



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE QUÍMICA

RECICLADO DEL CUERPO DE LATAS DE BEBIDA DE ALUMINIO EN UN  
HORNO DE REVERBERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A:

OSWALDO CANO VARGAS



MÉXICO, D.F.

2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO**

**VOCAL:**                   **Profesor: CARLOS GONZALEZ RIVERA**

**SECRETARIO:**           **Profesor: ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA**

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor: LUIS DARIO ESCOBAR MEJIA**

**2° SUPLENTE:**           **Profesor: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**UNAM**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA**

**LABORATORIO DE FUNDICION.**

**ASESOR DEL TEMA: DR. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA** \_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO: M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO** \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE: OSWALDO CANO VARGAS** \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS.**

A Dios por darme la fortaleza, la capacidad y la sabiduría durante el tiempo de estancia en la Universidad, por otorgarme una segunda oportunidad de vida y sobre todo pertenecer a una familia que me brindo siempre su apoyo aun en circunstancias adversas, pero siempre confiando en ti Señor gracias.

A mi padre José Cano Navarrete ya que, con el conocimiento adquirido en su vida, supo transmitirme toda la sabiduría con la que él contaba y con esa paciencia que lo caracterizaba, por todo ese esfuerzo que realizabas como jefe de familia para que no faltara nada en casa, que el señor te tenga en su santa gloria gracias padre querido.

A mi madre María Luisa Vargas Saldívar que gracias a su temperamento y confianza junto con mi padre realizaron un gran esfuerzo que me permitió seguir estudiando adquiriendo con ello un gran compromiso de parte mía y teniendo como resultado lo que hasta ahora he logrado, agradezco su templanza ya que gracias a ella logramos salir adelante cuando se nos presentó una amarga experiencia pero a la vez bendita ya que nos ayudó a reafirmar nuestra fe y apoyo como familia, muchas gracias mama Dios te bendiga.

A mi hermano José Luis Cano Vargas por sus consejos y por su apoyo académico y moral, ya que siempre demostró ser un ejemplo a seguir para mi hermana y para mí.

A mi hermana María de Lourdes Cano Vargas por ser mi confidente en la buenas y en las malas y por sus palabras de aliento que me ofrecía cuando más las necesitaba.

A mi hijo Aldo Imanol López Cano por ser un estímulo en mi vida y que a pesar de su corta edad sabe lo que representa este logro para mí.

A mi buen amigo, compañero fiel, mi perro Shaggy, a quien veía dormir mientras escribía este trabajo.

A mis profesores de carrera que indudablemente sin sus conocimientos no habría logrado nada, en especial al Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda por haberme dado la oportunidad de pertenecer al equipo de fundición, y por su conocimiento transmitido. Al maestro Agustín Gerardo Ruiz Tamayo por su apoyo incondicional y ser parte importante para la culminación de este trabajo.

A mis compañeros: Jorge Fragoso, Saúl Arellano, Edgar García, Ernesto Juárez, Jaime Romero, Emilio Enríquez, Fernando Flores, Sergio Galicia, Abel Eslava, Felipe Patricio, Armando, Iván Muñoz García (te extrañamos). Y a los que me faltaron muchas gracias por sus palabras y por su inquebrantable amistad nunca los olvidare.

Especialmente a:

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de pertenecer a ella de forma directa a la Facultad de Química, logrando una superación académica y personal, es un orgullo ser universitario.

A mi asesor, Dr. Adrián Manuel Amaro Villeda por su tiempo y dedicación para este trabajo.

A mi asesor técnico, M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo por su apoyo y su invaluable tiempo para la realización de este proyecto, gracias hermano. A los miembros del jurado por el tiempo, interés y comentarios:

I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco.

Dr. Carlos González Rivera.

Cuándo pensamos que las cosas van mal y nos preguntamos ¿por qué yo? Confiemos en el por qué todas las cosas las tiene bajo control.

**¡GRACIAS POR TODO SEÑOR!**

## INDICE.

<b>POSICION DEL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS E HIPOTESIS.....</b>	<b>6</b>
<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
1.1 Características del aluminio.....	9
1.2 Áreas de aplicación.....	11
1.3 Clasificación de aleaciones trabajadas de aluminio.....	11
1.4 Características de las aleaciones principales.....	12
1.5 Fabricación de latas de aluminio para bebida.....	13
1.6 Reciclado de aluminio.....	16
1.7 Clasificación de la chatarra.....	16
1.8 Reciclado de circuito abierto.....	17
1.9 Reciclado de circuito cerrado.....	17
1.10 Método ALCOA.....	17
1.11 Recubrimientos empleados en las latas de aluminio.....	18
1.12 Tipos de hornos empleados para el reciclado de aluminio.....	21
1.13 Tipos de flama.....	25
1.14 Escorias.....	30

<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>32</b>
2.1 Preparación del bote de aluminio .....	32
2.2 Preparación de la carga del bote de aluminio en el horno de reverbero.....	33
2.3 Instrumentación del horno de reverbero.....	34
2.4 Fusión del bote de aluminio en el horno de reverbero.....	35
2.5 Fusión de 8Kg de lingote con pintura y con pintura parcialmente quemada.....	37
2.6 Análisis químico.....	38
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Determinación del peso del bote de aluminio.....	39
3.2 Evaluación de la eficiencia de recuperación de aluminio en el horno de reverbero.....	42
3.3 Cinética de oxidación.....	44
3.4 Incremento de la concentración de titanio en el aluminio reciclado por la pintura del bote.....	48
3.5 Manganeso.....	53
<b>4. ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1 Eficiencia en el horno de reverbero para la recuperación de aluminio.....	58

4.2	Oxidación del magnesio.....	59
4.3	El titanio en la composición química.....	61
4.4	El manganeso en la composición química.....	61
	<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
	<b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>64</b>
	<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>66</b>
7.1	Composiciones químicas de las latas de aluminio de bebidas analizadas .....	66
7.1.1	Bote con pintura.....	66
7.1.2	Bote con pintura parcialmente quemada.....	67
7.1.3	Lingote más bote con pintura.....	68
7.1.4	Lingote más bote con pintura parcialmente quemada.....	69

## **POSICION DEL PROBLEMA.**

El aluminio es de los materiales más fácilmente reciclables, sus temperaturas de fusión son mucho menores a las utilizadas para fundir o reciclar acero. La inversión para reciclar aluminio cuesta una tercera parte de lo que cuesta reciclar PET (el tereftalato de polietileno comúnmente llamado PET por sus siglas en inglés es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas), y esto se debe a que para reaprovechar este metal se utiliza un proceso físico más que químico, por ello es uno de los residuos inorgánicos mejor pagados.

La fundición de aluminio reciclado es un proceso bastante bondadoso con la naturaleza, a pesar de necesitar mucha energía para llevarlo a cabo, al ser un elemento que se puede reciclar cuantas veces se requiera y no perder sus propiedades. De todos los productos fabricados con aluminio, las latas de bebida son de las más comunes y su uso se ha vuelto cotidiano. En nuestro país se consumen 15 millones 400 mil latas por día equivalentes a 240 toneladas diarias.

Un kilo de bote de aluminio está formado por aproximadamente 65 latas de 355 ml, y casi el 99% de todas las latas de cerveza y el 97% de las latas de refrescos son de aluminio, pero sólo la mitad se recupera para su reciclaje. En la actualidad, se han implementado nuevas tecnologías para el reciclado de latas de aluminio que sean amigables con el medio ambiente, para este propósito se implementan varios pasos, dos de los más importantes son: el acopio y la clasificación los cuales serán esenciales para la mayor recuperación en el reciclado. Uno de los problemas principales al que se enfrenta el reciclado de latas de aluminio es la gran cantidad de escoria que se genera por la pintura durante la fusión.

El presente trabajo busca evaluar el efecto de reciclar el cuerpo de la lata usando dos técnicas de fusión: La primera es fundiendo solo pacas de cuerpo de latas de aluminio con las dos variantes (con pintura y con pintura parcialmente quemada proveniente del horno rotatorio) y la segunda fundiendo primero 8 Kg. de lingote con la composición del cuerpo para tener casi la mitad de la capacidad del horno de reverbero con metal líquido y después fundir las pacas de aluminio (con pintura y con pintura parcialmente quemada proveniente de un horno rotatorio) con la finalidad de determinar la eficiencia de reciclado del cuerpo del bote de aluminio.

Para que los experimentos sean reproducibles y controlados se instrumentó el horno de reverbero con termopares, los cuales se colocaron en las dos cámaras del horno y estos a su vez conectados a un adquisidor de datos.

Otro factor importante que se evaluó fue la cinética de oxidación del elemento más importante en esta aleación AA3004, que es el magnesio, para determinar si es posible obtener esta misma aleación nuevamente y determinar también cuál de las dos técnicas antes mencionadas es la mejor para el proceso de reciclaje.

## **OBJETIVOS E HIPOTESIS.**

### **METODOLOGIA GENERAL**

- 1) Reciclar el envase de bebida de aluminio sin tapa de 355ml en un horno de reverbero bajo diferentes condiciones.

### **METAS PARTICULARES**

- 1.- Determinar el efecto y la conveniencia o no de aplicar un tratamiento térmico previo al bote de aluminio para eliminar parcialmente la pintura que influya sobre la eficiencia de recuperación del metal.
- 2.- Establecer el efecto y la conveniencia o no de tener un baño fundido previo en el horno de reverbero, antes de alimentarlo con las pacas de bote.
- 3.- Establecer el efecto de los dos puntos anteriores sobre la capacidad de oxidación del Magnesio.
- 4.- Proponer en consecuencia la mejor técnica de fusión de acuerdo con la infraestructura disponible.

### **HIPOTESIS.**

- El reciclado de las pacas del cuerpo de bote de bebida de aluminio con pintura en un horno de reverbero, generan mayor cantidad de escoria en comparación con las pacas con pintura parcialmente quemada, y en consecuencia menor recuperación de aluminio y menor eficiencia.
- La eficiencia del reciclado del cuerpo de bote de aluminio será mayor en un horno de reverbero teniendo al inicio del reciclaje, la mitad de su capacidad del horno con metal fundido que partiendo sin metal fundido.

## **1. ANTECEDENTES.**

El reciclaje de chatarra de aluminio tiene un importante significado en la cuestión de economía energética, ambiental y las implicaciones de ahorro de recursos. En comparación con la producción de aluminio primario, el aluminio reciclado tiene una gran ventaja debido a que su costo de producción es considerablemente menor. Para un reciclado eficiente la industria enfrenta varios problemas que incluyen el muestreo de chatarra, la compra, la recuperación, rendimiento, producción, costo, calidad del producto, problemas ambientales y regulación.

El aluminio es 100% reciclable sin merma de sus cualidades físicas, y su recuperación por medio del reciclaje se ha convertido en una faceta importante de la industria del aluminio. El reciclaje del aluminio tuvo una actividad baja hasta finales de los años sesenta, cuando el uso creciente del aluminio para la fabricación de latas de refrescos trajo el tema al conocimiento de la opinión pública.

Al aluminio reciclado se le conoce como aluminio secundario manteniendo sus mismas propiedades. La composición química de los productos de aluminio en el proceso de fundición es controlada no sólo por la operación del proceso, sino también en gran medida por la selección apropiada de la chatarra de aluminio. Desafortunadamente, debido a la alta reactividad del aluminio, su rendimiento es una función de numerosos parámetros tales como volumen de relación (debido a la superficie oxidada), forma de la chatarra, el tipo de aleación, historia de la chatarra, contaminantes (por ejemplo, óxidos, agua, aceite, pintura, y aceros) y cantidad de aditivos durante el proceso de fusión. Por ejemplo, cualquier aumento en el nivel de contaminación en la chatarra reduce la recuperación debido a que podría existir una reacción con aluminio y reducir aún más el rendimiento del metal.

En el depósito de chatarra, los materiales generalmente se identifican por su uso, color, densidad aparente. En el horno de fundición secundaria, la recuperación y rendimiento de metal pueden variar según la calidad del material de carga y la carga mal clasificada puede en cierta medida ampliar el rendimiento de metal.

Sin embargo, el rendimiento de metal representa el porcentaje recuperado de la masa total de la chatarra de metal. Normalmente, el rendimiento de metal es inferior a la masa total de chatarra, debido a los diferentes contaminantes y pérdidas durante la fusión. En la producción de aluminio secundario, es muy importante hacer hincapié en estos términos con el fin de obtener una interpretación exacta de los resultados y para optimizar los hornos y la planta completa si así fuera el caso.

El aluminio se ha reciclado desde que fue producido comercialmente, y hoy la producción secundaria representa alrededor de un tercio del consumo mundial de aluminio. Hay un importante ahorro de energía en aluminio reciclado, usando un 5% de la energía necesaria para producir aluminio primario. En el mundo occidental las tasas de reciclaje son altas, que van desde 60% para latas de bebidas usadas, a 85% en la construcción y el 95% en el transporte. La calidad de aluminio no es deteriorada por el reciclaje, pueden ser reciclados en varias ocasiones y, por lo tanto, conserva un valor alto de chatarra. Casi el 100% de los desechos derivados de la fabricación de productos de aluminio se recicla.

El uso predominante (aproximadamente 70%) de aluminio reciclado es en la producción de aleaciones de fundición de aluminio-silicio utilizado sobre todo en la industria automotriz. La producción mundial de aluminio en 1990 era de unos 28 millones de toneladas, y unos 8 millones de toneladas era de chatarra reciclada. Hoy el total es de unos 56 millones de toneladas, de los cuales unos 18 millones de toneladas son de

chatarra reciclada. Para el año 2020 se calcula que se hayan incrementado estos niveles a 96 millones de toneladas (con unos 31 millones toneladas de chatarra recicladas). [5]

El número de empresas involucradas en aluminio secundario es significativo en comparación con el relativamente bajo número de productores primarios. Esto ha ocurrido en parte como resultado de requerimientos localizados para el reciclaje.

En México como a nivel mundial una de las industrias de mayor auge en las últimas décadas es la dedicada al reciclaje, debido al precio y la disponibilidad de la materia prima, además de lo económico y rentable de los procesos utilizados.

La industria de los Envases Metálicos data de hace poco más de 100 años, México se ha caracterizado como uno de los países a la vanguardia tecnológica; tan solo en los últimos cinco años, el sector de fabricantes de envases y tapas metálicas ha invertido más de 300 millones de dólares para modernizar su planta productiva. Nuestro país produjo en 2007 un total de 14 mil 129 millones de latas [4], año durante el cual se calcula que el promedio de consumo de latas fue de 113 por habitante. La industria vende alrededor de dos mil 500 millones de dólares en latas anuales, de los cuales 15% son exportaciones a Estados Unidos y Centro América.

### **1.1 Características del Aluminio.**

El aluminio ocupa el tercer lugar en abundancia en la tierra con 7.5 a 8.0%, solo atrás del oxígeno y del silicio. [1] Colocándolo también en cantidad como el segundo metal usado en el mundo, solo atrás del hierro. Es un buen conductor del calor y la electricidad, y es resistente a la oxidación, es ligero, no toxico, puede tomar casi cualquier color y textura, pero en estado puro tiene unas propiedades mecánicas bajas.

El término de metal ligero, ha sido dado tradicionalmente al aluminio y magnesio porque son usados frecuentemente para reducir el peso de componentes y estructuras. Por ejemplo, el aluminio tiene una densidad de aproximadamente una tercera parte que la del acero, que tiene una densidad de  $7.8 \text{ gr/cm}^3$ . En la **Tabla 1.1** se muestran algunas de las propiedades físicas más comunes del aluminio.

Aunque el aluminio se puede extraer de la bauxita, también se puede obtener del reciclado mismo. Solo un 5% de la energía necesaria para obtenerlo a través del mineral es utilizada para obtenerlo por medio de la chatarra. Debido a este ahorro de energía, el aluminio es hoy obtenido en gran parte por medio del reciclado.

**Tabla 1.1** Propiedades físicas más comunes del aluminio.

Numero atómico	13.0
Peso atómico	26.981
Estructura cristalina	F.C.C.
Densidad ( $\text{gr/cm}^3$ )	2.7
Punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	660
Módulo de elasticidad (MPa)	70
Calor específico prom, 0-100 $^{\circ}\text{C}$ ( $\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	917
Conductividad térmica 20-100 $^{\circ}\text{C}$ ( $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	238
Coef. De exp. térmica 0-100 $^{\circ}\text{C}$ ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	23.5
Resistividad eléctrica a 20 $^{\circ}\text{C}$ ( $\mu \text{ ohm cm}^{-1}$ )	2.67

## **1.2 Áreas de aplicación.**

El aluminio se utiliza principalmente en cuatro áreas que son: la construcción, en recipientes y empaquetadores, en transportación y en aplicaciones eléctricas. [1]

En construcción se usa para puentes, edificios, torres y tanques de almacenamiento en diseños arquitectónicos donde se requiera bajo peso y resistencia a la corrosión. En recipientes y empaquetadores para la industria de la comida, bebidas y la farmacia porque no es tóxico, no se pega, es resistente al desgarramiento, evita el crecimiento de bacterias y se puede limpiar. En transportación para muchas partes del motor tales como pistones, bielas, cabezas, escape de gases, manivelas y carburadores entre otros, en la industria aeronáutica y mucho más. En aplicaciones eléctricas se basa en la combinación de bajo costo, alta conductividad eléctrica, resistencia mecánica, bajo peso y excelente resistencia a la corrosión y se usa en conductores eléctricos, motores, generadores, transformadores y en luminarias entre otros.

## **1.3 Clasificación de aleaciones conformadas de aluminio.**

El aluminio primario está constituido de una determinada pureza la cual es un material relativamente débil. Para aumentar las propiedades mecánicas el aluminio se tiene que alea con otros elementos como el cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc entre otros.

Se han diseñado un gran número de aleaciones para satisfacer necesidades específicas y las principales aleaciones están dentro de una serie de normas nacionales e internacionales que especifican sus composiciones y propiedades mecánicas. Estas normas se dividen en dos grupos principales, uno es el que se usa para vaciados y el otro se emplea para fabricar formas conformadas. Las aleaciones para vaciados se indican por las designaciones BS1490LM y las aleaciones conformadas, mediante un

acuerdo internacional de un sistema de cuatro dígitos de los cuales el primero de ellos indica el elemento principal de la aleación dentro del grupo como se puede ver en la

**Tabla 1.2.**

**Tabla 1.2** Aleaciones de Aluminio (Nomenclatura)

1XXX	Aluminio con un mínimo de pureza del 99.00%
2XXX	Aleaciones Aluminio-Cobre
3XXX	Aleaciones Aluminio-Manganeso
4XXX	Aleaciones Aluminio-Silicio
5XXX	Aleaciones Aluminio-Magnesio
6XXX	Aleaciones Aluminio-Magnesio y silicio
7XXX	Aleaciones Aluminio-Zinc
8XXX	Aleaciones Mixtas

Las aleaciones relacionadas en la tabla anterior se pueden trabajar en frío o se les puede aplicar algún tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas. A las aleaciones 1XXX, 3XXX y 5XXX, habitualmente no se les realiza ningún tratamiento térmico (laminándose en frío), todo lo contrario, para las aleaciones 2XXX, 6XXX y 7XXX que dependiendo del uso de la aleación se le aplica un tratamiento específico.

**1.4 Características de las aleaciones principales.**

Serie 3xxx. En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Mn. Estas aleaciones tan solo tienen un 20% más de dureza que el aluminio puro. Eso es porque el Mn solo puede añadirse de forma efectiva en solo un 1.5%. Por ello hay muy pocas aleaciones de esta serie. Sin embargo, los aluminios 3003, 3004 y 3105 son muy

usados para fabricar utensilios que necesiten dureza media y que sean fáciles de trabajar para fabricarlos como son latas para bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas.

Serie 5xxx. Esta serie usa como principal elemento aleante el Mg y a veces también se añaden pequeñas cantidades de Mn cuyo objetivo es el de endurecer el aluminio. El Mg es un elemento que endurece más el aluminio que el Mn (Un 0.8% de Mg produce el mismo efecto que 1.25% de Mn) y además se puede añadir más cantidad de Mg que de Mn. Las principales características de estas aleaciones son una media a alta dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en ambiente marino y una baja capacidad de trabajo en frío.

Estas características hacen que estas aleaciones se usen para adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos, en el hogar, iluminación de las calles y carreteras, botes, barcos y tanques criogénicos, partes de puentes grúa y estructuras de automóviles. [2]

### **1.5 Fabricación de latas de aluminio para bebida.**

Las latas de aluminio constan principalmente de dos partes, la tapa que es la aleación AA5182 cuyos elementos principales son: 0.35% Mn, 4.50%Mg y el cuerpo cuya aleación es AA3004 y cuyos elementos principales son: 1.25%Mn, 1.05% Mg. El proceso de fabricación comienza con bobinas de aluminio, las cuales llegan a la planta y se cargan uno a la vez sobre un "uncoiler", es una máquina que desenrolla la tira de aluminio en el comienzo de la línea de fabricación de latas.

Una gran máquina llamada prensa catación se inicia el proceso de conformado de la lata. La prensa corta discos circulares de la hoja de aluminio y los forma en copas

superficiales. Las copas caen de la prensa sobre la transportadora taza. Estas dos operaciones de formación de metales se llevan a cabo a altas velocidades y hacen 2.500 a 3.750 copas por minuto.

La copa es transportada a la máquina de estiramiento de pared, desde la parte superior. La máquina primero empuja a través del anillo para reducir su diámetro mientras que conserva el espesor de la lámina.

Las latas pasan a una impresora, donde seis a ocho colores de tinta se pueden colocar en una lata al mismo tiempo. La lata se da vuelta conforme se aplica la etiqueta. Finalmente, se aplica un recubrimiento que hace que el exterior de la lata sea brillante y protege la pintura recién aplicada.

A continuación, la lata pasa a un horno, donde la pintura y el revestimiento se cura en la lata para evitar que se astille.

Finalmente, la lata se introduce en un horno de nuevo para sellar el revestimiento sobre la lata.

Las tapas de las latas, se hacen por separado y se envían a las compañías de refrescos. Al igual que la fabricación del cuerpo de la lata, el trabajo final comienza con una bobina de aluminio.

A continuación, una máquina hace que un botón en el extremo donde una lengüeta de apertura fácil se puede asegurar en su lugar. La ficha de fácil apertura permite que se abra el refresco en lata simplemente tirando y empujando la lengüeta. [3]

## ALEACIONES PARA EL BOTE DE ALUMINIO

**Tabla 1.3** Composición química y propiedades físicas para la aleación AA3004.

<b>Cuerpo del bote</b>		<b>Propiedades físicas</b>	
Elemento	Composición química (%)	Densidad	2.72 gr/cm <sup>3</sup>
Si	0.3	Módulo de Elasticidad	69 GPa
Fe	0.7	Rango de Fusión	629-654°C
Cu	0.25	Conductividad Térmica a 25°C	164 W/mK
Mn	1.0 – 1.5	Resistividad a 20°C	0.041x10 <sup>-6</sup> Ωm
Mg	0.8 – 1.3		
Zn	0.25		
Ti	0.1		

**Tabla 1.4** Composición química y propiedades físicas para la aleación AA5182.

<b>Tapa del bote</b>		<b>Propiedades físicas</b>	
Elemento	Composición química (%)	Densidad	2.65 gr/cm <sup>3</sup>
Si	0.2	Módulo de Elasticidad	71 GPa
Fe	0.35	Rango de Fusión	580-636°C
Cu	0.15	Conductividad Térmica a 25°C	121 W/mK
Mn	0.2 – 0.5	Resistividad a 20°C	0.056x10 <sup>-6</sup> Ωm
Mg	4.0 – 5.0		
Zn	0.25		
Ti	0.1		

Existe una gran variedad de productos de aluminio con propiedades y requerimientos de calidad muy diferentes, por lo que se han creado numerosos estándares y clasificaciones que facilitan su comercio, aseguran que el aluminio cumple con la calidad requerida y aportan información técnica sobre los materiales, procesos y sus funciones. [4]

## **1.6 Reciclado de Aluminio.**

El aluminio se ha reciclado desde que este metal comenzó a ser utilizado comercialmente en las décadas de apertura del siglo XX. Desde entonces se han establecido un gran número de lugares para refundirlo, convirtiendo la chatarra de aluminio en un nuevo lingote, desoxidantes para la industria del acero y aleaciones maestras. El reciclaje es una consideración importante en uso continuo de aluminio, que representa uno de los atributos clave de este metal, con profundas implicaciones económicas, ecológicas y sociales.

El residuo de aluminio es fácil de manejar porque es ligero, no es inflamable y no se oxida y también es fácil de transportar. El aluminio reciclado es un material cotizado y rentable. El reciclaje de aluminio produce beneficios ya que proporciona ocupación y una fuente de ingresos para mano de obra no calificada.

Para proceder al reciclaje del aluminio primero hay que realizar una revisión y selección de la chatarra según su análisis y metal recuperable para poder conseguir la aleación deseada. [5]

## **1.7 Clasificación de la chatarra.**

Una amplia variedad de chatarra de aluminio es procesada por la industria secundaria.

La chatarra nueva es material sobrante que surge durante la producción y fabricación de productos de aluminio hasta el punto donde se venden al consumidor final, como por ejemplo rodajes, fresados y escoria podrían describirse como chatarra nueva.

Chatarra vieja es el material de aluminio que se recupera después de que un producto de aluminio o componente ha sido producido, utilizado y finalmente recolectados para su reciclaje. Chatarra vieja podría ser una lata usada de bebida de aluminio, una culata de auto, marcos de ventanas o cable conductor eléctrico.

La chatarra preferiblemente se compactará, generalmente en cubos o briquetas o se fragmentará, lo cual facilita su almacenamiento y transporte. La preparación de la chatarra descartando los elementos metálicos no deseados o los inertes, llevarán a que se consiga la aleación en el horno de manera más rápida y económica. [6]

### **1.8 Reciclado de circuito abierto.**

El reciclaje de circuito abierto es donde los desechos de todo tipo se quitan y rehacen en una variedad de diferentes productos para su uso por la empresa. Básicamente, el reciclaje de circuito abierto es donde una amplia gama de tipos de productos se recicla, y vuelven en una amplia gama de productos de mercado específicos, y sirven a sus usos finales. En estos procesos se tiene un beneficio ecológico y económico.

Por ejemplo, una empresa puede enviar una serie de plásticos consumidos por la empresa, tales como embalajes, recortes, bienes dañados y conexiones redundantes para ser reciclados, y se tiene plástico reciclado de nuevo.

### **1.9 Reciclado de circuito cerrado.**

El reciclaje de circuito cerrado es donde productos utilizados o dañados se rehacen en él y regresan proveyendo un sustituto de alta calidad sin costos de los materiales extra.

La diferencia con el reciclaje de circuito abierto es que aquí la chatarra es pre-clasificada y se logra el mismo producto que era antes, por ejemplo, latas de gaseosa viejas en latas de gaseosa nuevas y latas de pintura viejas en latas de gaseosa nuevas; sin mezclar. [7]

### 1.10 Método ALCOA.

El método ALCOA, es el proceso más aceptado para preparar las latas de aluminio para la fusión. [3]

Uno de los problemas que se presenta en el reciclado de latas de aluminio es que son fabricadas de dos tipos de aleaciones diferentes: AA5182, la cual pertenece a la tapa y constituye un 25% en peso, y AA3004 que forma el cuerpo con un 75% en peso del total de la lata. Al fundir completa la lata se obtendría una nueva aleación, que no sería funcional si se quisiera como finalidad obtener la misma aleación del bote o la tapa.

Mediante el proceso ALCOA se separan estas aleaciones antes de fundirlas, teniendo en consideración la diferencia de temperaturas de fusión de ambas: AA5182 (580-636°C), y para AA3004 (629-654°C), se hacen pasar a través de un horno rotatorio hasta una temperatura menor a la aleación de menor punto de fusión, esta se fragmenta y se separa mediante un tamiz de acuerdo al tamaño. Como se muestra en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Proceso ALCOA para la preparación de latas antes de fundirlas.

### 1.11 Recubrimientos empleados en las latas de aluminio.

Los barnices y recubrimientos juegan un papel importante en la protección del envase metálico frente al producto y viceversa, y en la mejora de la apariencia del envase respecto al consumidor. De esta forma, pueden clasificarse en recubrimientos interiores y exteriores.

El principal recubrimiento que se emplea es el de tipo epoxi-fenólico y en menor medida el acrílico. A estos compuestos se les puede dar una capa de color para mejorar la apariencia externa, pudiendo adquirir colores dorados, plateados o blancos (denominado también cerámico y formado a partir de óxido de titanio).

#### **-Recubrimiento Interior.**

Los recubrimientos interiores protectores, denominados también lacas, son diseñados para resistir algunas propiedades que se les exigen a estos barnices como son inercia química, flexibilidad, resistencia, etc.

Algunos de los materiales empleados habitualmente como recubrimientos interiores se describen a continuación: Es uno de los sistemas de recubrimiento más eficaces, los recubrimientos epoxi-fenólicos. Contienen propiedades importantes, tales como: alta resistencia química y buena flexibilidad.

Esta combinación hace que actúen como agentes de entrecruzamiento a elevadas temperaturas de curado, dando lugar a un film denso y resistente.

Todas las latas de bebida presentes actualmente en el mercado se protegen internamente mediante un recubrimiento tipo epoxi en base acuosa, aplicado mediante un atomizador como se ve en la **Figura 2**.

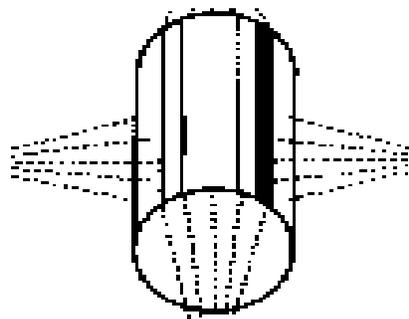
Los recubrimientos tipo epoxi anhidro son una variación de lo visto hasta ahora. Contienen una pigmentación a base de dióxido de titanio, lo que le proporciona un color blanco al recubrimiento, empleado en la industria para darle un aspecto más “sano y limpio” al interior de los envases metálicos.



**Figura 2.** Recubrimiento interior.

**-Recubrimiento Exterior.**

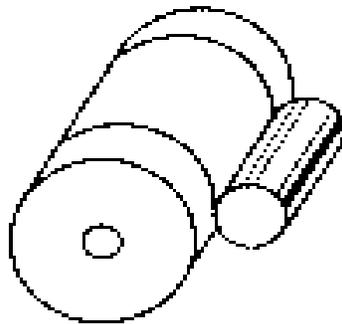
Esta etapa tiene un doble fin: recubrir la lata de una laca protectora y preparar la superficie para el proceso de decoración. Las latas pasan a la pre decoradora que aplica una capa de imprimación y después se introducen en un horno de cocción externa para su secado. El uso más frecuente es un recubrimiento blanco denso empleado como base para la impresión, el cual se aplica con una maquina atomizadora que se muestra en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Lacado exterior.

### **-Decoración.**

La impresión se realiza de un modo muy parecido a como se imprime una revista, mediante una máquina rotativa, la diferencia es que la superficie de impresión es cilíndrica en lugar de plana como se observa en la **Figura 4**. Esta máquina, la decoradora, tiene una capacidad de impresión de seis colores. Una vez decoradas las latas, se vuelven a enviar a un horno de cocción externa para secar las tintas. Así se consigue lo que se denomina “curado”, proceso por el que la capa impresa adquiere estabilidad y resistencia al roce. Se consigue a una temperatura de 180°C durante 60 segundos.



**Figura 4.** Impresión de la lata.

Uno de los desarrollos más importantes en este sentido, empleado tanto como función decorativa como protectora, es el uso de laminados de film poliméricos sobre los sustratos metálicos. Otro de ellos es el uso de recubrimientos en polvo. Éste supone la deposición electrostática de partículas sólidas muy pequeñas sobre el sustrato, seguido de un curado que funde las partículas dando lugar a un film continuo. [8]

### **1.12 Tipos de hornos empleados para el reciclado de aluminio.**

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en tamaño y diseño, van desde los pequeños hornos de crisol con baja capacidad en kilogramos

de metal, a hornos de hogar abierto hasta de 200 toneladas de capacidad, el tipo de horno usado para un proceso de fundición, queda determinado principalmente por los siguientes factores:

1. La necesidad de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible, y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
2. La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga como la precisión de su composición.
3. La producción requerida del horno.
4. El costo de operación del horno.
5. En general los metales con puntos de fusión elevados, son más caros de fundir que los que tienen un punto de fusión bajo, ya que no solamente es más difícil y costoso obtener altas temperaturas, sino que el aislamiento debe ser más efectivo para reducir las pérdidas de calor, por lo anterior existen diferentes tipos de hornos.

#### **-Hornos de crisol.**

Los hornos de crisol trabajan por combustión de un elemento como el gas LP el cual calienta el crisol que contiene el material a fundir. El crisol se apoya sobre una base que está hecha también en material refractario y le da la posición necesaria con respecto a la salida como se ve en la **Figura 5**.

Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol este se encuentra contenido entre unas paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión.

Existen hornos con crisol móvil o con crisol fijo, la diferencia entre estos es que el crisol móvil al fundir el metal se levanta y sirve como cuchara de colada y los hornos de crisol fijo se deben cucharear para realizar la fundición.

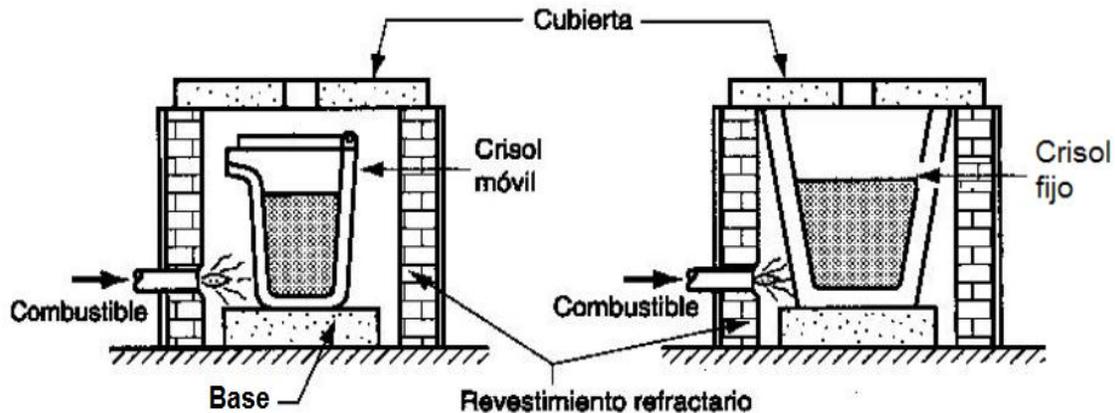
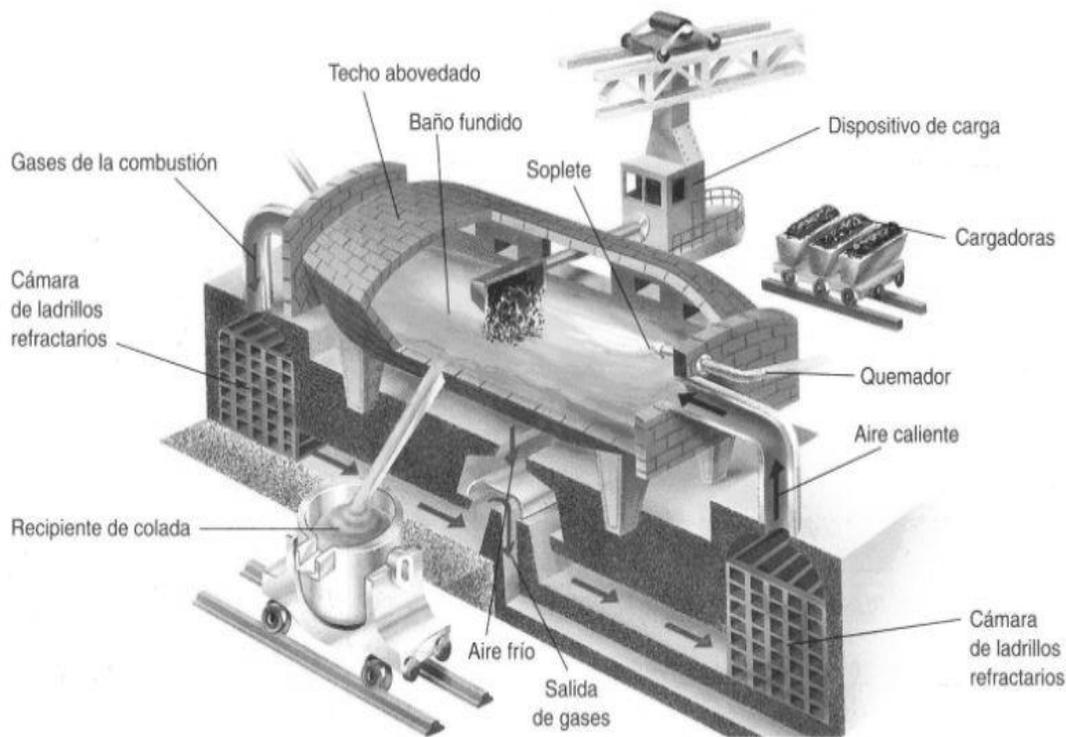


Figura 5. Horno de crisol.

#### -Horno de reverbero.

El horno de reverbero es un tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario, que refleja (o reverbera) el calor producido en un sitio independiente del hogar donde se genera la flama. Tiene siempre chimenea. Los productos de combustión no están en contacto directo con el metal, sino que lo calienta por medio de una flama insuflada sobre él, desde otra cámara siendo por tanto el calentamiento indirecto. Tales hornos se usan en la producción de cobre, estaño, níquel, y en el reciclado del aluminio, como se observa en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Horno de reverbero.

En estos hornos, la energía necesaria para la fusión del metal se produce por uno o por varios quemadores, alimentados por combustibles líquidos o gaseosos, cuyas flamas inciden directamente sobre la carga metálica. Los gases de combustión provocan en la atmosfera del horno, movimientos intensos de convección que mejoran los cambios térmicos con el metal que se funde.

Consta esencialmente de un par de cámaras:

- 1) Cámara de fusión, con dos quemadores y una puerta por donde se carga el material a fundir, en el interior contiene una inclinación por donde el metal fundido “escurre” hacia la otra cámara.

2) Cámara de contención, con dos quemadores y aquí es donde cae el material fundido proveniente de la cámara de fusión. La cámara de contención tiene una tapa por donde es posible tomar las muestras para su posterior análisis, durante el proceso, se remueve desde una ventana el metal fundido para que el calor actúe lo más uniformemente posible sobre toda la masa.

La carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del horno de reverbero.

El reciclaje de aluminio utiliza principalmente hornos de reverbero. Las refineras utilizan una combinación de hornos rotativos y de reverbero que representan cerca del 90% de su tecnología del horno. [9]

### **1.13 Tipos de flama.**

La flama se define como el medio gaseoso en el que se desarrollan las reacciones de combustión; aquí es donde el combustible y el comburente se encuentran mezclados y en reacción. La flama puede adoptar diferentes formas, según el medio técnico, y también la forma del quemador. Esto es así porque el quemador es donde se atomiza el combustible (si el combustible es líquido) para que entre en contacto con el aire.

El frente de la flama es la zona que marca la separación entre el gas quemado y el gas sin quemar. Aquí es donde tienen lugar las reacciones de oxidación principales. El espesor del frente de flama puede ir desde menos de 1mm hasta ocupar totalmente la cámara de combustión.

La propagación de la flama es el desplazamiento de ésta a través de la masa gaseosa. Se efectúa esta propagación en el frente de flama. La velocidad de propagación va a depender de la transmisión de calor entre la flama y las zonas contiguas (gases

quemados y no quemados). Cuando los gases sin quemar alcanzan la temperatura de ignición, entonces empezarán a sufrir la combustión.

Para que la flama comience y quede estable, se debe estabilizar el frente de llama.

Para ello, se debe coordinar la velocidad de escape de gases y de propagación de la llama con la entrada de comburente (aire) y combustible.

### **- Clasificación de las llamas.**

Las llamas se clasifican en 3 grupos ateniéndonos a los parámetros para un combustible líquido.

a. Mezcla combustible comburente.

b. Velocidad de la mezcla de combustible.

c. Posición de la flama respecto a la boca del quemador.

a. Mezcla combustible comburente.

- Flama de premezcla: La mezcla de los dos fluidos se realiza parcial o totalmente antes de alcanzar la cámara de combustión.

- Flama de difusión: (sin mezcla previa) El combustible y el comburente se mezcla justo en el momento de la combustión.

b. Velocidad de la mezcla de combustible.

- Laminar: Los fenómenos de mezcla y transporte ocurren a bajas temperaturas.

- Turbulento: Las velocidades de la mezcla aire/combustible es elevada. La mezcla vaporizada suele salir en forma de torbellino.

c. Posición de la flama respecto a la boca del quemador.

- Flama estacionaria: El combustible se va quemando poco a poco al pasar por una determinada parte del sistema. Este es el tipo de flama ideal desde el punto de vista industrial.

- Flama explosiva libre: Es la que está en movimiento.

#### **-Temperatura adiabática de combustión.**

También se denomina temperatura teórica de combustión o temperatura de combustión calorimétrica. Es la temperatura que se obtendría en una combustión estequiométrica con mezcla perfectamente homogénea y en un tanque que nos permita evitar cualquier pérdida de calor al exterior.

En muchos casos llega con valorar de modo aproximado el calor liberado para determinar la temperatura adiabática de combustión. Esta temperatura aumenta con la potencia calorífica del combustible y disminuye con la capacidad calorífica de los productos de combustión.

#### **-Temperatura máxima teórica de la llama.**

Es la temperatura que se alcanza cuando la cantidad de aire empleada en la combustión es la cantidad estequiométricamente necesaria para ello. Se trata de un valor ideal, ya que las condiciones estequiométricas son imposibles de conseguir en la realidad.

Si estamos utilizando combustible gaseoso con capacidad calorífica baja, para conseguir elevar la temperatura de combustión, habrá que precalentar la mezcla antes de que llegue a la temperatura de combustión. En la flama se distinguen 3 zonas, que son:

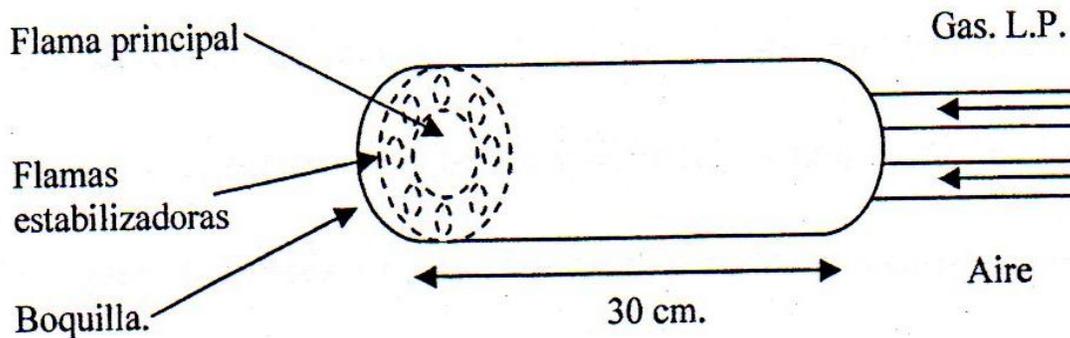
- Reductora: También se llama dardo primario. Existe aquí un defecto de oxígeno. Es la zona más interior.

- Oxidante: Hay exceso de oxígeno. Se llama también dardo primario. Es la zona más exterior y no está tan claramente definida como la reductora.

- Normal: Es la zona que queda entre una y otra.

## -Quemadores.

El quemador de uso más común en hornos de fundición, es de premezcla, como se muestra en la **figura 7**, en el cual hay mezcla de gas-aire previa a la reacción de combustión. El gas utilizado es L.P. y aire a presión proporcionado por un compresor. Este quemador fue diseñado y construido por el personal de fundición del Departamento de Ingeniería Metalúrgica.



**Figura 7.** Quemador

La forma de la flama depende principalmente del combustible y de la potencia del quemador y resulta determinante tanto para la buena marcha operativa de un horno, como para la consecución de un rendimiento energético óptimo. Se puede modificar con:

- El grado de turbulencia, a mayor turbulencia flamas más cortas e intensas.
- La velocidad de mezcla, a mayor velocidad, flama más corta.
- El exceso de aire, tiende a acortar la flama.
- La presión del aire de combustión, que acorta la flama y la hace más tensa.
- El grado de pulverización o atomización, en el caso de los combustibles líquidos. A mayor atomización, flama más corta.

Dependiendo del estado del combustible que se vaya a quemar y del tipo de flama que se quiera conseguir tenemos diferentes tipos de quemadores.

La utilización eficiente de los quemadores y equipos de combustión en los hornos industriales debe ser un objetivo prioritario para:

- Obtener la máxima eficiencia de la combustión.
- Operar con consumos específicos mínimos.
- Calentar las cargas en el grado y tiempo adecuados.
- Mejorar las condiciones de trabajo y ambientales.

Los quemadores más interesantes debido a sus mejoras de operación y rendimiento energético son:

- Quemadores de alta velocidad. Aumentan la transferencia de calor por convección a la carga consiguiendo mayor uniformidad de temperatura.
- Quemadores de flama plana. Desarrollan la flama en forma de disco para calentar por radiación desde la bóveda. Reducen los tiempos de calentamiento para laminación del acero en un 20 % a 25%.
- Quemadores recuperativos: Llevan incorporado un recuperador para precalentar el aire de combustión a partir del calor de los humos.
- Quemadores regenerativos: Funcionan por pares que trabajan alternativamente, precalentando bolas de material cerámico en uno de ellos con los humos de la otra.
- Tubos radiantes de alto rendimiento.
- Quemadores Oxigas: Utilizan oxígeno puro como comburente. [10]

### **1.14 Escorias.**

Las escorias metálicas son una mezcla heterogénea de metal libre con óxidos, nitruros, carburos, boruros, partículas, refractarias, metales no disueltos, fundentes, etc. Esta se forma en el proceso de fundición, lo que incluye la fusión de materia prima, transferencia del metal, procesos de aleación, tratamiento con fundentes, agitación, desgasificación, escoriado y colada.

Los "dross" o escorias de aluminio son el resultado de la fusión de chatarras de aluminio tales como los recipientes de bebida usados, rieles de aluminio, piezas fundidas y similares y las que resultan del tratamiento de fusión con fundentes en forma de sales. El fundente se acumula encima del producto fundido y forma una escoria (dross) o nata (skim) que contiene aluminio, óxidos de aluminio y elementos tales como magnesio y silicio y otros elementos aleantes presentes en diferentes aleaciones.

La escoria está constituida por tres componentes mayoritarios que son aluminio, fundente y un componente insoluble que comprende generalmente óxido de aluminio, el óxido de silicio y óxido de magnesio, junto con otros compuestos no metálicos. Los tres componentes pueden estar presentes en los siguientes porcentajes: 3 a 25% de aluminio, 25 a 50% de fundente y 25 a 75% óxidos.

#### **-Clasificación.**

Las escorias se pueden clasificar por medio de su contenido metálico. Las que presentan alto contenido (denominado escorias "blancas" o "húmedas") generalmente se presentan como un material compacto de gran masa. Un bajo contenido se produce normalmente cuando la chatarra se trata con fundentes escorificantes. Esta escoria (denominada negra o seca) por lo general es granular con un alto contenido metálico en las fracciones gruesas y sobre todo óxidos y sales en las fracciones finas.

Cuando se expone una superficie de aluminio líquido, la primera película que se forma sobre esta, es la responsable de proteger en la forma  $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorfa. Esta película sigue creciendo, antes de transformarse en otras formas cristalinas de óxidos. Como las películas de óxido más gruesas y viejas tienden a fracturarse debido a las tensiones, ya sea que se generen internamente (a través de los cambios de volumen, asociados a las transformaciones de fase) o de manera externa (a través de turbulencias en el metal fundido). El comportamiento real de una película de óxido sobre aluminio líquido depende de muchas variables como la composición química de la aleación, la temperatura de trabajo, la atmosfera en la bóveda del horno, y el movimiento en el baño metálico. [11]

## **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

### **2.1 Preparación del bote de aluminio.**

En este trabajo se prepararon pacas de aluminio, las cuales se reciclaron con pintura y con pintura parcialmente quemada, usando dos técnicas de fusión: La primera fue fundiendo solo pacas de cuerpo de latas de aluminio con las dos variantes (con pintura y con pintura parcialmente quemada proveniente del horno rotatorio) y en la segunda se fundiendo primero 8 Kg de lingote con la composición del cuerpo para tener casi la mitad de la capacidad del horno de reverbero con metal líquido y después se fundieron las pacas de aluminio (con pintura y con pintura parcialmente quemada proveniente del horno rotatorio). Esto con la finalidad de determinar la eficiencia de reciclado del cuerpo de aluminio, y la cinética de oxidación de los principales elementos aleantes por esas dos técnicas de fusión.

Es importante mencionar que la lata de aluminio consta principalmente de dos partes, la tapa que es la aleación AA5182 cuyos elementos principales son: 0.35% Mn, 4.50%Mg y el cuerpo cuya aleación es AA3004 y cuyos elementos principales son: 1.25%Mn, 1.05% Mg, debido a esto se utilizó un horno rotatorio que tiene como objetivo separar la tapa del cuerpo y quemar la pintura parcialmente. Durante el proceso de separación de la tapa se genera padecería de ésta misma, introduciéndose en el interior del cuerpo, debido a esto es necesario someter al cuerpo del bote de aluminio a un proceso de vibración para que dicha pedacería salga al exterior, garantizando así que solo se va a fundir el cuerpo de la lata con la composición de la norma AA3004.

Para lograr esto se utilizó una desmoldeadora a la cual se le adaptó un bastidor con una malla metálica en donde se colocan las latas en la parte superior se pone en funcionamiento por 30 minutos y esta crea un movimiento de vibración en donde se observa como la pedacería de la tapa sale del interior del cuerpo y cae a una charola receptora en la parte de abajo de la máquina, como se muestra en la

**Figura 2.1.**



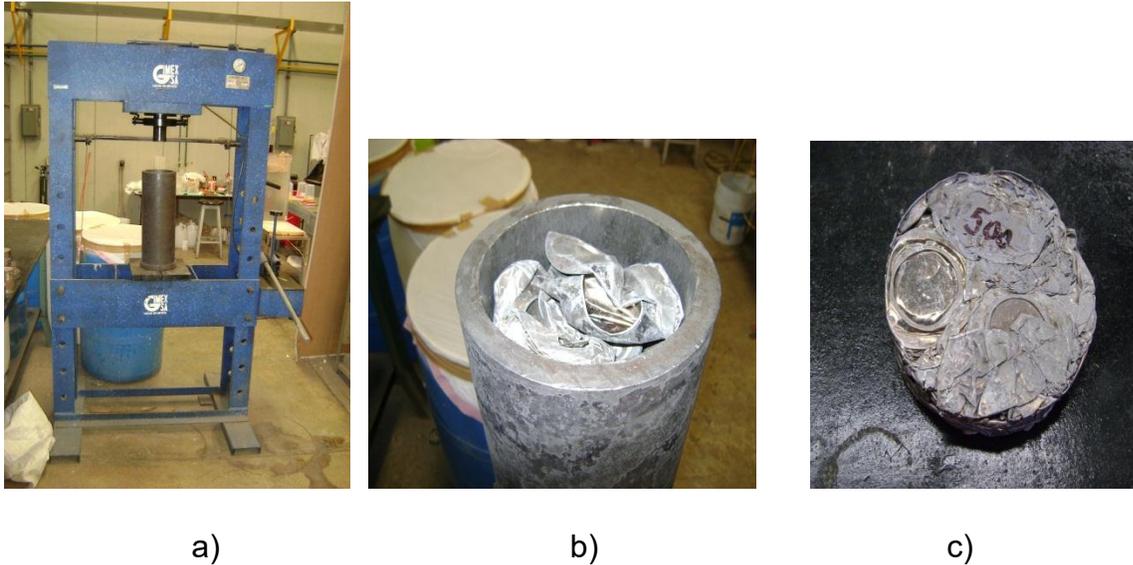
**Figura 2.1.** Desmoldeadora mecánica.

En el caso del bote con pintura, debido que no hay un proceso mecánico para retirar la tapa, se realizó manualmente con tijeras para lámina y así se garantizó que solo se funde la composición química del cuerpo de la lata AA3004.

## **2.2 Preparación de la carga del bote de aluminio en el horno de reverbero.**

Con el cuerpo de bote de aluminio sin tapa, se fabricaron pacas de aproximadamente 500g en una prensa hidráulica, los cuerpos de las latas se colocaron dentro de un cilindro de acero y se ejerció una carga utilizando un troquel hasta terminar las pacas de bote compactadas, como se muestra en la **Figura 2.2**, esto con el fin de poder

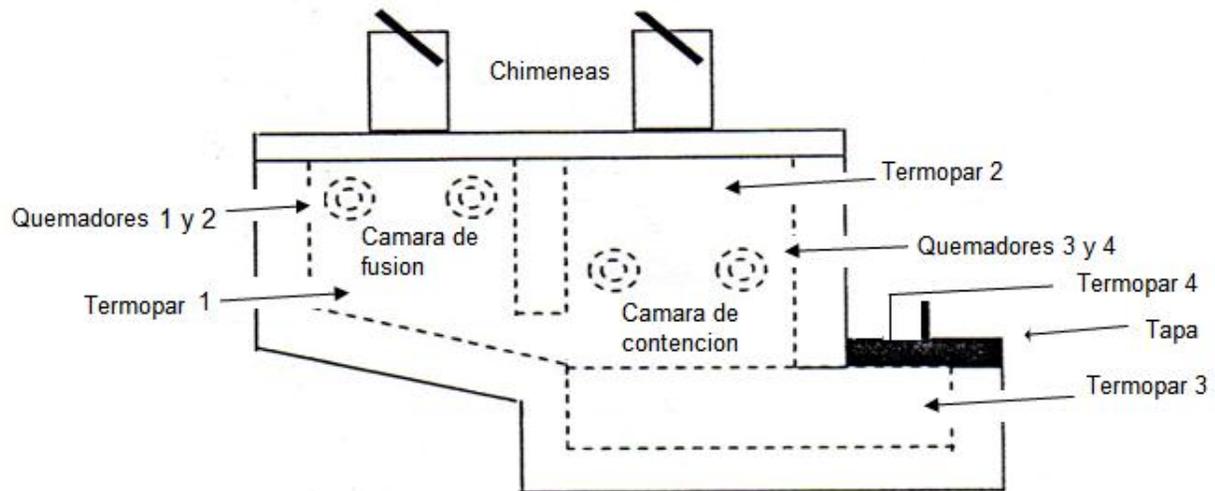
introducir al horno la mayor cantidad de bote posible, así como para evitar la oxidación del bote de aluminio y asegurar un calentamiento homogéneo.



**Figura 2.2.** a) Prensa hidráulica, b) Cilindro de acero y c) Pacas ya terminadas.

### **2.3. Instrumentación del horno de reverbero.**

Para que los experimentos fueran reproducibles durante la fusión de las pacas de bote de aluminio, se instrumentó el horno de reverbero con termopares tipo K enchaquetados, los cuales se colocaron en la cámara de fusión y la cámara de contención, para poder conocer la historia térmica de las cámaras y del metal líquido con respecto al tiempo, estos datos fueron capturados mediante un adquisidor el cual se conectó a una computadora para guardar los datos, el sistema experimental. como se muestra en las **Figura 2.3** respectivamente.



**Figura 2.3.** Esquema de la Instrumentación del horno de reverbero.

#### **2.4. Fusión del bote de aluminio en el horno de reverbero.**

Antes de empezar las fusiones se diseña una hoja de control como en la que se muestra en la **Figura 2.4**, la cual va a permitir registrar datos como son: temperatura del horno, numero de canal para los termopares, temperatura del metal líquido y de vaciado, tiempos y algunas observaciones que se presenten durante la fusión.



USUARIO: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_

MATERIAL: \_\_\_\_\_

PRUEBA: \_\_\_\_\_

		CANAL				
OBSERVACIONES		TEMP.DEL AI	T.INT(°C)	T.INT(°C)	T.INT(°C)	TEMP DEL AI
HORA		LIQUIDO(°C)	C.CONTEN	C.FUSION	C. CONTEN SALIDA	LIQUIDO(°C)

**Figura 2.4.** Hoja de control para el reciclado del bote de aluminio en un horno de reverbero.

Y una tabla para el registro de los datos finales que se obtienen en la recuperación de metal como se muestra en la **Figura 2.5**

Prueba	Carga Total Introducecida (g)	Aluminio recuperado (g)	Escoria producida (g)	Escoria %	Eficiencia (%)	Material en exceso (g)

**Figura 2.5.** Formato de la tabla de datos obtenidos al final de cada fusión.

Para fundir el bote con pintura y con pintura parcialmente quemada se precalentó primero la cámara de contención por 60 minutos, (quemadores 1 y 2) y posteriormente se prende la cámara de fusión (quemadores 3 y 4) por 60 minutos con un total de 120 minutos totales de precalentamiento antes de meter la carga para la fusión.

Se pesan aproximadamente 8kg de pacas de bote para introducirlas al horno de reverbero en 4 cargas de 2kg cada una.

Una vez que se funden 2kg de esta primera carga y se tiene suficiente metal líquido, se tomó la primera muestra y a partir de este momento se tomaron muestras cada 10

minutos hasta el final de la fusión, para su posterior análisis químico y conocer la cinética de oxidación de los elementos más importantes.

Cuando se fundió toda la carga, se le dieron 60 minutos de permanencia en la cámara de contención al metal líquido para determinar qué cantidad de material se oxida.

Antes de vaciar el metal líquido, se retiró toda la escoria generada durante la fusión, y se procedió a vaciar en lingoteras.

Cuando el horno se enfrió, se desprende el aluminio pegado en forma de laminilla sobre las paredes, se cuantificó junto con los lingotes y las muestras obtenidas y así conocer la eficiencia del horno de reverbero.

## **2.5. Fusión de 8Kg de lingote con bote con pintura y con pintura parcialmente quemada.**

Esta segunda técnica consistió en fundir primero 8 kilogramos de lingotes con la misma composición real del bote y posteriormente se fundió el bote en forma de pacas con las dos variantes (con pintura y con pintura parcialmente quemada).

Se precalienta primero la cámara de contención por 60 minutos, (quemadores 1 y 2) y posteriormente se prende la cámara de fusión, (quemadores 3 y 4) por 60 minutos con un total de 120 minutos totales de precalentamiento antes de meter la carga de lingotes para la fusión.

Se pesaron aproximadamente 8Kg. de lingote para introducirlas al horno de reverbero en 2 cargas de 4Kg. cada una.

Cuando se fundió todo el lingote se realizó el ajuste de la composición química del magnesio con el propósito de obtener la composición más cercana a la del bote real (1.123% de Mg).

En seguida se pesaron aproximadamente 8Kg. de pacas de bote para introducirlas al horno de reverbero en 4 cargas de 2Kg. cada una.

Una vez que se fundieron 2Kg. de esta primera carga, se tomó la primera muestra y a partir de este momento se tomaron muestras cada 10 minutos hasta el final de la fusión para su posterior análisis químico y conocer la cinética de oxidación de los elementos más importantes.

Cuando se fundió toda la carga, se le dio 60 minutos de permanencia en la cámara de contención al metal líquido para determinar qué cantidad de material se oxida.

Antes de vaciar el metal líquido, se retiró toda la escoria generada durante la fusión, y se procedió a vaciar el metal líquido en lingoteras.

Cuando el horno se enfrió, se desprendió el aluminio pegado en forma de laminilla sobre las paredes, se cuantificó junto con los lingotes y las muestras obtenidas para determinar la eficiencia del horno de reverbero.

## **2.6. Análisis químico.**

Durante el desarrollo de las pruebas se tomaron muestras del metal líquido, la primera se tomó al fundirse los primeros 2Kg. de la primera carga de pacas y posteriormente cada 10 minutos hasta el final de la fusión, para conocer la cinética de oxidación de los elementos más críticos como el magnesio debido a su afinidad por el oxígeno en relación con los demás elementos químicos.

Las muestras tomadas en cada prueba, se prepararon desbastando la superficie con lija grado 80 para realizar análisis químicos con el espectrómetro de emisión atómica.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

Las composiciones químicas que se obtienen para cada una de las fusiones se encuentran al final de este capítulo.

#### 3.1. Determinación del peso de los botes de aluminio.

Se realizó una prueba de quemado del recubrimiento tanto interno como externo que tiene el cuerpo de la lata de aluminio (pintura y laca), para cuantificar el % de pérdida de peso, a la temperatura de trabajo del horno rotatorio, esto se realizó en una mufla a una temperatura de 550°C durante 5 minutos que es lo que duran las pruebas dentro del horno rotatorio, las pruebas se realizaron con dos de las marcas más conocidas, los resultados se muestran en la **Tabla 3.1.1.**

**Tabla 3.1.1.** Lata de refresco de la marca coca cola.

Lata	Peso sin quemar (g)	Peso Lavada (g)	Peso Quemada (g)
1	10.505	10.425	10.203
2	10.495	10.444	10.160
3	10.625	10.517	9.886
4	10.844	10.408	10.058
5	10.534	10.409	10.112
6	10.336	10.314	10.129

Se puede calcular el porcentaje de aluminio con pintura parcialmente quemada en el cuerpo de la lata y el % de pintura quemada mediante la siguiente relación, los resultados se muestran en la **Tabla 3.1.2.**

$P1 \text{-----} 100\%$

$P2 \text{-----} X$

Donde:

P1, es el peso de lata con pintura,

P2, es el peso de lata con pintura parcialmente quemada,

X= % de Aluminio con pintura parcialmente quemada en la lata.

$100 - X =$  % de pintura quemada y desprendida del cuerpo.

**Tabla 3.1.2.** Peso de lata de aluminio sin quemar y quemada.

Lata	Peso sin quemar (g)	Peso Quemada (g)	% de Aluminio en la lata con pintura parcialmente quemada.	% de pintura quemada y desprendida del cuerpo.
Promedio	10.553	10.091	95.622	4.377

Para el caso de la prueba realizada a la lata de la marca modelo los resultados se muestran en las **Tablas 3.1.3.**

**Tabla 3.1.3.** Peso de lata de cerveza marca modelo.

Lata	Peso sin quemar (g)	Peso Lavada (g)	Peso quemada (g)
1	10.228	10.147	9.961
2	9.993	9.893	9.721
3	10.264	10.247	10.011
4	10.420	10.418	10.182
5	10.213	10.094	9.902
6	9.932	9.926	9.652

De igual manera se calcula el porcentaje de aluminio que hay en el cuerpo de la lata con pintura parcialmente quemada y de pintura contenida mediante la siguiente relación, los resultados se muestran en la **Tabla 3.1.4.**

P1 ----- 100%

P2 ----- X

Donde:

P1, es el peso de lata con pintura,

P2, es el peso de lata con pintura parcialmente quemada,

X= % de Aluminio con pintura parcialmente quemada en la lata.

100 – X= % de pintura quemada y desprendida del cuerpo.

**Tabla 3.1.4** Peso del cuerpo de lata de aluminio sin quemar y quemada.

Lata	Peso sin quemar (g)	Peso quemada (g)	% de aluminio en la lata con pintura parcialmente quemada.	% de pintura y desprendida del cuerpo.
Promedio	10.175	9.904	97.33	2.66

La evaluación del peso del bote de aluminio se presenta de la **Tabla 3.1.1**, a la **Tabla 3.1.4**, donde se puede observar que el peso total de la lata de aluminio es la suma del peso de la aleación de aluminio, residuos del contenido de la bebida junto con la suciedad y el recubrimiento de laca y pintura interno y externo, siendo el de menor aportación al peso de la lata los residuos de la bebida que oscila entre 1% a 0.5%, mientras que el bote que fue quemado a la misma temperatura en una mufla a la temperatura a la que opera el horno rotatorio, se observó que tiene una pérdida de peso de aproximadamente entre 2.5% y 4% en peso, esta variación se debe a la marca ya que algunos botes tienen mayor recubrimiento, debido al producto o la impresión del dibujo en el bote. Esto es importante destacarlo ya que al realizar los cálculos correspondientes se determina la eficiencia del proceso.

### 3.2. Evaluación de la eficiencia de recuperación de aluminio en el horno de reverbero.

Con la finalidad de determinar la eficiencia de reciclado del cuerpo de aluminio, por dos técnicas de fusión, a continuación, se presentan las relaciones que nos permiten calcular las eficiencias para ambas técnicas:

$$\% \text{ Escoria} = \frac{(\text{Peso escoria}) * (100\%)}{\text{Carga total}}$$

$$\% \text{ Aluminio recuperado} = \frac{(\text{Peso de aluminio recuperado}) * (100\%)}{\text{Carga total}}$$

Y el peso perdido o ganado de cada una de las fusiones se calcula con la siguiente relación:

Aluminio recuperado + Escoria = Peso total resultante de la prueba.

Peso total al inicio de la prueba – Peso total resultante de la prueba = Faltante o en exceso.

Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 3.2.1.** Bote con pintura.

Prueba	Carga total Introdúcida (g)	Aluminio recuperado (g)	Escoria producida (g)	Escoria %	Eficiencia %	Material faltante (g)
1	7948	5724	1884	23.70	72.0	340
2	8083	5577	2214	27.39	68.9	292

**Tabla 3.2.2.** Bote con pintura parcialmente quemada.

Prueba	Carga total Introducida (g)	Aluminio recuperado (g)	Escoria producida (g)	Escoria %	Eficiencia %	Material faltante (g)
1	8069	6332	1697	21.03	78.4	40
2	7898	5810	2015	25.51	73.5	73

**Tabla 3.2.3.** Lingote con composición química de cuerpo de bote, más bote con pintura.

Prueba	Carga total Introducida (g)	Aluminio recuperado (g)	Escoria producida (g)	Escoria %	Eficiencia (%)	Material faltante (g)
1	8.004Kg Lingote, 8.031Kg Bote, total: 16.035	13718.6	2198.3	13.70	85.5	118
2	8.051Kg Lingote, 8.081Kg Bote, total: 16.132	12756.6	3251.9	20.15	79	124

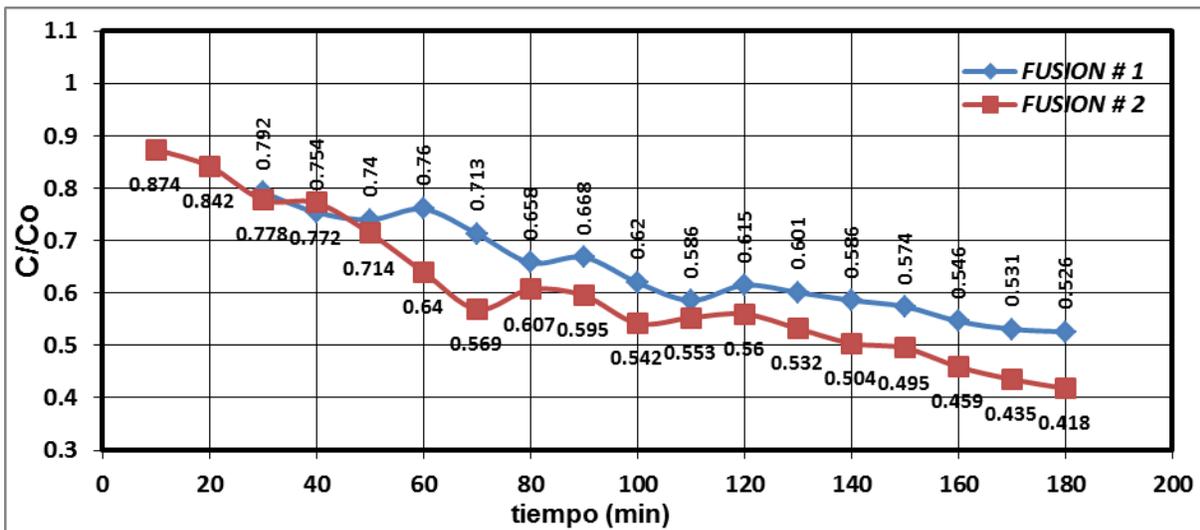
**Tabla 3.2.4.** Lingote con composición química de cuerpo de bote, más bote con pintura parcialmente quemada.

Prueba	Carga total Introducida (g)	Aluminio recuperado (g)	Escoria producida (g)	Escoria %	Eficiencia (%)	Material en exceso (g)
1	7.997Kg Lingote, 8.006Kg, Bote, Total: 16.004	14140.2	3149.2	19.67	88.35	1285.3
2	8.002Kg Lingote, 8.003Kg Bote, Total: 16.005	13754.6	3065	19.14	85.9	814.1

### 3.3. Cinética de oxidación.

La cinética de oxidación para el segundo elemento en mayor proporción en el cuerpo del bote de aluminio es el magnesio, en la **Figura 3.3.1** se aplicó la primer técnica de fusión donde se muestra la cinética de oxidación del magnesio para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para todas las fusiones de 180 minutos, todas las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co =$  valor adimensional, donde C es el porcentaje de magnesio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el porcentaje real del bote equivalente a 1.123% de magnesio, en la **Tabla 3.3.1** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del magnesio.



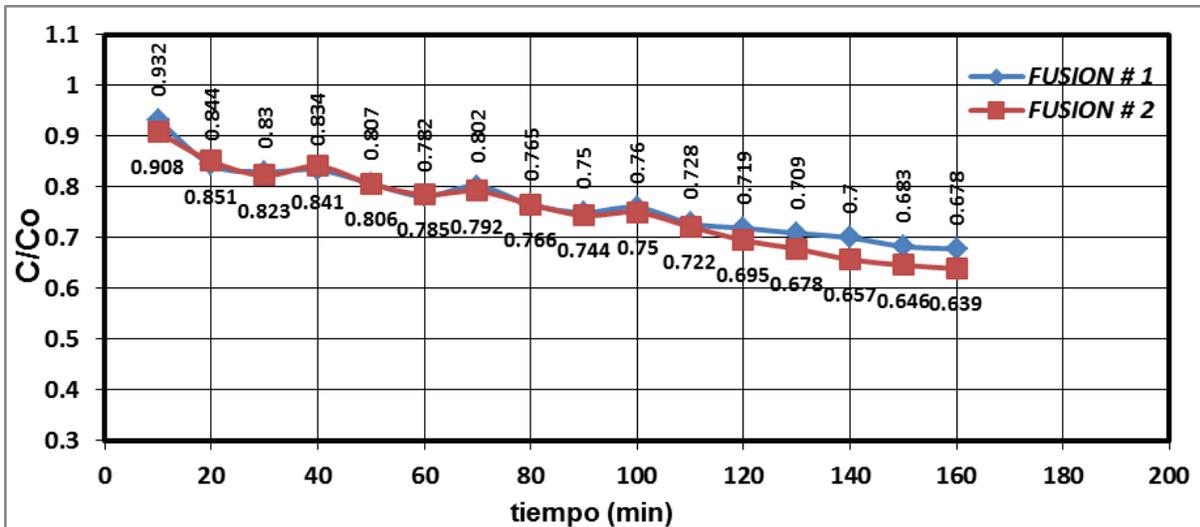
**Figura 3.3.1.** Disminución de la concentración de magnesio con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura.

**Tabla 3.3.1** Diferencia de la concentración adimensional del magnesio para el caso de bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	Diferencia	Mas oxidada
1	0.792	0.526	0.266	
2	0.874	0.418	0.456	X

En la **Figura 3.3.2** se muestra la cinética de oxidación del magnesio para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura parcialmente quemada en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para las dos fusiones de 160 minutos, la fusión se realizó con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calculan como sigue:

$C/Co =$  valor adimensional, donde C es el porcentaje de magnesio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el porcentaje real del bote equivalente a 1.123% de magnesio, en la **Tabla 3.3.2** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del magnesio.



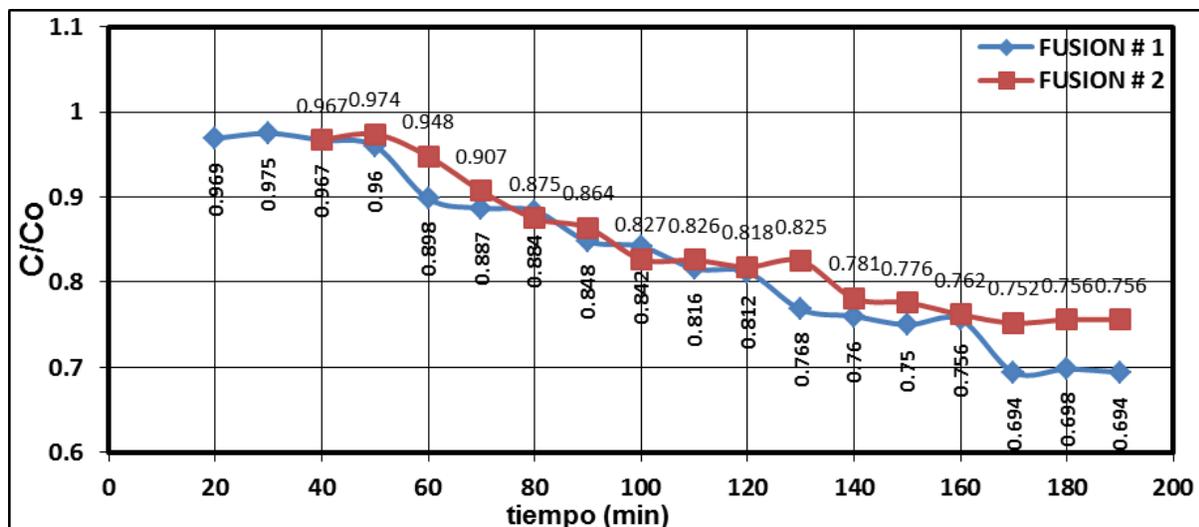
**Figura 3.3.2.** Disminución de la concentración de magnesio con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura parcialmente quemada.

**Tabla 3.3.2.** Diferencia de la concentración adimensional del magnesio para el caso de bote con pintura parcialmente quemada.

Fusión	Inicio	Final	Diferencia	Mas oxidada
1	0.932	0.678	0.254	
2	0.908	0.639	0.269	X

En la **Figura 3.3.3** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra la cinética de oxidación del magnesio para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 190 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co =$  valor adimensional, donde C es el porcentaje de magnesio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y Co es el porcentaje posterior al ajuste de 8Kilogramos de lingote, en la **Tabla 3.3.3** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del magnesio.



**Figura 3.3.3.** Disminución de la concentración de magnesio con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura.

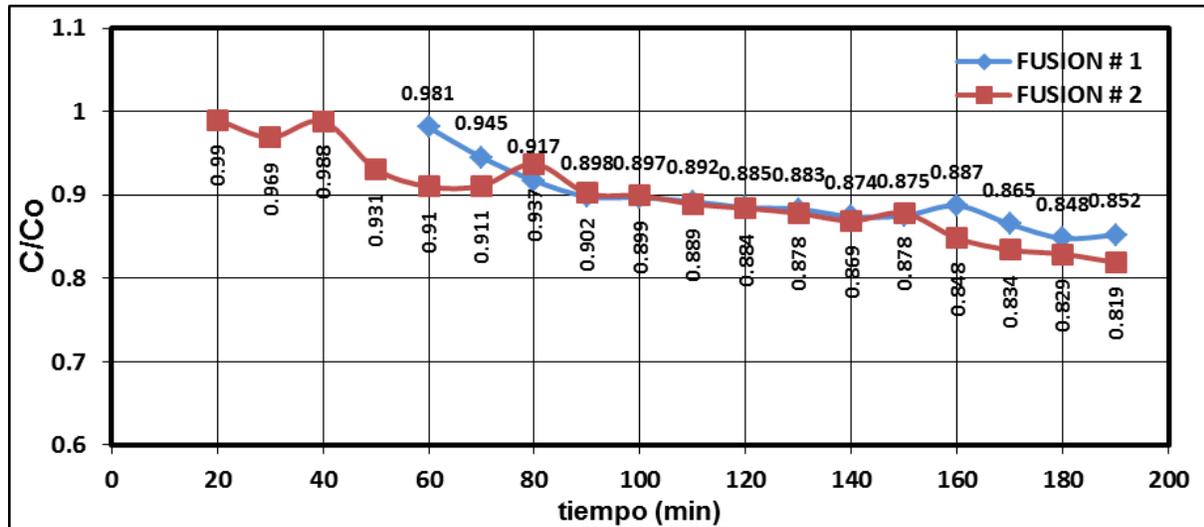
**Tabla 3.3.3.** Diferencia de la concentración adimensional del magnesio para el caso de lingote más bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	Diferencia	Mas oxidada
1	0.969	0.694	0.275	X
2	0.967	0.756	0.211	

En la **Figura 3.3.4** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra la cinética de oxidación del magnesio para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura parcialmente quemada en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 190 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de magnesio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y Co es el porcentaje posterior al ajuste de 8

kilogramos de lingote, en la **Tabla 3.3.4** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del magnesio.



**Figura 3.3.4.** Disminución de la concentración de magnesio con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemada.

**Tabla 3.3.4** Diferencia de la concentración adimensional del magnesio para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemada.

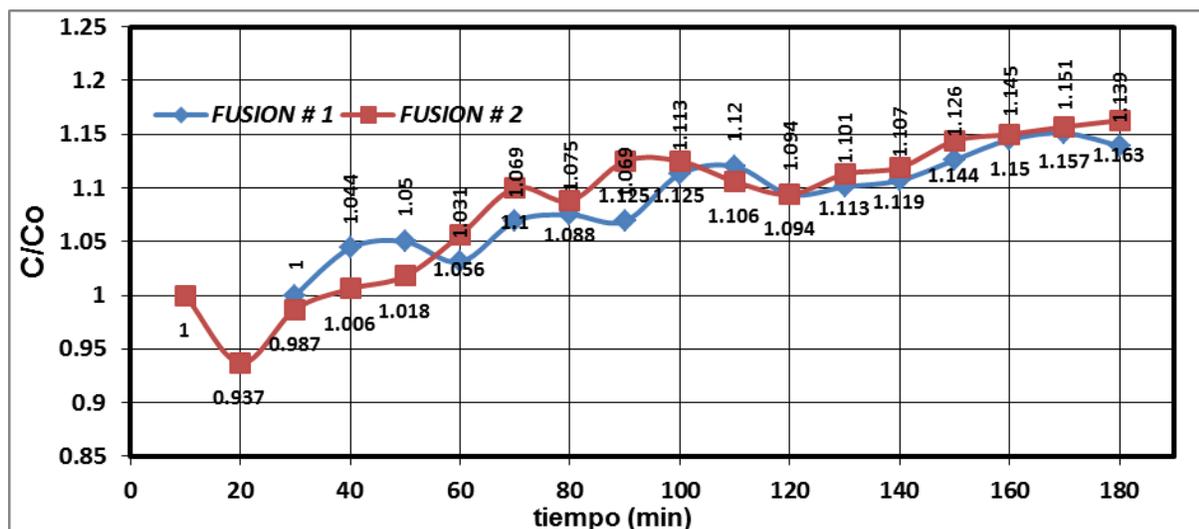
Fusión	Inicio	Final	Diferencia	Mas oxidada
1	0.981	0.852	0.129	
2	0.990	0.819	0.171	X

### 3.4. Incremento de la concentración de titanio en el aluminio reciclado por la pintura del bote.

En la **Figura 3.4.1** se aplicó la primer técnica de fusión donde se muestra el incremento de la concentración de titanio para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para todas las fusiones de 180 minutos, todas las fusiones se

realizaron con una réplica los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de titanio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de titanio, en la **Tabla 3.4.1** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del titanio.



**Figura 3.4.1.** Incremento de la concentración de titanio con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura.

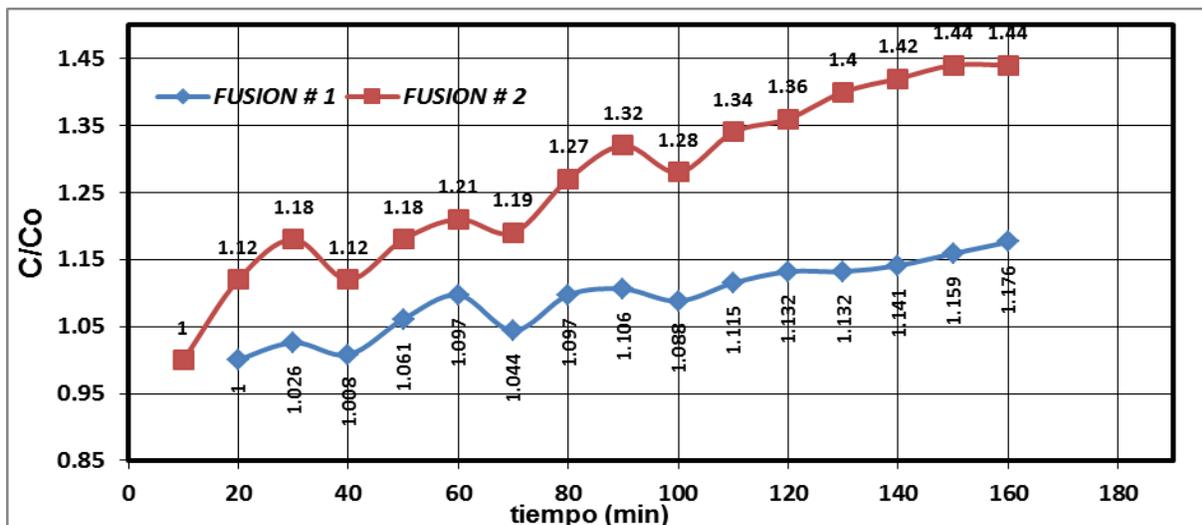
**Tabla 3.4.1** Diferencia de la concentración adimensional del titanio para el caso de bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	Diferencia
1	1	1.163	0.163 subió
2	1	1.139	0.139 subió

En la **Figura 3.4.2** se aplicó la primer técnica de fusión donde se muestra el incremento de la concentración de titanio para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura parcialmente quemada en

presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para las dos fusiones de 160 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de titanio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de titanio, en la **Tabla 3.4.2** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del titanio.



**Figura 3.4.2** Incremento de la concentración de titanio con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura parcialmente quemado.

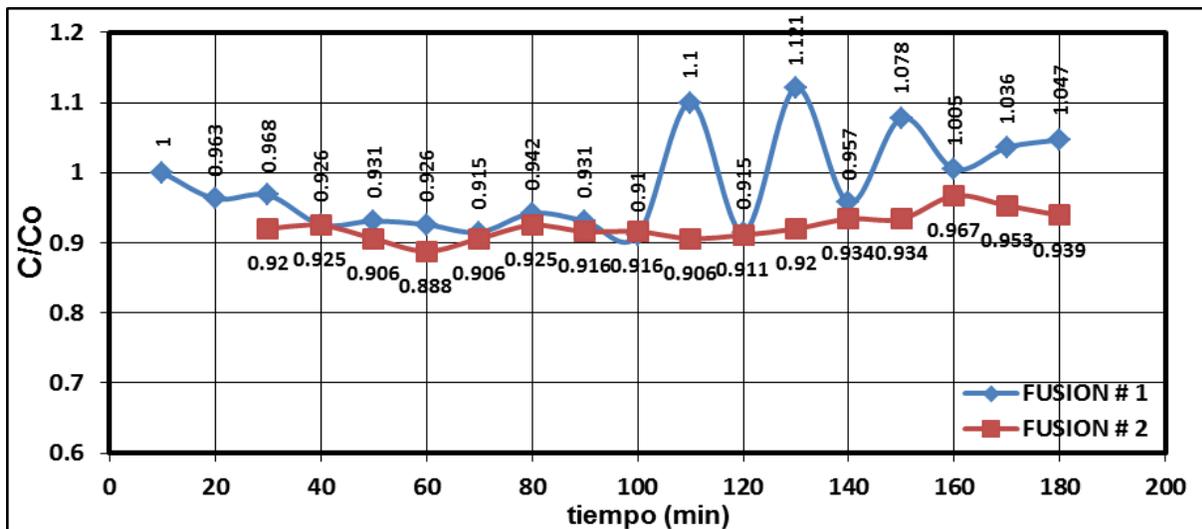
**Tabla 3.4.2.** Diferencia de la concentración adimensional del titanio para el caso de bote con pintura parcialmente quemado.

Fusión	Inicio	Final	
1	1	1.176	0.176 subió
2	1	1.44	0.44 subió

En **Figura 3.4.3** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra el incremento de la concentración de titanio para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de

lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 180 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/C_o$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de titanio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $C_o$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de titanio, en la **Tabla 3.4.3** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del titanio.



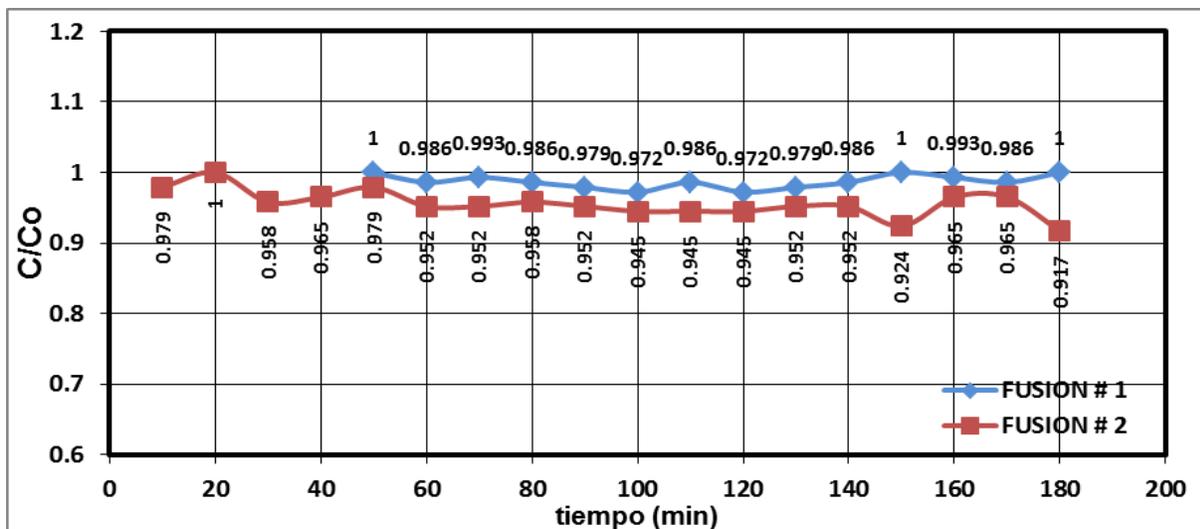
**Figura 3.4.3.** Incremento de la concentración de titanio con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura.

**Tabla 3.4.3.** Diferencia de la concentración adimensional del titanio para el caso de lingote más bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	
1	1	1.047	0.047 subió
2	0.92	0.939	0.019 subió

En **Figura 3.4.4** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra la disminución de la concentración de titanio para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura parcialmente quemada, en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 180 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de titanio de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de titanio, en la **Tabla 3.4.4** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del titanio.



**Figura 3.4.4.** Disminución de la concentración de titanio con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemado.

**Tabla 3.4.4** Diferencia de la concentración adimensional del titanio para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemado.

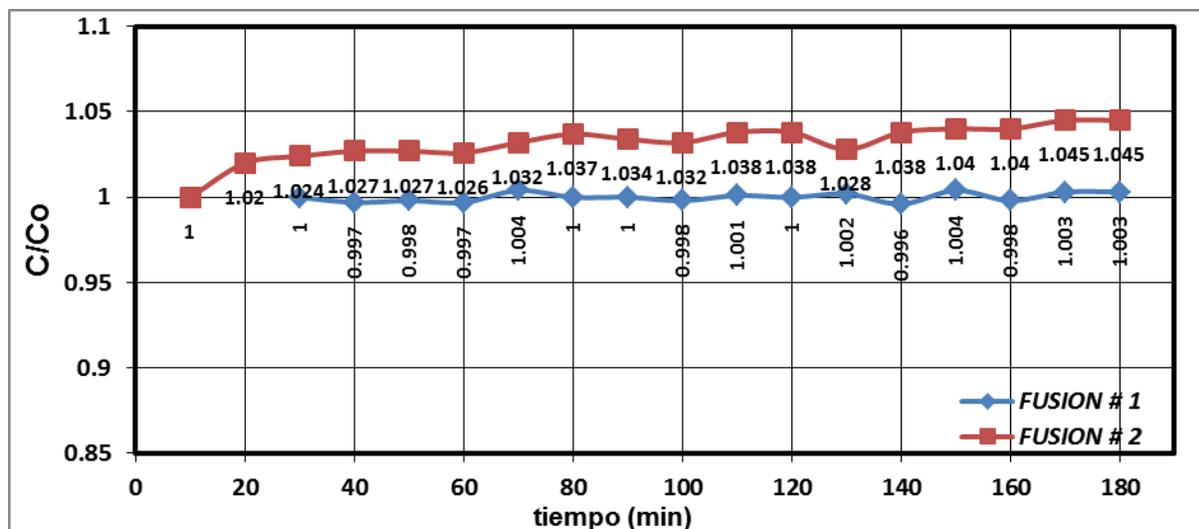
Fusión	Inicio	Final	
1	1	1	
2	0.979	0.917	0.062 bajo

### 3.5. Manganeso.

Hay que recordar, que el manganeso es el elemento que está en mayor cantidad en el cuerpo de la lata de acuerdo a su composición química, a continuación, se presentan las gráficas el cual se observa que prácticamente no hay un cambio significativo en todas las fusiones realizadas.

La cinética de oxidación para el primer elemento en mayor proporción en el cuerpo del bote de aluminio es el manganeso, en la **Figura 3.5.1** se aplicó la primer técnica de fusión donde se muestra ligeramente el cambio de la concentración del manganeso, para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para las dos fusiones de 180 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de manganeso de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y Co es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de manganeso, en la **Tabla 3.5.1** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del manganeso.



**Figura 3.5.1.** Cambio de la concentración de manganeso con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura.

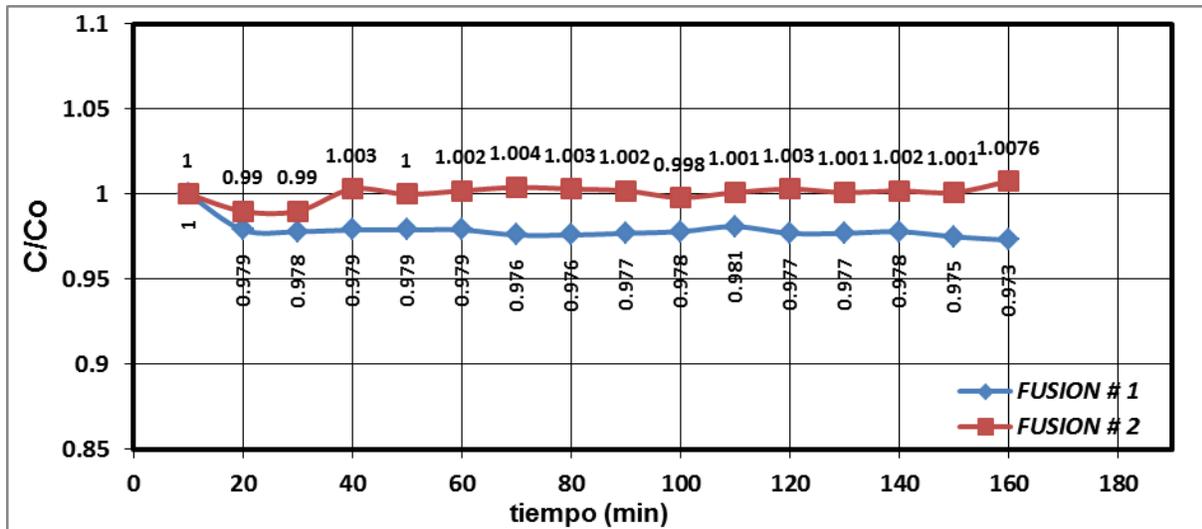
**Tabla 3.5.1.** Diferencia de la concentración adimensional del manganeso para el caso de bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	Aumento
1	1	1.003	0.003
2	1	1.045	0.045

En la **Figura 3.5.2** se aplicó la primer técnica de fusión donde se muestra ligeramente el cambio de la concentración del manganeso, para el caso cuando se funden aproximadamente 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura parcialmente quemada, en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, el tiempo total de la fusión fue igual para las dos fusiones de 160 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co =$  valor adimensional, donde C es el porcentaje de manganeso de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y Co es el valor de la primera muestra equivalente

al porcentaje de manganeso, en la **Tabla 3.5.2** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del manganeso.



**Figura 3.5.2.** Cambio de la concentración de manganeso con respecto al tiempo para el caso de bote con pintura parcialmente quemada.

**Bote con pintura parcialmente quemada.**

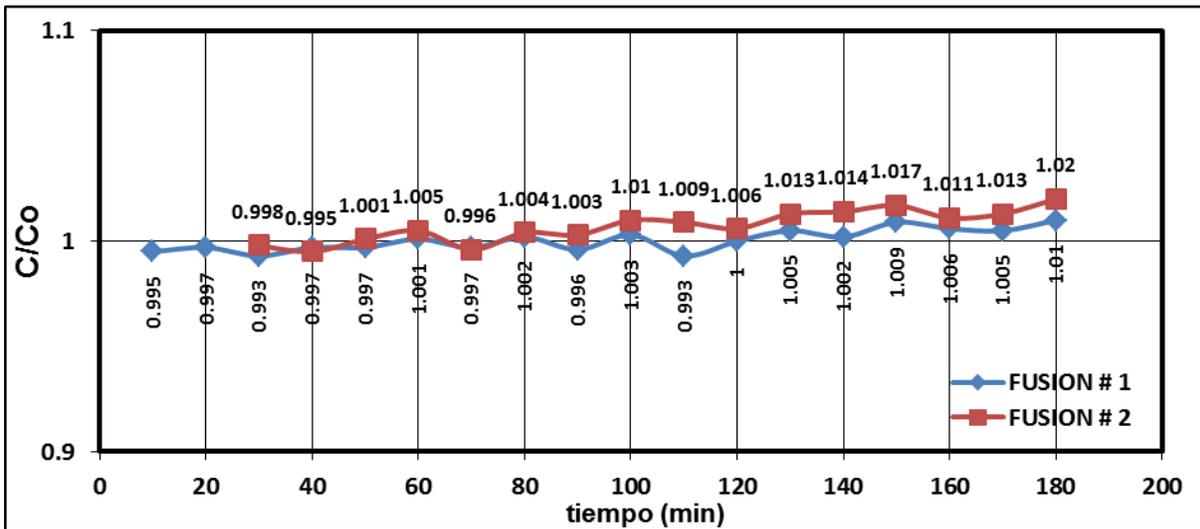
**Tabla 3.5.2.** Diferencia de la concentración adimensional del manganeso para el caso de bote con pintura parcialmente quemada.

Fusión	Inicio	Final	
1	1	0.973	0.027 bajo
2	1	1.0076	0.0076 subió

En **Figura 3.5.3** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra ligeramente el cambio de la concentración del manganeso para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con pintura en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 180 minutos, las fusiones

se realizaron con una réplica los datos de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de manganeso de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de manganeso, en la **Tabla 3.5.3** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del manganeso.



**Figura 3.5.3.** Cambio de la concentración de manganeso con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura.

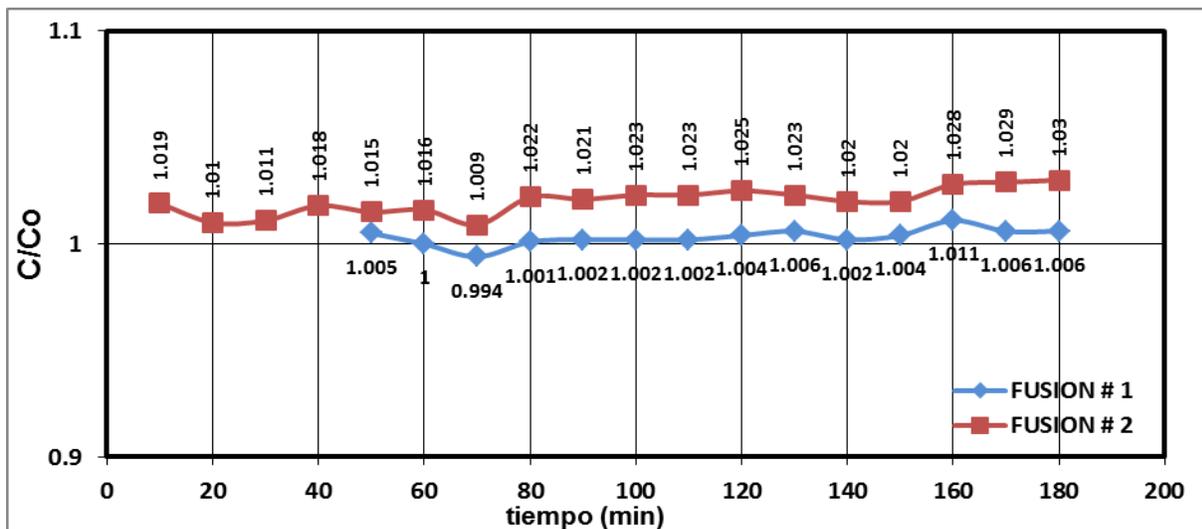
**Tabla 3.5.3.** Diferencia de la concentración adimensional del manganeso para el caso de lingote más bote con pintura.

Fusión	Inicio	Final	Aumento
1	0.995	1.01	0.015
2	0.998	1.02	0.022

En **Figura 3.5.4** se aplicó la segunda técnica de fusión donde se muestra ligeramente el cambio de la concentración del manganeso para el caso cuando se funden primero 8 kilogramos de lingote de aluminio aproximadamente con la composición del cuerpo de bote aluminio y después se funden los 8 kilogramos de cuerpo de bote aluminio con

pintura parcialmente quemada, en presentación de pacas de ½ kilogramos en el horno de reverbero con capacidad de 20 kilogramos, los tiempos de fusión fueron de 180 minutos, las fusiones se realizaron con una réplica, el dato de los valores adimensionales se calcula como sigue:

$C/Co$ = valor adimensional, donde C es el porcentaje de manganeso de cada una de las muestras obtenidas de las fusiones y  $Co$  es el valor de la primera muestra equivalente al porcentaje de manganeso, en la **Tabla 3.5.4** se presenta la diferencia de la concentración adimensional del manganeso.



**Figura 3.5.4.** Cambio de la concentración de manganeso con respecto al tiempo para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemada.

**Tabla 3.5.4.** Diferencia de la concentración adimensional del manganeso para el caso de lingote más bote con pintura parcialmente quemada.

Fusión	Inicio	Final	Aumento
1	1.005	1.006	0.001
2	1.019	1.03	0.011

#### **4. Análisis de resultados.**

##### **4.1. Eficiencia en el horno de reverbero para la recuperación de aluminio.**

Se emplearon dos técnicas de fusión en el horno de reverbero con capacidad de 20 Kg, en la primera técnica solo se fundieron solo 8 Kilogramos de pacas de cuerpo de latas de aluminio variando las fusiones, las dos primeras fusiones se realizaron utilizando pacas con pintura y para las dos siguientes fusiones se utilizaron pacas con pintura parcialmente quemada proveniente del horno rotatorio. En la segunda técnica de fusión inicialmente se realizaron dos fusiones, en estas se fundieron en total 16 kilogramos de aluminio, se fundieron primero 8 Kg de lingote con la composición del cuerpo para tener casi la mitad de la capacidad del horno de reverbero con metal líquido y después se fundieron las pacas de aluminio con pintura, posteriormente se realizó el mismo procedimiento pero ahora se utilizaron pacas de aluminio con pintura parcialmente quemada proveniente del horno rotatorio, como se muestra en la **Tabla 3.2.1** y la **Tabla 3.2.2** , se presentan los resultados del porcentaje de eficiencia del proceso, para la primera técnica, y se determinó que el bote con pintura parcialmente quemada, obtuvo mayor porcentaje de eficiencia en comparación con el bote con pintura que resulto con menor porcentaje de eficiencia, esto es lógico ya que las fusiones de bote con pintura parcialmente quemada contienen menos pintura y más aluminio, debido al tratamiento en el horno rotatorio, esto se ve reflejado también en una menor generación de escoria, el bote con pintura en forma de paca genera más escoria debido a que la pintura y laca no están expuestas totalmente a la flama de los quemadores, quemándose parcialmente y quedando atrapada entre el aluminio parcialmente fundido, generando una gran cantidad de escoria. Cabe mencionar que las fusiones se realizaron sin fundente, para ver el efecto sin fundente.

En la segunda técnica de fusión se observa en la **Tabla 3.2.3**, un aumento en la eficiencia de la recuperación de aluminio, también se observa que hay un faltante de material y esto es debido a la combustión de la pintura y laca del bote, los gases generados por la combustión de la pintura y laca se van a la atmosfera generando una pérdida de peso durante la fusión de las pacas de bote de aluminio, en las pruebas de quemado de la pintura y de laca del bote de aluminio se determinó esta pérdida de peso. En la **Tabla 3.2.4** se observa que el porcentaje de eficiencia es mayor en comparación con las técnicas anteriores, esto se debe a dos factores principalmente, el primero es al tratamiento del bote en un horno rotatorio que permite eliminar parcialmente la pintura para generar menos escoria y atrapamiento de metal en la misma, segundo se tiene metal fundido en la cámara de contención hasta la mitad evitando la oxidación del aluminio del bote. En este caso al realizar los cálculos finales se observa en la **Tabla 3.2.4** que existe un exceso de material esto se debe a las altas temperaturas con las que se trabajó, y la permanencia del metal fundido en la cámara de contención, formándose así óxidos de aluminio (alúmina) dando como resultado este material en exceso.

#### **4.2. Oxidación de Magnesio.**

Con respecto a la oxidación del elemento más crítico para esta aleación, el magnesio, en la técnica número uno y de acuerdo con la **Figura 3.3.1**, se observa que las pendientes son negativas indicando una disminución en la concentración del magnesio, se puede observar en estas curvas que al aumentar la pendiente se tiene una mayor oxidación del elemento, en estas curvas se puede observar que la mayor oxidación se presenta en la primer zona donde se inicia la fusión del bote de aluminio ya que tiene una mayor pendiente, y sucede lo contrario al final de la fusión las pendientes siguen

siendo negativas pero menor pendiente en valor absoluto. La **Tabla 3.3.3**, muestra la oxidación total del magnesio para estas dos fusiones teniendo mayor oxidación de magnesio la segunda fusión La **Figura 3.3.2** y la **Tabla 3.3.2**, es el caso de bote de aluminio con pintura parcialmente quemada, mostrando la oxidación del magnesio en la curvas se observa cómo se oxida el magnesio con respecto al tiempo, se puede observar que las pendientes son negativas mayormente, indicando que tan rápido se oxida el magnesio, se puede observar que en las dos curvas al inicio se tiene una mayor pendiente, indicativo de una mayor oxidación, inmediatamente después la pendiente disminuye siendo más horizontal disminuyendo la oxidación del magnesio. Se puede observar que, al tratar el bote en el horno rotatorio para eliminar parcialmente el recubrimiento, permite disminuir la oxidación de este elemento.

Para la segunda técnica de fusión, en la que consistió como una primera etapa la fusión de 8Kg de lingote con la composición del cuerpo de la lata con la finalidad de tener un baño metálico previo y una segunda etapa en donde se funden las pacas de aluminio, con pintura y otra fusión igual con pintura parcialmente quemada, identificándolas como: lingote más bote con pintura y lingote más bote con pintura parcialmente quemada.

Para el caso de la fusión de lingote más bote con pintura, la **figura 3.3.3**, muestra como las pendientes son negativas indicando que hay una oxidación del elemento magnesio, realizando los respectivos cálculos, la **tabla 3.3.3**, muestra que efectivamente existe dicha oxidación, pero a diferencia de la técnica número uno esta es de menor magnitud, debido a que se tiene un mayor volumen de metal fundido en la cámara de contención permitiendo que disminuya la oxidación del magnesio En la fusión de lingote más bote con pintura parcialmente quemada que se muestra en la **Figura 3.3.4**, muestra al inicio

una oxidación de magnesio debido a que la pendiente de las curvas es mayor, posteriormente la pendiente disminuye considerablemente manteniendo cercana a cero y al final se incrementa ligeramente, indicando una menor oxidación durante todo el tiempo de fusión. La **Tabla 3.3.4**, muestra los valores de oxidación o pérdida de magnesio, siendo los más bajos comparándolos con los demás métodos de fusión.

#### **4.3. El Titanio en la composición química.**

Uno de los principales recubrimientos que se emplean en las latas de refresco de aluminio es el de tipo epoxi-fenólico y en menor medida el acrílico. A estos compuestos se les puede dar una capa de color para mejorar la apariencia externa, adquiriendo colores dorados, plateados o blancos (denominado también cerámico y formado a partir de óxido de titanio).

Al analizar las composiciones químicas de cada una de las pruebas, se observa en las **Figuras 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 y 3.4.4** que el porcentaje de titanio se va incrementando principalmente para las fusiones de 8 Kg que fueron solo pacas con pintura y pacas con pintura parcialmente quemada, se puede apreciar la que obtuvo el valor más alto con titanio fue con el bote tratado en el horno de reverbero, esto se debe posiblemente a que se quema mayor parte de la laca pero de la pintura que contiene el óxido de titanio se queda adherido a la superficie del bote permitiendo que este se incorpore durante la fusión del bote en el horno de reverbero.

#### **4.4 El manganeso en la composición química.**

El porcentaje de manganeso que resulto de la composición química final para cada una de las fusiones se incrementó muy poco como se muestran en las **Figuras 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 y 3.5.4**, esto se debe a que los elementos que se oxidan con mayor facilidad son el magnesio y el aluminio, al disminuir estos elementos, y si el aluminio disminuye en

mayor cantidad se incrementa la composición de manganeso, hasta donde se sabe el recubrimiento de las latas no contienen manganeso, la única forma que se incrementa este, es por la pérdida de aluminio, incrementando la concentración de manganeso.

## 5. Conclusiones.

- Cuando se alimenta solo paca de bote en el horno de reverbero para fundirlo y recuperar el metal, se encontró que la eficiencia de recuperación se incrementa del 70.45% al 75.95% como resultado de aplicar un tratamiento previo al bote para eliminar parcialmente su recubrimiento original (laca y pintura).
- Cuando se alimenta la paca de bote en el horno de reverbero que contiene un baño metálico previo las eficiencias de incorporación aumentan significativamente hasta un 87.12% en el caso de pacas con pintura parcialmente quemadas y un 82.25% para pacas con pintura.
- Se encuentra que la presencia de un baño metálico previo en el horno de reverbero, así como la eliminación parcial de la pintura en las pacas alimentadas reducen notoriamente la cinética de oxidación del magnesio y con esto las pérdidas de magnesio.
- El contenido de titanio se incrementó conforme transcurre el tiempo de fusión, lo cual aparentemente debe a la composición química de los recubrimientos ricos en óxido de titanio.
- El manganeso es el elemento aleante que está en mayor proporción en el cuerpo del bote de bebida de aluminio, durante la fusión en el horno de reverbero, aplicando las dos técnicas de fusión se puede observar que el incremento de la concentración de manganeso es mínimo siendo el elemento que puede mantener su composición química constante, esto beneficia en la composición química ya que lo que se desea es obtener la misma composición del cuerpo del bote de bebida.

## 6. Bibliografía.

1. Schlesinger, M.E. (2007) "Aluminum Recycling", CRC Press Taylor and Francis Group, USA.
2. Clasificación de los Aluminios [Consultado en febrero de 2015], disponible en URL:  
<https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
3. Fabricación de las Latas [Consultado en febrero de 2015], disponible en URL:  
[http://www.alcoa.com/rigid\\_packaging/en/info\\_page/making\\_cans.asp](http://www.alcoa.com/rigid_packaging/en/info_page/making_cans.asp)
4. Estudio sobre la recuperación de envases de aluminio, arpal 2011 [Consultado en marzo de 2015], disponible en URL:  
<http://aluminio.org/wp-content/uploads/2012/10/Estudio-sobre-la-Recuperacion-de-Envases-de-Aluminio-2011.pdf>
5. Asociación europea de aluminio y organización europea de recicladores de aluminio [Consultado en febrero de 2015) disponible en URL:  
<http://packaging.world-aluminium.org/facts/life-cycle-data.html>  
[http://www.alueurope.eu/wpcontent/uploads/2011/08/EAA\\_Environmental\\_profile\\_report-May081.pdf](http://www.alueurope.eu/wpcontent/uploads/2011/08/EAA_Environmental_profile_report-May081.pdf)
6. Organización de las refinerías de aluminio [Consultado en abril de 2015], disponible en URL:  
[www.aluminium.org](http://www.aluminium.org)
7. Circuito abierto y Circuito cerrado [Consultado en enero de 2015], disponible en URL:  
<http://www.ecologiahoy.com/reciclaje-de-circuito-cerrado>  
<http://www.ecologiahoy.com/reciclaje-de-circuito-abierto>

8. Recubrimientos empleados en las latas de aluminio [Consultado en marzo de 2015], disponible en URL:

[http://www.guiaenvase.com/bases/guiaenvase.nsf/0/0B23788EF00042A8C125714D004EA6F0/\\$FILE/Recubrimientos.pdf?OpenElement](http://www.guiaenvase.com/bases/guiaenvase.nsf/0/0B23788EF00042A8C125714D004EA6F0/$FILE/Recubrimientos.pdf?OpenElement)

9. Tipos de hornos [Consultado en febrero de 2015], disponible en URL:

[http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria\\_hornos.pdf](http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria_hornos.pdf)

10. Rendón Julio, Cadavid Francisco, Amell Andrés (2008), FLAME STRUCTURE SIMULATION IN A METHANE/AIR COFLOW PARTIALLY PREMIXED BURNER, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, Universidad de Antioquia. Calle 67 N.º 53-108, Medellín, Colombia.

11. Méndez Cervantes Andrés (2012), Estudio de la disminución de escoria y su contenido metálico en el proceso de producción de aleaciones comerciales base aluminio para colada a presión a partir de chatarra en “industrial ligas metálicas” Tesis para obtener el grado de licenciatura, UNAM, Facultad de Química.

## 7. ANEXOS

### 7.1. Composiciones químicas de las latas de aluminio de bebidas analizadas

#### 7.1.1. Bote con pintura.

Program: AL-011

11/08/2014 08:30:30 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: M1 Lata C/Pintura (Fusion 1)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2669	0.4807	0.1532	0.887	0.890	0.0847	0.0081	0.0228	0.0053
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0158	0.0111	<0.0020	0.0001	97.2				

Muestra No.: M2 Lata C/Pintura (Fusion 1)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2378	0.4761	0.1513	0.885	0.847	0.0845	0.0079	0.0227	0.0052
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0165	0.0111	<0.0020	0.0001	97.3				

Muestra No.: M3 Lata C/Pintura (Fusion 1)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin Ruiz - Adrian amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2915	0.4896	0.1532	0.886	0.832	0.0837	0.0081	0.0223	0.0052
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0166	0.0111	<0.0020	0.0001	97.2				

### 7.1.2. Bote con pintura parcialmente quemada.

Program: AL-011

11/08/2014 09:16:07 PM

Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL

Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: M1 Lata C/Pintura (Replica)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin ruiz - Adrian Amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2406	0.526	0.1610	0.864	0.982	0.0943	0.0086	0.0228	0.0064
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0159	0.0105	<0.0020	0.0002	97.1				

Muestra No.: M2 Lata C/Pintura (Replica)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin ruiz - Adrian Amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2488	0.515	0.1626	0.882	0.946	0.0886	0.0083	0.0221	0.0060
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0149	0.0106	<0.0020	0.0001	97.1				

Muestra No.: M3 Lata C/Pintura (Replica)

Quality:

Usuario: Oswaldo Cano Vargas

Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2404	0.4995	0.1608	0.885	0.874	0.0886	0.0084	0.0221	0.0061
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0157	0.0109	<0.0020	0.0001	97.2				

Muestra No.: M4 Lata C/Pintura (Replica)  
 Usuario: Oswaldo Cano Vargas  
 Comentarios: Tesis: Licenciatura (8 Nov 14)

Quality:  
 Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2492	0.511	0.1635	0.888	0.868	0.0916	0.0086	0.0225	0.0059
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0160	0.0112	<0.0020	0.0002	97.2				

### 7.1.3. Lingote más Bote con pintura.

Program: AL-011  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL  
 Average (n=3)

11/30/2014 03:23:19 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Despues de ajuste (8kg Ling)  
 Usuario: Oswaldo Cano Vargas  
 Comentarios:

Quality:  
 Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2713	0.504	0.1586	0.881	1.275	0.0880	0.0078	0.0223	0.0054
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0190	0.0106	<0.0020	0.0001	96.8				

Program: AL-011  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL  
 Average (n=2)

03/05/2015 01:40:31 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: FUSION 1- M1  
 Usuario: OSWALDO CANO  
 Comentarios: TESIS LICENCIATURA

Quality:  
 Analista: ADRIAN M. AMARO /AGUSTIN RUIZ

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2545	0.4986	0.1510	0.877	1.236	0.0897	0.0082	0.0221	0.0048
	Ti	V	Co	Sr	Al				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0190	0.0113	<0.0020	0.0002	96.8				

Muestra No.: FUSION 1- M3  
 Usuario: OSWALDO CANO  
 Comentarios: TESIS LICENCIATURA

Quality:  
 Analista: ADRIAN M. AMARO /AGUSTIN RUIZ

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2784	0.4974	0.1522	0.875	1.233	0.0902	0.0081	0.0221	0.0049

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0184	0.0115	<0.0020	0.0002	96.8

#### 7.1.4. Lingote más Bote con pintura parcialmente quemada.

Program: AL-011  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL  
 Average (n=3)

12/13/2014 12:20:10 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Ajuste Mg (lata sin pintura)  
 Usuario: Oswaldo Cano Vargas  
 Comentarios: Tesis: Lic. (13 dic 2014)

Quality:  
 Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2098	0.4763	0.1653	0.901	1.181	0.0381	0.0062	0.0150	0.0048

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0143	0.0101	<0.0020	0.0001	97.0

Program: AL-011  
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL  
 Average (n=3)

12/17/2014 12:29:02 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: M1 (16 kg sin pintura) F1  
 Usuario: Oswaldo Cano Vargas  
 Comentarios: Tesis: Lic (13 dicimebre 2014)

Quality:  
 Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2154	0.4701	0.1665	0.906	1.159	0.0374	0.0064	0.0151	0.0048

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0143	0.0101	<0.0020	0.0001	97.0

Muestra No.: M2 (16 kg sin pintura) F1  
Usuario: Oswaldo Cano Vargas  
Comentarios: Tesis: Lic (16 diciembre 2014)

Quality:  
Analista: Agustin Ruiz - Adrian Amaro

	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.2108	0.4693	0.1642	0.901	1.116	0.0381	0.0062	0.0153	0.0048
	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Co</b>	<b>Sr</b>	<b>Al</b>				
	%	%	%	%	%				
$\bar{x}$	0.0141	0.0103	<0.0020	0.0001	97.0				