eliminación de los mismos, ya que su efecto está relacionado con factores importantes como el método de adición, la temperatura del baño, una agitación y tiempo de permanencia adecuados (Aluminum Permanent Mold).

Los defectos en las fundiciones de Aluminio generalmente tienen varios orígenes: inclusiones (limpieza del metal), contracción, porosidad, velocidad de enfriamiento, hidrógeno disuelto y combinaciones de estos. Las condiciones de tratamiento de desgasificación y de solidificación fueron las mismas, esperando con este trabajo analizar solamente el efecto de la limpieza del metal.

VII CONCLUSIONES

- La caracterización completa de un fundente debe considerar aspectos físicos como la distribución del tamaño de partícula, morfología e identificación de componentes, por los efectos que estos factores tienen sobre la efectividad y eficiencia de un fundente.
- El análisis químico cualitativo en los fundentes es muy complicado por la cantidad de compuestos que se encuentran mezclados, lo que hace necesario utilizar diversas técnicas de caracterización para complementar la información y lograr una identificación más completa.
- Todos los fundentes probados mostraron una distribución de tamaño de partícula muy amplia, con tamaños de partícula menores de 2 mm.
- La composición química de los cuatro fundentes fue muy distinta, identificándose principalmente fluoruros, cloruros, sulfatos, carbonatos y sílice. Los compuestos identificados en todos los fundentes coinciden con lo reportado en la literatura para la formulación de estos.
- Para un mismo fundente, las proporciones de los compuestos que lo conforman, varía con el tamaño de partícula, encontrándose diferencias en la composición química de una malla a otra.
- Todos los fundentes aplicados en planta, excepto el INAFUSA ITALPURO generaron una escoria seca. El MAPRID SF 225 se considera el mejor fundente al observarse una reacción poco violenta con una emisión de humos casi nula y mostrando una escoria seca.
- Ninguno de los fundentes mostró mejoras importantes en la limpieza del metal, considerando el número de defectos y área ocupada por los mismos, antes y después de su aplicación. Para una evaluación de los fundentes más exhaustiva, es necesario realizar una serie experimental mucho más amplia, donde también se consideren variables del proceso y no únicamente las condiciones normales que utiliza la planta como se hizo en el presente trabajo.

VIII BIBLIOGRAFIA

Aluminum Permanent Mold Handbook, 2001. American Foundry Society. Des Plaines, IL. USA, pp. 3-2—3-4.

ASM Handbook, 1998. The materials society. Vol. 15, Casting, pp. 445-448.

Avner, S.H.,1988. Introducción a la metalurgia física. 2da edición. Mc Graw Hill, México, pp. 477-488.

Brown, J.R.,1999. Foseco non ferrous Foundryman's Handbook. 3th edition. Butterworth Heinmann, Oxford, USA, pp.56-61.

Chapman& Hall, 1997. The materials selector, Vol. 2. 2nd edition. Great Britain, pp.383-385,394-396, 421-425.

Cochran, B.P., Fenyés, M.L, Jeanneret J.L., Mulac, R.P., Crepeau, P.N.,1992. "Flux practice in Aluminum Melting", AFS Transactions, USA, pp.92-98.

Crepeau, P.,1995. "Molten Aluminum contamination, gas, inclusions and dross." Materials engineering dept GM power train, group.

Degamo, P.E., Black, J.T., Kohser, R.A., 2002. Materials and process in manufacturing. 9th edition, Wiley International edition, USA, pp.131-137.

Flores, Valdes, 1997. "A comparative study on the efficiencies of Na_2SiF_6 and AlF_3 for demagging molten aluminium by submerges injection", The minerals, metals and materials society, Light Metals, pp.879-884.

Frank, K., 1992. El aluminio y sus aleaciones.. 1ª edición. Grupo Noriega Editores, México, pp.107-110.

Friesen, K.J., Utigard, T.A., 1997. "Coalescence behaviour of Aluminum droplets under a molten salt flux cover", The minerals, metals and materials society, Light Metals, pp.857-861.

Frisvold, F., Engh, T.A., Johansen, S.T. , Petersen, T. 1992." Removal of inclusions. A survey and comparison of principles", The minerals, metals and materials society, Light Metals, pp. 1125-1131.

Gallo, R. 1997. "Development, evaluation and application of granular and powder fluxes in transfer ladles, crucible and reverberatory furnaces", FOSECO Inc., Cleveland OH. USA.

Goldstein, J.I. 1984, Scanning Electron Microscopy and X –Ray Microanalysis. 1st edition. Ed. Newbury Dale, New York, USA, pp. 275-286,447-452.

Gruzleski, J.E., Closset, B.M. 1990. The treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys. 1a edición. AFS, Des Plaines IL, USA, pp.203-209.

King, S., Reynolds, J., 1995. "Flux Injection, rotary degassing process provides cleaner aluminium". Modern Casting, pp. 561-564.

Mangonon, P.L. 2001. Ciencia de los materiales, selección y diseño. 1ª edición. Prentice Hall, México, pp.540-546.

Manzano,R.A., 1997. Tratamiento del Aluminio líquido. 1ª edición. Sociedad Mexicana de Fundidores, A.C. México, pp.10-13,21-23.

Martínez, L. 2002. Reducción de mermas durante la fusión de aleaciones Al-Si en horno de reverbero. Saltillo, Coahuila. CINVESTAV Unidad Saltillo. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica, pp.6-15.

Metals Handbook, 1998. Desk edition, 2nd edition. Copyright USA. Edited by JR. Davis & associates, pp. 417-423,484-489.

Theff, D.V., 1995 “ The benefits of flux injection combined with rotor dispersion for producing clean aluminium casting alloys.”

Utigard, T.A. 2001. “Properties of fluxes used in molten Aluminum processing”. Materials Science and Engineering, University of Toronto, Canada.

Ye, Jian, Yogeshwar, S., Revet, A., 1996. “Effect of impurities in industrial salts on Aluminum scrap melting”, The minerals, metals and materials society, Light Metals, pp. 1225-1229.

Yogeshwar, Sahai.1993. “Role of molten salts in secondary remelting”. Aluminum Melt Treatment and Casting. The minerals, metals and materials society, Light Metals.