



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD DE METALÚRGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

*Tecnología para la elaboración del acero de bajo carbono  
S355JO en la planta de Acería de Acinox-Tunas.*

*Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero  
Metalurgia y Materiales*

*Diplomante: Aylen Martínez Castro*

\_\_\_\_\_

*Tutor: Ing. Vladimir Morera Díaz*

\_\_\_\_\_

*Moa, 2017*

**Declaración de autoridad:**

Yo: Aylen Martínez Castro

Autora de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

---

Aylen Martínez Castro

---

Ing. Vladimir Morera Díaz

## ***Pensamiento***

*“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad”.*

*Victor Hugo*

## ***Dedicatoria***

*Dedico este trabajo de diploma a mis padres por el apoyo y la confianza que siempre me han tenido, a mis hermanos, a mi familia y a todas mis amistades que siempre estuvieron cuando las necesitaba.*

## *Agradecimientos*

*Este es el resultado de mucho esfuerzo y sacrificio tanto de mi parte, como de la de personas que siempre están y estarán en mi consideración.*

*Agradezco enormemente a mi madre Osleidis T. Castro Hernández, que es la persona más especial de mi vida y ha contribuido en lo que soy hoy día, a mi padre Juan O. Espinosa Fernández y a mis hermanos Alexis Espinosa Castro y Alexey Espinosa Castro por siempre haberme apoyado, a mis abuelas y abuelos, a mis tíos, y en especial a Katia y Alexis que tanto han ayudado en mi formación, en fin, a toda esa familia linda que tengo.*

*Agradezco a mi querido tutor Vladimir Morera Díaz por haberme ayudado en el momento que más lo necesitaba y haber podido contar con sus conocimientos, así como a los trabajadores de ACINOX-Tunas.*

*Agradezco a las grandes amistades que he tenido en este periodo de mi vida y que siempre han estado cuando las necesité, a las niñas más lindas que pude conocer y con las que compartí los buenos momentos y que me acompañaron en los malos, a mis compañeros de aula, todos son mi familia universitaria; también agradezco a muchas otras personas que siempre recordaré. Agradezco a mis profesores por todo lo que me han enseñado.*

*Gracias, muchas gracias a todas estas personas, y a Dios. Pude cumplir una de las mayores metas de mi vida.*

## **RESUMEN**

En el trabajo se expone la tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO. Los análisis de composición química a las muestras de acero se realizaron con el cuantómetro OBLF QSG 750-II y se utiliza el analizador de gases LECO TC-136 para conocer el contenido de oxígeno en el metal. El proceso de fusión en el Horno de Arco Eléctrico de piqueta convencional contó con un nivel de corriente entre 38 y 42 kA y un voltaje entre los 350 y 400 V, se realiza la práctica del Pie Líquido que genera una energía de 2,40 MWh en las coladas intermedias, la intensificación con oxígeno produce una energía de 64,128 kWh y se realiza una efectiva práctica de Escoria Espumosa, el contenido de óxido de hierro en la escoria es de un 25 %. El proceso de desoxidación primaria del acero se efectúa con aluminio en sustitución del carbono o silicio y elimina 84,544 kg de oxígeno del acero con la necesidad de realizar un posterior desescoriado para evitar inclusiones que afecten la máquina de Vaciado Continuo. El ajuste del acero en el Horno Cuchara se realiza con ferrosilicio 75 y ferrosilico-manganeso, el rendimiento del manganeso en el proceso es de un 80 % y el silicio de un 47 % garantizándose la efectividad del proceso de elaboración del acero. La utilización del desoxidante aluminio genera una ganancia de aproximadamente 3017 cuc por colada.

Palabras claves: tecnología, acero S355JO, Horno de Arco Eléctrico, desoxidación.

## **ABSTRACT**

In the present work the technology of elaboration of the steel of low carbon S355JO is exposed. The chemical composition analyzes of the steel samples were performed using the OBLF QSG 750-II cuantometer and the LECO TC-136 gas analyzer was used to determine the oxygen content of the metal. The melting process in the Conventional Piston Electric Arc Furnace had a current level between 38 and 42 kA and a voltage between 350 and 400 V, the practice of the Liquid Foot which generates an energy of 2,40 MWh In the intermediate castings, the intensification with oxygen produces an energy of 64,128 kWh and an effective practice of Foaming Slag is carried out, the content of iron oxide in the slag is of 25 %. The primary desoxidation process of the steel is carried out with aluminum in substitution of the carbon or silicon and eliminates 84,544 kg of oxygen of the steel with the need to realize a later desescoriado to avoid inclusions that affect the machine of Emptying Continuous. The adjustment of the steel in the Spoon Furnace is made with ferrosilicon 75 and ferrosilico-manganese, the yield of the manganese in the process is of 80 % and the silicon of 47 % guaranteeing the effectiveness of the process of elaboration of the steel. The use of the aluminum desoxidizer generates a gain of approximately 3017 cuc per cast.

Key words: technology, steel S355JO, Electric Arc Furnace, desoxidation.

## INDICE

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Descripción del Flujo Tecnológico de la Acería de la empresa ACINOX-Tunas.....	8
1.3 Tecnología de elaboración de aceros.....	9
1.3.1 Características del Horno de Arco Eléctrico (HAE) .....	9
1.3.2 Fusión en el Horno de Arco Eléctrico (HAE) .....	10
1.3.3 Aplicación de Inyección de Oxígeno en el HAE: .....	11
1.3.4 Espumación de escorias .....	13
1.3.5 Suministro de Energía Eléctrica. ....	14
1.3.6 Proceso de desfosforación y desescoriado.....	15
1.3 Proceso de vertido .....	16
1.4 Proceso de desoxidación.....	17
1.5 Proceso en horno cuchara.....	19
<b>Conclusiones parciales del capítulo .....</b>	<b>20</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
2.1 Metodología de elaboración del S355JO.....	22
2.1.1 Régimen Eléctrico.....	22
2.1.2 Práctica del Pie Líquido.....	23
2.1.3 Intensificación con Oxígeno .....	23
2.1.4 Proceso de Desfosforación .....	23
2.1.5 Práctica de Escoria Espumosa .....	24
2.1.6 Cálculo del total de carbono y de silicio que aporta la carga total del Horno de Arco Eléctrico .....	25
2.1.7 Desoxidación primaria del acero .....	28



2.2 Toma de muestras y temperatura .....	30
2.2.1 Toma de Temperatura.....	30
2.2.2 Toma de muestra con tomamuestra.....	31
2.2.3 Equipos utilizados para la toma de muestra y temperatura.....	31
2.3 Análisis de composición química del acero .....	32
2.4 Ajuste del acero en el Horno Cuchara .....	34
2.9.1 Cálculo de las cantidades de los elementos de ajuste empleados para la fabricación del S355JO .....	34
<b>Conclusiones parciales .....</b>	<b>37</b>
<b>3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 Análisis del comportamiento eléctrico.....	38
3.2 Resultado de la intensificación con oxígeno .....	39
3.3 Resultados de la práctica de Escoria Espumosa.....	40
3.4 Determinación del carbono y silicio total de carga.....	42
3.5 Resultado de la desoxidación primaria del acero .....	44
3.6 Análisis químico del acero .....	46
3.7 Resultados del ajuste en el Horno Cuchara.....	48
<b>Conclusiones parciales .....</b>	<b>51</b>
<b>VALORACIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>55</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>57</b>

## **INTRODUCCION**

Se denomina acero, a la aleación de Hierro (Fe) y Carbono (C), a esta aleación básica se suele adicionar otros elementos que confieren al acero propiedades especiales.(J.M, 1991)

El acero constituye el material más importante en el desarrollo industrial actual y futuro del mundo, es un recurso significativo para la economía, el nivel de potencia económica de uno u otro estado se determina por la capacidad de acero fabricado, puesto que sin él no puede progresar la industria minera ni la construcción de maquinarias. (Kundrin, 1981)

La elaboración del acero es el proceso donde se realiza la aleación de hierro, carbono y otros metales, donde el carbono no supera el 2,1 % en peso de la composición de la aleación, alcanzando porcentajes entre el 0,2 % y el 0,3 %. Por la variedad y por la disponibilidad de sus dos elementos primordiales en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales, los aceros combinan la resistencia y la posibilidad de ser trabajados, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones. Son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinarias, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.(Ramirez, 2003)

Alrededor de un cuarto del acero producido mundialmente se lleva a cabo en el Horno de Arco, este método usa arcos de alta corriente eléctrica para fundir chatarra de acero y convertirlo en acero líquido de una composición química y temperatura específica, el calentamiento externo del arco permite un mejor control térmico que el proceso básico al oxígeno, donde el calentamiento es acompañado por la oxidación exotérmica de los elementos contenidos en la carga, esto permite fabricar aceros de calidad y aceros especiales a partir de chatarra porque es posible la adición de más aleantes que los posibles en la acería básica al oxígeno, tales como: el níquel, cromo, manganeso, vanadio, molibdeno, wolframio, niobio, y titanio; que son agregados en forma de ferroaleaciones y más oxidables que el hierro, en este ambiente reductor pueden

hacerse las adiciones de ferromanganeso, ferrocromo, ferrovanadio, para que no se pierdan por oxidación. (Urquiza, 1999).

Para hacer aceros especiales o aleados, tenemos que reducir la actividad del oxígeno en el horno y trabajar a temperaturas más altas de modo que los elementos de aleación sean más reducibles en relación al carbono; el arco eléctrico permite ambas cosas, el arco caliente del electrodo de carbono provee una atmósfera ligeramente reductora y las altas temperaturas (1800 °C) pueden ser alcanzadas en el baño sin que se dañe excesivamente el techo del horno, comparado con el horno Siemens-Martin, ya que hay una llama muy pequeña en el horno eléctrico, sin embargo, la acería eléctrica no es oxidante, y la mezcla escoria-metal no es intensa, por lo tanto, el contenido de carbono es mayor al 0,05 %, generalmente existe un alto contenido de nitrógeno de 40 a 120 partes por millón, comparado con las 30 a 50 partes por millón de acería básica al oxígeno, el nitrógeno, el cual hace al acero quebradizo, es absorbido por el acero líquido desde el aire en la zona de alta temperatura del arco y puede disminuirse soplando otros gases dentro del horno, o calentando con un arco pequeño y aplicando una vigorosa ebullición de monóxido de carbono o argón que agite el baño fundido. (Barcenas, 2010)

En los últimos 20 años el uso del Horno de Arco Eléctrico (HAE), para la producción de acero ha sido considerablemente grande. Han existido muchas razones para esto, pero principalmente todas se relacionan con el costo del producto y adelantos tecnológicos. (Medina, 2007)

Ha habido muchos adelantos en la tecnología del Horno de Arco Eléctrico, la mayoría de estos han tenido que ver con aumentos en la productividad conduciendo a la producción de aceros de menos costo.

Muchos Hornos de Arco Eléctrico con piqueras están en operación en Norteamérica, si se utiliza una piqueta de sifón sumergido, puede lograrse el vertido libre de escoria, aunque el mantenimiento puede ser una consecuencia, una piqueta nivelada permite el vertido del acero junto y esto es común en la industria de aceros inoxidables, actualmente a algunas piqueras de hornos se le han adaptado puertas de cierre correderas de manera que puede lograrse el cierre rápido del acero a verter, esto también permite el vertido del acero libre de escoria.

La necesidad de fabricar los diferentes aceros al carbono, aleados e inoxidable, principalmente en los países en vías de desarrollo con grandes yacimientos de hierro y níquel como Cuba, es de vital importancia. Por tal motivo, a partir de la década de los años 80 e inicios de los 90 del pasado siglo, se potencia en la provincia de Las Tunas la construcción de la industria siderúrgica, con el montaje y puesta en explotación de la planta productora de aceros inoxidable y al carbono ACINOX-Las Tunas.

La elaboración del aceros de bajo carbono en la planta de Acería de ACINOX Tunas resulta compleja, puesto a que luego del proceso de fusión en el Horno de Arco Eléctrico el acero necesita una desoxidación primaria, el desoxidante carbono elevaría el contenido de este mismo en el acero, y el silicio encarecería el proceso, por lo que se dificultaría la obtención del producto con la mejor calidad.

**Situación problemática:** la necesidad de implementar una tecnología para la elaboración del acero de bajo carbono S355JO utilizando el aluminio como desoxidante en sustitución del carbono y silicio para lograr una buena calidad en el producto final.

En correspondencia con la situación problemática existente, se plantea el siguiente **problema de investigación:** insuficiente conocimiento sobre la tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO utilizando al aluminio como desoxidante en sustitución del carbono y silicio.

Es por ello que el **objeto de investigación** es: tecnología de elaboración del acero al carbono S355JO.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo general** del trabajo: Proponer la tecnología para elaborar el acero de bajo contenido de carbono S355JO en la planta de Acería de ACINOX-Tunas, utilizando al aluminio como desoxidante en sustitución del carbono y silicio.

**Objetivos específicos:**

- Caracterizar la actividad del óxido de hierro en la escoria.
- Evaluar y calcular los principales elementos de la carga del Horno de Arco Eléctrico.
- Determinar la composición química de muestras de acero.
- Evaluar la desoxidación con aluminio y ajuste del acero al carbono S355JO.

- Efectuar una valoración económica del proceso de desoxidación con el uso del aluminio (Al).

### **Tareas del trabajo**

- Revisión bibliográfica relacionada con la tecnología de elaboración de aceros.
- Análisis del régimen eléctrico de funcionamiento del Horno de Arco Eléctrico (HAE) de piqueta convencional donde se realiza el proceso de fusión.
- Análisis de las características de la escoria, principalmente actividad del óxido de hierro (FeO) y basicidad de la escoria.
- Evaluación y cálculo el contenido de los principales elementos de la carga del Horno de Arco Eléctrico.
- Análisis químico de muestras de acero en las distintas etapas del proceso de elaboración y medición de la temperatura.
- Evaluación de la desoxidación primaria del acero utilizando aluminio y su posterior ajuste en el Horno Cuchara.
- Evaluación económica de la desoxidación con aluminio.

**Hipótesis:** Si se logra obtener una tecnología que facilite la elaboración del acero al carbono S355JO utilizando el aluminio como desoxidante en sustitución del carbono y el silicio se podrá obtener un producto con la calidad requerida.

**Campo de acción:** comportamiento de la desoxidación con aluminio en la elaboración del acero al carbono S355JO.

## **1 MARCO TEÓRICO**

En la realización de cada trabajo investigativo es necesario realizar una amplia revisión bibliográfica de los antecedentes de la temática a investigar. Todo esto posibilita una buena comprensión teórica del tema a estudiar, lo que facilita un juicio real de la situación actual en que se encuentra la línea de investigación.

El capítulo tiene como objetivo establecer los fundamentos teóricos de la tecnología de elaboración de aceros como base para la obtención del acero de bajo contenido de carbono S355JO en la empresa ACINOX-Tunas.

### **1.1 Antecedentes**

Aunque no se tienen datos precisos de la fecha en la que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir un metal susceptible de ser utilizado, los primeros utensilios de este metal descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3 000 a.c. La China antigua bajo la dinastía Han, entre el 202 a.c y el 220 d.c, creó acero al derretir hierro forjado junto con hierro fundido, obteniendo así el mejor producto de carbón intermedio, el acero, en torno al siglo I a.c, junto con sus métodos originales de forjar acero, los chinos también adoptaron los métodos de producción para la creación de acero Wootz, producido en India y Sri Lanka alrededor del 300 a.c. Este temprano método utilizaba un horno de viento, soplado por los monzones.

El hierro para uso industrial fue descubierto hacia el año 1500 a.c., en Medzamor, cerca de Ereván, capital de Armenia, la tecnología del hierro se mantuvo mucho tiempo en secreto, difundándose extensamente hacia el año 1200 a.c, los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero auténtico.

El modo más antiguo de transformar el arrabio en un material forjable fue inventado por Reamur en el siglo XVII. Consistía en obtener una fundición maleable, por lo menos superficialmente, por un tratamiento de descarburación, pero este proceso cayó en desuso por las dificultades involucradas, lentitud del proceso y oxidación del hierro.

Quince años más tarde, Benjamín Huntsmann conseguía fundir acero en un horno a crisol, fabricó sus propios crisoles de tierras capaces de soportar temperaturas alrededor de los 1700 °C.

Lo que entorpecía el avance de la tecnología en el acero era la oscuridad en la que se encontraba. En el siglo XVIII se desconocía el motivo por el cual el hierro forjado, el acero y el arrabio eran distintos. No fue sino en 1820 cuando Kersten planteó que era el contenido de carbono la razón de sus diferencias. El primer método para determinar con precisión el contenido de carbono en el acero fue desarrollado en 1831 por Leibig.

A finales del siglo XIX Wilhem Siemens desarrolló los primeros hornos de arco eléctrico para fusión de diversos metales, después Paul Hèroult y Paul Girod en Francia y Stassano en Italia los pusieron a punto hasta casi llegar a lo que son en la actualidad, a comienzos del siglo XX comenzó la sustitución de los hornos de crisol por los de arco; también el tamaño de éstos, que los llevó hasta 400 t de capacidad, hoy día se ha visto que es más rentable y adecuado el de 100 - 150 t de capacidad.(Barcenas, 2010)

Vera, (2009), plantea que en la elaboración de aceros la chatarra se carga al horno de arco eléctrico y se funde al exponerse al paso de una enorme corriente eléctrica, la corriente eléctrica llega a la chatarra a través de electrodos de grafito, cuando la chatarra se pasa al estado líquido, lo cual ocurre en algunos minutos, los operadores toman una muestra y la llevan al laboratorio de análisis, en cuestión de segundos, con la ayuda de espectrómetros modernos, se determina la composición química del acero, en particular, son de interés los siguientes elementos: carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio, cromo y bronce, el hierro, la base de la aleación, se determina por balance. Generalmente es necesario hacer algún ajuste a la aleación mediante la adición de otros elementos necesarios o formadores de escoria para retirar elementos indeseables como el fósforo o el azufre.

Botella, (1998), realizaron un estudio para evaluar el efecto del contenido de azufre y el grado de desoxidación sobre la ductilidad en caliente de aceros inoxidables austeníticos resulfurados, partiendo de una estructura de solidificación. Se realizaron ensayos de tracción en un sistema Gleeble, a temperaturas entre 1150 y 1250 °C, analizándose el parámetro de ductilidad en función del contenido de azufre, nivel de desoxidación, y del tipo, tamaño y

distribución de los sulfuros presentes, en este trabajo se utiliza el aluminio como agente desoxidante,

El aluminio refuerza significativamente la resistencia a la oxidación a las temperaturas elevadas y también aumenta la estabilidad de la fase ferrita a muy altas temperaturas hasta y más allá de 980 °C (1 800 °F). El aluminio en el hierro es muy reactivo a la temperatura de fusión del mismo y el contacto con el aire y la humedad debe ser insignificante, según (García et al., (2005)).

A. Palmaers, (1979) realiza un estudio sobre la desoxidación de aceros de bajo carbono con aluminio, manganeso, y silicio, estos desoxidantes según las coladas analizadas formaban inclusiones no metálicas en la buza de cuchara, en las coladas obturadas las inclusiones se ubicaban en el campo de la estabilidad de la alúmina, la disminución del caudal de acero durante el transcurso de la colada se debía a la formación de un depósito no metálico en la buza de cuchara, constituido por cristales inmersos en una matriz vítrea en la que habían poros y esferas de acero incluido, los cristales eran de espinela y alúmina alfa, y la matriz contenía principalmente óxido de manganeso, dióxido de silicio, alúmina y óxido de calcio.

Según Barcenás, (2010) los orígenes de la producción de acero en Hornos de Arco Eléctrico se aplicaba principalmente a la fabricación de aceros especiales, la situación cambió con el aumento del tamaño de las coladas y los altos costos de productividad. La obtención de aceros de bajo contenido de carbono se obtiene en altas tecnologías y en menor proporción.

(Morera, 2011) plantea que la adición del carbono de carga junto con la chatarra para alcanzar los niveles de este de destino en el baño, es la manera más rentable para obtener las unidades de carbono requerido. Desafortunadamente, la recuperación del carbono a partir del de carga, no siempre es constante y puede variar entre el 30 % al 80 % dependiendo del tamaño del carbón y del método de adición al horno, se ha podido demostrar que el tamaño y la calidad del carbón de carga, es muy importante para lograr recuperaciones buenas y constantes de carbono en el acero.

E. Inagaki, (1988) realiza estudios que mostraron que el uso óptimo del oxígeno para las operaciones convencionales de inyección está en el rango de 30 – 40 Nm<sup>3</sup>/t, sobre este nivel las pérdidas por rendimiento son excesivas y ya no resulta económico inyectar más oxígeno. Los resultados operativos típicos



han dado valores de sustitución de energía para el oxígeno en el rango de 2–4 kWh./Nm<sup>3</sup> de oxígeno, con un promedio de 3,5 kWh./Nm<sup>3</sup> de oxígeno, estos valores muestran que es probable que el carbono y el hierro estén reaccionando, además, algunos estudios han mostrado que el rendimiento del oxígeno (la cantidad que reacciona con el carbono), está en el rango del 70 – 80 %.

Socalici, A. (2013). En el trabajo se presentan los resultados del experimento que se refiere a la desulfuración y desoxidación de las escorias sintéticas con escorias del sistema ternario CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>. Los experimentos se hicieron en un horno con inducción de 10 kg de capacidad. Para formar las escorias reductoras se ha utilizado una mezcla compuesta de cal, alúmina y óxido de titanio en porcentaje de 2 % del peso de la carga de acero más escoria sintética. Para los experimentos se usaron mezclas mecánicas producidas por varias recetas y de cada experimento se tomaron muestras de escorias para determinar la composición química y muestras de acero para determinar el contenido de azufre y oxígeno. Los datos obtenidos fueron procesados en el programa de cálculo EXCEL, obteniéndose ecuaciones de correlación entre la eficiencia de la desulfuración y desoxidación y la composición química de la escoria sintética.

Reggiardo, (1989) realiza un diseño para crear una metodología que determine problemas de colabilidad de aceros de alto carbono calmados con manganeso, silicio y aluminio

## **1.2 Descripción del Flujo Tecnológico de la Acería de la empresa ACINOX-Tunas.**

El Proceso Tecnológico en la empresa ACINOX-Tunas comienza con la recepción y preparación de la carga metálica o chatarra en los fosos de almacenajes. Las cestas son cargadas al Horno de Arco Eléctrico (HAE) en el cual se realiza el proceso de fusión de la carga metálica (llevarla de estado sólida a líquida), después se realiza el proceso de desfosforación del metal líquido y la reducción del metal. Luego de ser fundida la carga metálica el metal líquido es vertido a una cazuela o más conocida como cuchara donde ocurre una desoxidación primaria, después esta por medio de un carro porta cuchara es llevada hacia la posición de Horno de Cuchara (HC). En éste agregado se

realiza el ajuste de composición química, calentamiento, homogenización de la temperatura y decantación de las inclusiones no metálicas del acero. Luego de haberse realizado el ajuste final del acero, se aumenta la temperatura del metal hasta alcanzar la temperatura de envío hacia la Instalación de Vaciado Continuo (IVC). En la IVC se realiza el cambio de estado del acero de líquido a sólido, con el fin de obtener el producto final que es llevado al área de producto terminado, en el cual se enfría el acero y luego es enviado a su destino final.

### **1.3 Tecnología de elaboración de aceros**

#### **1.3.1 Características del Horno de Arco Eléctrico (HAE)**

El Horno de Arco Eléctrico tiene forma cilíndrica, el fondo del horno consiste de un plato de forma esférica, la cuba asentada encima de esta es cilíndrica y la bóveda es una esfera aplanada. La mayoría de los HAE modernos son de la variedad de cuba dividida, esto significa que la cuba puede ser desacoplada y quitarse rápidamente del fondo (solera), esto minimiza grandemente el tiempo debido al cambio del refractario de la cuba, una vez que se quita la cuba, el fondo del horno puede ser también cambiado rápidamente, algunas acerías ahora siguen la práctica donde la camisa (cuba) se cambia sobre una base regular cada algunas semanas durante una rotación de solo 8 horas.

La pared del horno por encima de la línea de escoria, por lo general consiste de paneles enfriados por agua, estos paneles están colgados sobre una jaula enfriada también por agua que los soporta, la bóveda del HAE consiste de paneles enfriados por agua, la sección central de la bóveda que porta las cedas de los electrodos, es llamada delta de la bóveda y es una sección hecha de refractario que puede ser enfriada por agua en su anillo exterior, y el fondo del horno consiste de una armadura de acero con varias capas de refractario.

El horno se inclina para el vertido del acero y para el desescoriado. En el caso del vertido, el ángulo de inclinación hacia delante máximo estará en dependencia del tipo de fondo. Para piqueras convencionales, puede ser necesario inclinar el horno hasta un ángulo de 45° para poder verter completamente el acero. En la figura 1 se muestra el Horno de Arco Eléctrico perteneciente a la empresa ACINOX-Tunas.



Figura1 Horno de Arco Eléctrico de corriente alterna de ACINOX-Tunas

### **1.3.2 Fusión en el Horno de Arco Eléctrico (HAE)**

El período de fusión es el centro de las operaciones del HAE, este se ha convertido en un eficiente equipo de fusión, y diseños modernos se centran en maximizar la capacidad de fusión del HAE que se logra mediante el suministro de energía hacia el interior del horno, esta energía puede ser Eléctrica o Química, la energía Eléctrica se suministra mediante los electrodos de grafito y es generalmente el mayor contribuyente en las operaciones de Fusión. Inicialmente, se selecciona un TAP de voltaje intermedio para que los electrodos penetren al interior de la chatarra cargada al HAE con alto valor de corriente, para ello, se coloca chatarra ligera encima de la carga para acelerar la penetración de los electrodos, aproximadamente el 5 % de la chatarra se funde durante este período inicial donde los electrodos crean los orificios en el interior de la chatarra cargada al horno, después de 2 a 3 minutos, los electrodos habrán penetrado la chatarra lo suficiente para que un arco largo (alto voltaje – tap más alto y menos corriente) pueda utilizarse sin temor de dañar por radiación del arco la bóveda del HAE; y la energía química se puede suministrar a través de varias fuentes, tales como quemadores de oxi-combustible y la inyección de oxígeno, los quemadores de oxi-combustible de gas natural con oxígeno o una mezcla de oxígeno y aire, el calor es transferido a la chatarra por radiación y por convección y el calor es transferido dentro de la chatarra por conducción, en algunas operaciones, el oxígeno se utiliza para cortar chatarra, grandes piezas de chatarra toman más tiempo para derretirse en el baño que las piezas pequeñas, el oxígeno reacciona con el hierro

contenido en la chatarra caliente quemándose y produciendo un intenso calor para el corte de la chatarra, una vez generado el charco de acero líquido en el horno, el oxígeno se puede inyectar directamente en el baño, este reacciona con varios componentes presentes en el baño donde se incluyen entre otros, el aluminio, el silicio, el manganeso, el fósforo, el carbono y el hierro. Todas estas reacciones son exotérmicas (es decir, generan calor) y la energía suministrada o aportada ayuda en la fusión de la chatarra, los óxidos metálicos que se forman con el tiempo pasan a la escoria. La reacción del oxígeno con el carbono contenido en el baño produciendo monóxido de carbono que a su vez se puede quemar en el horno si hay oxígeno disponible. De lo contrario el monóxido de carbono se trasladará al sistema de evacuación directa de los gases. (Teoh, 1989)

El carbono es importante para las operaciones de refinación del HAE y puede contribuir con una cantidad considerable de la energía requerida en las operaciones de fabricación de acero, en la acería de Horno de Arco Eléctrico, el suministro de carbono proviene del que está contenido en la chatarra que se carga de las fuentes alternativas de hierro que se alimenta al horno, la cantidad de carbono contenido en estos alimentos del HAE, generalmente es menor que la contenida en el metal caliente y por lo general, alguna cantidad adicional de carbono es necesario agregar al carbón de carga. La reacción del Carbono con el oxígeno dentro del horno para producir monóxido de carbono (CO) resulta en una energía de entrada al proceso y ha llevado a reducciones sustanciales del consumo de energía eléctrica en operaciones del HAE, también es clave la generación de CO en el baño para lograr bajas concentraciones de gases disueltos (nitrógeno e hidrógeno) en el acero, éstos son evacuados hacia fuera junto con el monóxido de carbono, además, se decantan las inclusiones de óxidos presentes en el acero hacia la escoria. (Teoh, 1989)

### **1.3.3 Aplicación de Inyección de Oxígeno en el HAE:**

Durante los pasados 10 años la inyección de oxígeno se ha convertido en una parte inherente a las operaciones de fusión del HAE, ha sido reconocido en el pasado que las mejoras en la productividad en el Horno de Solera Abierta y en el BOF eran posibles a través del uso de oxígeno para proveer combustible para las reacciones exotérmicas, mientras anteriormente el oxígeno se utilizaba primeramente solo para la descarburización en el HAE a niveles de 3 – 8

Nm<sup>3</sup>/ton (96 –250 scf/ton), en las operaciones modernas en todas partes del 10 – 30 % de la entrega de energía se suministra por la vía de las reacciones exotérmicas del baño. (Robles, 2014)

A continuación se da una relación del aporte de energía química producto de la oxidación de los distintos elementos en el acero:

Tabla 1 Aporte de energía química producto de la oxidación de distintos elementos en el acero

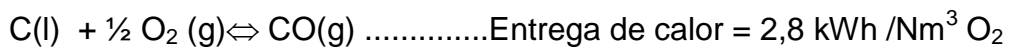
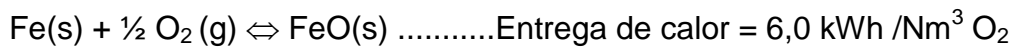
Elementos	Reacción	Oxígeno (Nm <sup>3</sup> )	kWh/Nm <sup>3</sup>	kWh
C	$C + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow CO$	828	3.043	2520
Si	$Si + O_2 \Rightarrow SiO_2$	144	10.674	1537
Mn	$Mn + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow MnO$	64	10.035	642
P	$P + 5/2O_2 \Rightarrow P_2O_5$	16	7.430	119
Fe	$Fe + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow FeO$	264	6.686	1765
Total			1316	6583

**Fuente:** Capacitación Horno de Arco Eléctrico, Acinox-Tunas. (Morera, V.2011)

Las lanzas de oxígeno pueden ser de dos formas. Lanzas enfriadas por agua que se utilizan generalmente para la descarburación, aunque en algunos casos se utilizan ahora para el corte de la chatarra también, la lanza enfriada por agua convencional se montó sobre una plataforma y penetra dentro del costado del horno a través de un panel, no penetran directamente dentro del baño, aunque a veces penetran dentro de la capa de escoria. Las lanzas consumibles que están diseñadas para penetrar dentro del baño o la capa de escoria, ellas constan de tubos consumibles que se van ajustando según se van consumiendo para darle la longitud de trabajo suficiente.(Teoh, 1989) . Los caudales de inyección recomendadas para diferentes tamaños de lanzas indican un caudal de aproximadamente 0,78 – 0,85 Nm<sup>3</sup>/t de capacidad del horno. En algunos procesos más modernos donde los materiales de alimentación están muy altos en contenido de carbono se requieren caudales de inyección equivalentes a 0,1 % de descarburización por min. En algunos casos los caudales de inyección pueden ser tan altos como 280 Nm<sup>3</sup>/min. (K. Bergman and R. Gottardi, 1990)

La principal desventaja para altos caudales de inyección de oxígeno es el efecto sobre el control del sistema de humos y de la producción de NO<sub>x</sub>. Los volúmenes del gas de salida se aumentan grandemente y la cantidad de CO generado es mucho mayor. Esto debe tenerse en cuenta cuando se contempla el uso incrementado de oxígeno.

Los ahorros de energía debido a la inyección de oxígeno surgen de reacciones exotérmicas (oxidación de carbono y hierro) y debido a la agitación del baño que conduce a la homogeneidad de la temperatura y composición del baño. El producto del corte de la chatarra es hierro líquido y óxido de hierro, así la mayoría del calor es retenido en el baño. La entrega teórica de energía para las reacciones del oxígeno en el baño es como sigue:



De esta forma queda claro que está disponible mucha más energía si se combustiona el Fe para producir FeO, aunque esto impactará negativamente sobre la productividad (rendimiento). (Morera, 2011)

Durante las operaciones de corte de la chatarra, el oxígeno reacciona primeramente con el hierro, luego cuando se ha formado un charco líquido el FeO es reducido de la escoria por el carbono presente en el baño, así el efecto neto es producir gas de CO del oxígeno que se inyecta.

Operar con la ventana de escoria abierta aumenta los requerimientos totales de evacuación del gas de salida. Si es posible las lanzas de oxígeno deben penetrar al horno más alto en la cuba (inclinación suficiente), otro factor a considerar es que la cantidad incrementada de Nitrógeno en el HAE probablemente conducirá a NO<sub>x</sub> incrementado. (Berciano, 2000)

#### **1.3.4 Espumación de escorias**

En años recientes más operaciones de HAE han empezado a utilizar una Práctica de Escoria Espumosa. La escoria espumosa se inició con operaciones de fusión de proceso de reducción directa (DRI) donde el FeO y carbono del DRI reaccionarían en el baño para producir CO el cual espuma la escoria. Al inicio de la fusión, la radiación del arco hacia las paredes es despreciable porque los electrodos están rodeados por la chatarra. Según avanza la fusión, la eficiencia de la transferencia de calor hacia la chatarra y el baño va disminuyendo y más calor se irradia desde el arco hacia las paredes.

Ocultando el arco en una capa de escoria, el arco se protege y la energía se transfiere hacia el baño.(P., 2008)

El oxígeno se inyecta junto con el Carbono para espumar la escoria produciendo gas CO en la escoria, en algunos casos solamente se inyecta carbono y el carbono reacciona con el FeO en la escoria para producir gas CO. Cuando se espuma, la capa de escoria aumenta de 4 pulgadas de espesor a 12 pulgadas, en algunos casos la escoria se espuma hasta tal punto que sale por las cedes de los electrodos ubicadas en el Delta de la Bóveda, las exigencias por el aumento en la eficiencia oscilan desde un 60 – 90 % con espumación de escorias comparado a 40 % sin esta, se ha reportado que al menos 0,3% de carbono debe eliminarse utilizando oxígeno con el fin de lograrse una buena práctica de escoria espumosa. Si se logra una escoria espumosa profunda es posible aumentar el voltaje del arco considerablemente. Esto permite una mayor velocidad de entrega de energía.

La espumación de escorias por lo general se realiza una vez que se logra un baño plano, no obstante con operaciones de Pie Líquido es posible iniciar la espumación de la escoria mucho más pronto.

Algunos de los beneficios atribuidos a la escoria espumosa son la disminución de las pérdidas de calor hacia las paredes, mejor transferencia de calor desde los arcos hacia el acero que permite una mayor velocidad de entrega de energía, fluctuaciones de potencia y voltaje reducidos, ruido eléctrico reducido, mayor longitud del arco (hasta el 100 %) sin aumentar las pérdidas de calor y consumos de electrodos reducidos y refractario. (D. L. Schroeder, 1991)

El único lado negativo de la práctica de escoria espumosa, es que se produce una gran cantidad de CO en el HAE, en muchas operaciones, una gran cantidad de carbono se elimina del baño con el fin de generar entrega de energía química para la operación, si este CO va a generarse de cualquier manera, el operador está bien advertido para asegurar que las condiciones de la escoria sean tales que traerá como resultado la espumación con el fin de beneficiarse de la generación de CO. (P., 2008)

### **1.3.5 Suministro de Energía Eléctrica.**

Un HAE requiere una energía muy alta. Cada tonelada de acero fundida requiere en el orden de 400 kWh (0,4 MWh), así para fundir 100 t de acero se requieren 40 MWh de energía eléctrica, para una acería que produzca a un

ritmo de un millón de toneladas al año, es necesario producir a razón de 100 t/h o más, para alcanzar este nivel necesitan ponerse en el HAE 40 MWh en cerca de media hora de tiempo de encendido para alcanzar la productividad deseada, esto significa que el nivel promedio de potencia en MW es del orden de 80 MW. Típicamente las acerías de HAE requieren niveles de energía en el rango de 20 – 200 MW (suficiente para una ciudad pequeña), tales niveles de energía tan grandes, solamente pueden suministrarse por la empresa de servicio público de una red de alto voltaje, donde están presentes voltajes en el rango de 100 – 500 kV, este es un sistema trifásico (la elección de tres fases, en vez de algún otro número de fases, se hizo a principios del siglo XX) y por esta razón el HAE de CA tradicional tiene tres electrodos. Dentro del HAE, la física del arco eléctrico impone voltajes del arco en el rango de 100 – 600 V (HAE de CA); por encima de estos niveles los arcos se hacen muy largos para ser manejables. Con el fin de obtener por lo tanto potencias de arco de los MW requeridos es necesario operar con corrientes en el rango de los kilo amperes; típicamente 20 – 80 kA (HAE de CA). La energía fluye de los generadores de la empresa de servicio a través de su red y llega a la planta de acero a un voltaje muy alto y debe por lo tanto convertirse a un bajo voltaje adecuado para los arcos, esta tarea es ejecutada por transformadores. (Berciano, 2000)

### **1.3.6 Proceso de desfosforación y desescoriado**

**Desfosforación:** Operación mediante la cual se elimina la mayor cantidad de fósforo posible del acero para la cual es necesario garantizar determinadas condiciones que permitan lograr dicho objetivo. (Ramirez, 2003)

**Desescoriar:** retirar del HAE la mayor cantidad de escoria a través de la ventana de trabajo. (Ramirez, 2003)

#### **Condiciones para la Desfosforación.**

Teniendo en cuenta el mecanismo de la desfosforación presentado anteriormente, las condiciones óptimas para remover al Fósforo del metal son las siguientes:

- Suficiente (FeO) en la escoria (> 20 %).
- Relativamente baja Temperatura (< 1600 °C).
- Actividad alta del (CaO) en la escoria ( $B > 2,20$ ).
- Eficiente Mezclado Metal-Escoria (con el  $\text{CO}_{(g)}$ ).



La retención del fósforo en la escoria está en función de la temperatura del baño, la basicidad de la escoria y del contenido de FeO presente en la escoria. A mayor temperatura o bajos contenidos de FeO, el fósforo se revertirá de la escoria hacia el acero líquido. La eliminación del fósforo normalmente se lleva a cabo lo antes posible en la colada. La práctica del pie líquido es muy beneficiosa para la eliminación del fósforo porque el oxígeno puede ser inyectado dentro del acero desde el mismo inicio de la colada, mientras que la temperatura del baño es aún baja. Temprano en la colada, la escoria contiene altos contenidos de FeO proveniente o remanente de la colada anterior, esto también ayuda en la eliminación del fósforo. La alta basicidad de la escoria (es decir, de alto contenido de CaO) es también beneficioso para la eliminación del fósforo, pero hay que tener cuidado de no saturar la escoria con cal, una escoria saturada de cal (CaO), conducirá a un aumento de la viscosidad de la escoria que hará a su vez que la escoria sea menos fluida y por tanto también menos eficaz para la eliminación del fósforo. En ocasiones se añade fluorita para ayudar a fluidificar la escoria (no es una práctica común, debido a que encarece el proceso y favorece la agresividad de la escoria hacia el revestimiento refractario del horno). La agitación con gas inerte (Ar y/o N<sub>2</sub>) también es beneficiosa porque renueva la interfaz metal/escoria que facilitará la cinética de la reacción. (Ramirez, 2003)

### **1.3 Proceso de vertido**

Una vez que la composición y la temperatura del baño deseada se alcanzan en el horno, se abre la piqueta y el horno se inclina para que el acero se pueda verter en una cuchara para ser transferida a la siguiente operación (por lo general a un horno cuchara o una estación de cuchara), durante el proceso de vertido se realiza las mayores adiciones de los aleantes calculado a partir de la composición química del acero al final del proceso del horno y del grado de acero deseado. Desoxidantes pueden ser añadidos al acero para reducir el contenido de oxígeno antes de continuar al próximo proceso, esto es comúnmente es llamado como colada bloqueada o acero muerto, comúnmente como desoxidantes se utilizan el aluminio o el silicio éste último en forma de ferrosilicio o silicomanganeso, la mayoría de las operaciones de acero al carbono tratan de que pase a la cazuela la menor cantidad de escoria proveniente del horno, una nueva escoria se construye durante el vertido con la

desoxidación primaria del acero. Para las operaciones en el horno cuchara, una escoria de aluminato de calcio es una buena opción para el control del azufre, materiales formadores de escoria se añaden a la cuchara durante el vertido para crear una capa de escoria antes de su transferencia al horno cuchara.(ONDE, 2005)

#### **1.4 Proceso de desoxidación**

“La operación tecnológica con la cual el oxígeno disuelto en el metal se transforma en un compuesto insoluble en el mismo o se elimina de éste último, se llama desoxidación”. (Rangel, 2009)

Entre los principales desoxidantes se encuentran:

##### **Carbono**

Se emplea en la segunda fase de la fabricación del acero como desoxidante o recarburante. En general es indiferente la clase de carbón, si bien hay que exceptuar la hulla, el lignito y la turba, pues los hidrocarburos que se desprenden por destilación pueden ceder hidrógeno al acero. Como la adición de carbón se hace siempre cuando ha terminado el período oxidante y por lo tanto no hay “hervido” del baño, este hidrógeno no se puede eliminar, ocasionando perjuicios al acero fabricado, para la desoxidación son buenos el coque y la antracita en la forma que se ha dicho, pero para la recarburación es mejor el empleo de grafito.

##### **Ferroaleaciones**

Las ferroaleaciones tienen una doble misión, pues pueden actuar como desoxidantes en la segunda fase (fase reductora) de la colada de acero o como vehículos de incorporación de los elementos respectivos (aleantes) en los aceros aleados. El constituir aleaciones con el hierro en lugar de usar los elementos puros tiene por causa, en primer lugar, la mayor facilidad y economía de obtención de las ferroaleaciones que los metales puros y por otro lado, que al ser su temperatura de fusión bastante más baja son más fácilmente digeribles por el caldo, el primer aspecto, el desoxidante, corresponde al ferrosilicio, ferromanganeso y ferrotitanio. El ferrosilicio es un enérgico desoxidante y su empleo es casi imprescindible en la fabricación del acero. El ferrotitanio es también un desoxidante y al mismo tiempo un desgasificante.

El ferromanganeso, aunque más débilmente que los anteriores es también desoxidante y además tiene la propiedad de sustituir al hierro en el sulfuro de hierro, este azufre, por ser soluble en el hierro, le comunica gran fragilidad en caliente, sin embargo, el sulfuro de manganeso es insoluble y se globuliza y pasa a la escoria o queda en los espacios intercristalinos permitiendo así el trabajo en caliente (laminación y forja) de los aceros. Cuanto más azufre tenga un acero más manganeso ha de haber presente para que el acero sea forjable o laminable. De todas formas, en mayor o menor cantidad, siempre ha de estar presente. (Contreras, 2012)

El segundo aspecto de la misión de las ferroaleaciones es el de obtener aceros aleados con el aleante que se introduce, en este caso se puede decir que entran todas las ferroaleaciones, incluso las tres mencionadas anteriormente, los metales, son el aluminio, níquel, cobre y en algunas ocasiones silicio y manganeso. (Berciano, 2000)

### **Desoxidación con silicio (Si) y aluminio (Al)**

El silicio y el aluminio al ser adicionados, aún en pequeñas cantidades, ejercen influencia en el tipo de lingote que producen, siendo el aluminio el más poderoso; una variación del 0,005 % al 0,015 % de aluminio, o del 0,01 % al 0,03 % de silicio cambia totalmente la estructura del lingote, ambos causan efecto desoxidante severo, por lo cual tienen gran uso en la producción de aceros calmados. El aluminio produce un endurecimiento de la ferrita, incrementa la templabilidad, no forma carburos sino que es un elemento grafitizante, es un gran desoxidante con afinidad para el nitrógeno con el que forma nitruros de aluminio, ayuda a evitar sopladuras y segregaciones al separar los gases del baño. Posee un gran poder en el control de tamaño de grano, los aceros tratados con aluminio tienen buena resistencia al envejecimiento y al impacto, mejora la mecanizabilidad, decreciendo la resistencia a la fluencia. (Contreras, 2012)

En grandes cantidades (del 0,6 al 3,0 %), el silicio mejora las propiedades magnéticas de los aceros de bajo carbono, permitiendo su empleo como núcleos de laminaciones en varias máquinas eléctricas, en el caso del aluminio, del 0,2 al 0,4 % refuerza la acción beneficiosa del silicio, pero tanto uno como otro reducen sensiblemente la conductividad térmica del acero, y ralentizan y dificultan su recalentamiento.

## 1.5 Proceso en horno cuchara

La metalurgia secundaria, también conocida con el nombre de metalurgia en cuchara, es el conjunto de procesos y operaciones que tienen por objetivo transformar el hierro líquido del convertidor o del Horno de Arco Eléctrico, sin ningún tipo de ajuste térmico ni de composición, en un líquido calibrado preparado para pasar a la etapa de solidificación. Su aplicación da como resultado un acero que cumple las especificaciones más estrictas exigidas hoy por la técnica. (Berciano, 2007)

Los objetivos de la metalurgia secundaria son:

1. Encaje preciso de la composición del acero. Realizar un ajuste de los elementos de aleación: C, Mn, Nb, Ti, Si.
2. El control de gases: Desgasificación. Reducción de la concentración de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, disuelta en el hierro líquido a la propia de la calidad del acero que se quiere obtener.
3. Alcanzar bajos contenidos de azufre, normalmente menores de 0,010 % y a veces menores de 0,002 %. Ajustar las especificaciones de las impurezas no metálicas (fósforo y azufre) disueltas en el hierro líquido a las propias de la calidad del acero que se quiere obtener.
4. Conseguir aceros más limpios. Eliminación de inclusiones no metálicas, fundamentalmente óxidos ( $Al_2O_3$ ).
5. El control de la morfología de las inclusiones. Dado que no es posible eliminar totalmente los óxidos indeseables en el acero, este proceso permite a los aceristas cambiar la composición y/o la forma de las inclusiones indeseables, residuales en el acero, de manera que sean compatibles con las propiedades mecánicas del acero final.
6. Calibrar la temperatura, de cuyo nivel depende la estructura de solidificación y las propiedades del acero.

Gracias a la metalurgia secundaria se pueden obtener las altas calidades de acero que exigen actualmente los clientes y que limitan los contenidos finales de azufre, oxígeno, hidrógeno e inclusiones no metálicas.

### **Conclusiones parciales del capítulo**

Como resultado de análisis del estado del arte y la base teórica existente, se plantean las siguientes conclusiones:

1. Varias investigaciones han estado encaminadas a la elaboración de aceros de bajo carbono que presentan obturación en las buzas de cuchara debido a inclusiones no metálicas de alúmina.
2. La bibliografía consultada reporta importantes contribuciones al desarrollo de la tecnología de elaboración de aceros en Hornos de Arco Eléctrico, así como a la desoxidación del acero, teniendo en cuenta que el desoxidante a escoger debe ser el más efectivo para el proceso.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. "La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos" (Ramirez, 2003).

El capítulo se basa en describir los métodos y las técnicas empleadas para la elaboración del acero de bajo contenido de carbono S355JO de alta demanda en el mercado internacional.

### Composición química

La composición química establecida para el acero de bajo carbono S355JO se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Composición química en % para el S355JO

%	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Sn
Min	0,06	1,15	-	-	0,15	-	-	-	-
Opt.	0,13	1,25	-	-	0,18	-	-	-	-
Máx.	0,11	1,30	0,025	0,025	0,25	0,25	0,25	0,4	0,04

En la elaboración del acero al carbono S355JO se emplearon diversos materiales como son:

1. Chatarra de acero al carbono como materia prima.
2. Horno de Arco Eléctrico de piqueta convencional para la fusión y calentamiento del acero.
3. Aluminio como desoxidante primario del acero.
4. Horno Cuchara para el ajuste y afino del acero.
5. Ferroaleaciones (FeSi-75 y FeSiMn) adicionadas en el horno cuchara.

### Clasificación de la chatarra de acero al carbono para la elaboración del acero de bajo contenido de carbono S355JO.

La chatarra de acero al carbono se clasifica de acuerdo a su tipo en:

- Chatarra al carbono externa, que constituye el 90 % de la carga. Dentro de la chatarra se encuentra la chatarra al manganeso y de hierro fundido.
- Chatarra al carbono interna o retorno, que es generada internamente en la planta, como por ejemplo fondo de artesa, metal derramado, pedazos de palanquillas y cabillas procedente del laminador-200T.

La chatarra al carbono externa se clasifica de acuerdo a su densidad en:

- Chatarra al carbono externa ligera: es una chatarra de baja densidad como hojalaterías y carrocerías.
- Chatarra al carbono externa mediana: es la chatarra que tiene mayor densidad que la ligera, pero menor que la pesada (tubos y vigas de mediano tamaño, chasis de carros ligeros y pacas ligeras).
- Chatarra al carbono pesada: masa de centrales, vigas y tubos de gran tamaño, rieles, motores y ruedas de locomotoras.

La chatarra al carbono interna se clasifica de acuerdo a su densidad en:

- Chatarra al carbono interna ligera: tramos de cabillas provenientes del laminador 200T.
- Chatarra al carbono interna mediana: palanquillas (palastro) de mediano tamaño procedente del laminador 200T.
- Chatarra al carbono pesada: metal derramado en forma de tortas, fondo de artesa, palanquillas, palastros de tamaño grande.

## **2.1 Metodología de elaboración del S355JO**

En la tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO se estudiaron las siguientes etapas:

### **1. Fusión de la carga metálica:**

- Régimen Eléctrico.
- Práctica del “Pie Líquido”.
- Intensificación con Oxígeno.

### **2. Calentamiento del Acero:**

- Práctica de “Escoria Espumosa”.

### **3. Vertido del Acero del HAE a la Cazuela:**

- Desoxidación Primaria del Acero.

#### **2.1.1 Régimen Eléctrico**

La principal importancia de establecer un correcto régimen eléctrico durante la fusión y calentamiento del acero, es el de derretir la carga metálica, y el calentamiento del acero lo más rápido posible con la mayor estabilidad del sistema y la menor irradiación del arco hacia el revestimiento refractario y los paneles enfriados del HAE, para ello se establecieron los parámetros de conexión durante todo el proceso. Un arco largo maximiza la transferencia de

potencia a la carga metálica (chatarra) y un charco líquido formará una piscina de metal en la solera (fondo) del horno.

### **2.1.2 Práctica del Pie Líquido**

Como es conocido, esta práctica no es más que dejar un charco de metal líquido en el horno después de la primera colada del día y evacuarlo en la última colada. Para el horno de ACINOX-Tunas el tonelaje más óptimo es de 15 toneladas (capacidad del horno y potencia del transformador), ellas consumirían 3,50 MWh en esta primera colada que deben ser descontados en la última (se cargan solo dos cestas); la energía que generó este pie líquido en las coladas intermedias es reportado en 2,40 MWh.

Para poder ser efectiva esta práctica, fue necesario realizar una modificación a la cuba del horno consistente en eliminar los paneles de cobre y aumentar la altura de la ventana de trabajo en 300 mm como se muestra en el anexo 1. Luego de esta modificación y realizado todos los cálculos pertinentes que aseguraban la funcionalidad y la resistencia de la cuba y cilindros de basculamiento del horno, la capacidad del mismo se incrementó de 60 hasta 85t. (Morera, 2004)

### **2.1.3 Intensificación con Oxígeno**

El proceso de intensificación se realizó para agilizar el proceso de fusión de la carga aprovechando la energía química generada por la combustión incompleta de una parte importante del carbono de carga al HAE, utilizando para ello la inyección de O<sub>2</sub>.



El 75 % de oxígeno inyectado reaccionará con el carbono acorde a la ecuación I y el otro 25 % reaccionará con el resto de los elementos presentes en el acero, principalmente con el Si, Fe, P y Mn. Es importante conocer además, que por cada Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> inyectado se logran 4,11 kWh de energía química en dependencia de la efectividad con la que se realice el proceso y de la presión del oxígeno inyectado.

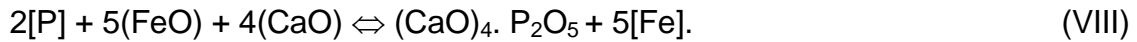
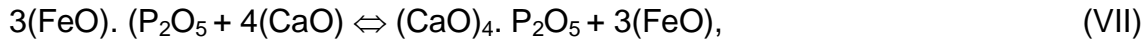
El proceso de intensificación se realizó mediante lanzas inyectoras de oxígeno.

### **2.1.4 Proceso de Desfosforación**

Se sabe que el fósforo al igual que el oxígeno, son ambos elementos tensoactivos. Por tanto la reacción de oxidación del fósforo obtiene su desarrollo



predominante no en la profundidad del baño, sino en la interfase Metal - Escoria. La desfosforación se expresa de la siguiente forma:



Es clave el suficiente desescoriado.

La operación de desescoriado se llevó a cabo para eliminar las impurezas provenientes del horno, es conveniente eliminar la mayor cantidad de fósforo contenido en la escoria tan temprano como sea posible en la colada (mientras la temperatura del baño es relativamente baja <1 600°C). La escoria del horno se evacuó a través de la puerta de escoria, esto elimina la posibilidad de reversión del fósforo al acero. Durante la operación de escoria espumosa, se inyectó carbón en la escoria para que reaccione con el FeO reduciendo el hierro a hierro metálico generando además monóxido de carbono que contribuye a hinchar la escoria. Si el contenido de fósforo es alto en la escoria y no ha sido eliminado antes de esta operación (inyectado de carbón), se producirá la reversión del fósforo.

En el HAE luego de que ocurra el proceso de desfosforación y el posterior desescoriado se tomó una muestra de acero para realizar el análisis químico y valorar el contenido de  $P_2O_4$  que hay en el acero.

Si después de tomada la primera muestra el contenido de fósforo es mayor que 0,01 %, menor que el especificado en la orden de producción se procede a un desescoriado, luego se adicionan 300 kg de cal y se oxidará hasta lograr un porcentaje de carbono menor o igual que 0,17 procediendo a la realización de un nuevo desescoriado. Se toma muestra para verificar el porcentaje de fósforo. Esta operación se realizó hasta mientras no se lograra el porcentaje de fósforo que garantice el solicitado por el cliente (0,025 %).

### **2.1.5 Práctica de Escoria Espumosa**

Una vez fundida la tercera cesta al 80-90 % se inyectó por una lanza oxígeno y por la otra carbono en la interfase metal-escoria, con la formación de  $CO_{(g)}$  a través de la reacción de  $[C] + 1/2O_{2(g)} = CO_{(g)}$ , que espuma la escoria y cubre el arco de los tres electrodos, aprovechándose prácticamente toda la energía

suministrada por el arco eléctrico en calentar el metal hasta la temperatura de vertido en un mínimo de tiempo, con importantes ahorro de energía eléctrica, electrodos de 500 mm de diámetro y refractarios.



Para la correcta realización de la escoria espumosa durante el calentamiento del metal en el Horno de Arco Eléctrico, es preciso mantener ciertos parámetros en los rangos óptimos requeridos para tal fin. Dentro de estos parámetros está el contenido de FeO en la escoria dado por el contenido de O<sub>2</sub> en el metal y este a su vez está relacionado con el contenido de C en el metal. Por tal motivo es imprescindible establecer el rango de carbono en el acero líquido y con ello obtener el FeO óptimo para la estabilidad de la espuma durante la realización de esta práctica. En nuestra práctica el rango óptimo es entre 0,08 – 0,15 % de C y con ello de 20 – 25 % de FeO en la escoria (alrededor de 800 ppm de O<sub>2</sub> disuelto en el metal). El índice de espumamiento ( $\Sigma$ ) define la estabilidad de la espuma y está en función de las propiedades de la escoria y establece que la estabilidad de la espuma aumenta con un aumento de la viscosidad superficial de la escoria ( $\mu$ ) y una disminución tanto de la densidad ( $\rho$ ) como de la tensión superficial ( $\gamma$ ) tal y como se representa:

$$\Sigma = b * g \frac{\mu}{\sqrt{\rho * \gamma}} \quad (2.1)$$

$$\gamma = 0.75 - 0.57 \frac{\%SiO_2}{100} - 0.14 \frac{\%FeO}{100} \quad (2.2)$$

### 2.1.6 Cálculo del total de carbono y de silicio que aporta la carga total del Horno de Arco Eléctrico

La determinación del total de carbono en la carga del HAE es muy importante para la determinación del total de oxígeno a introducir durante el proceso de intensificación para aumentar productividad y producir energía química y con ello disminuir el consumo de energía eléctrica. La carga metálica del HAE es muy variada y trae consigo variabilidad en su composición química, por ello es importante ser lo más preciso posible en los contenidos de sus elementos, para lo anterior se realizan muestreos en los Fosos de Chatarra de forma periódica.

Es importante conocer que el hierro fundido posee más del 2,20 % de carbono y puede llegar a ser tan alto como el 4,50 % producto a que estas piezas se fabrican acorde a un pedido y/o futuro uso de la misma; es importante conocer también que no es fácil realizarle muestreo pues no se puede cortar con un simple equipo de oxicorte y por ello el mundo del acero como promedio utiliza hasta un 5 % máximo de hierro fundido en la carga total del horno para evitar una variabilidad muy alta en la estimación del carbono total de la carga.

#### 2.1.6.1 Contenido de carbono promedio de los elementos de carga al HAE

Chatarra de Acero: 0,25 %.(Tomado del certificado de calidad de la Chatarra de Acero)

Hierro Fundido: 3,50 %.(No se adiciona hierro fundido para obtener el acero de bajo carbono S355JO por su alto contenido de carbono)

Carbón II de Carga: 84,02 %.(Tomado del certificado de calidad del Carbón II de Carga)

Nota: El Carbón II de Carga puede ser Antracita o Coque y el contenido de Carbono en ambos oscila alrededor del 84,02% y se define como Carbón Fijo, el resto es Cenizas, Materiales Volátiles, Azufre, Humedad y otros.

#### Determinación del carbono total de carga:

$$T_{\text{Carbono-Carga}} = \left( \frac{(C_{\text{II-Carga}} * C_{\text{Fijo}}) + (T_{\text{Chatarra}} * L_{\text{C-Chatarra}}) + (T_{\text{HF}} * L_{\text{C-HF}})}{100} \right) \quad (2.3)$$

Donde;

$T_{\text{Carbono-Carga}}$ : Total de Carbono en la carga al HAE, (kg).

$C_{\text{II-Carga}}$ : Carbón de carga al HAE, (kg).

$C_{\text{Fijo}}$ : Contenido de Carbono del carbón de carga, (%).

$T_{\text{Chatarra}}$ : Total de chatarra de carga al HAE, (kg)

$L_{\text{C-Chatarra}}$ : Contenido de Carbono promedio de la chatarra de carga al HAE, (%).

$T_{\text{HF}}$  : Total de hierro fundido de carga al HAE, (kg).

$L_{\text{C-HF}}$ : Contenido de Carbono en el hierro fundido de Carga al HAE, (%).

Los datos del total de carbón de carga y total de chatarra de carga al HAE por colada, son tomados de la tabla 3 del Anexo 3.

#### 2.1.6.2 Determinación del total de oxígeno a inyectar

$$T_{\text{Oxígeno-Inyectar}} = \left[ \left[ \left( \frac{T_{\text{Carbono-Carga}} * R_{\text{Carbono}}}{100} \right) - \left( \frac{C_{\text{C-Optimo}} * Q_{\text{Liq.}}}{100} \right) \right] * \frac{MA_{O_2}}{MA_C} * CC_{O_2} \right] * \frac{100}{R_{O_2}} \quad (2.4)$$

Donde;

$T_{\text{Oxígeno-Inyectar}}$ : Total de Oxígeno a inyectar para oxidar el Carbono requerido ( $\text{Nm}^3$ ).

$T_{\text{Carbono-Carga}}$ : Total de Carbono en la carga al HAE, (kg).

$R_{\text{Carbono}}$ : Rendimiento del Carbono ( $\approx 85\%$ ).

$C_{\text{C-Optimo}}$ : Contenido de Carbono óptimo ( $0,08\%$ ) para la realización de la Escoria Espumosa.

$Q_{\text{Liq.}}$ : Masa de acero líquida a obtener (kg). (Tomada de la tabla 3 del Anexo 3)

$MA(\text{O}_2)$ : Masa Atómica del Oxígeno ( $16 \text{ kg}$ ),  $\text{kg}/\text{átomos}$ .

$MA_{\text{C}}$ : Masa Atómica del Carbono ( $12 \text{ kg}$ ),  $\text{kg}/\text{átomos}$ .

$CC(\text{O}_2)$ : Coeficiente de conversión ( $0,72 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ) o volumen que ocupa  $1 \text{ kg}$  de Oxígeno.

$R(\text{O}_2)$ : Rendimiento del Oxígeno ( $\approx 75\%$ ) en función del carbono que oxida.

**El Rendimiento del oxígeno es un parámetro que depende de muchos factores como son:**

- La composición química de los materiales de carga: Por ejemplo si el contenido promedio de silicio en la chatarra aumenta, disminuye el rendimiento del oxígeno con relación al carbono (mayor afinidad del silicio por el oxígeno que el carbono).
- Flujo y presión de inyección del oxígeno: Determinante para la penetración en el baño metálico y eficiencia en el corte de chatarra.
- Estado técnico de los portalanças: Si los portalanças presentan salideros, disminuye el rendimiento del oxígeno.
- Forma y uso de las lanzas: Es importante la inclinación y ubicación de la misma en las zonas donde exista aún chatarra por cortar.

La determinación del total de silicio en la carga del HAE es muy importante para la determinación del total de cal a introducir durante el proceso de fusión para neutralizar la acidez de la escoria al combinarse el silicio con el oxígeno y formar el compuesto sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de características ácidas. La chatarra al carbono utilizada en nuestra investigación presenta una media de  $0,160\%$ .

### 2.1.6.3 Determinación del Silicio total de carga

$$T_{\text{Sílice-Carga}} = \left( \frac{(T_{\text{Chatarra}} * L_{\text{Si-Chatarra}}) + (T_{\text{HF}} * L_{\text{Si-HF}})}{100} \right) \quad (2.5)$$

Donde;

$T_{\text{Silicio-Carga}}$  : Total de Silicio que aporta la carga al HAE, ( kg).

$T_{\text{Chatarra}}$ : Total de chatarra de carga al HAE, (kg).

$L_{\text{Si-Chatarra}}$ : Contenido de Silicio promedio de la chatarra de carga al HAE, ( %).

$T_{\text{HF}}$  : Total de hierro fundido de carga al HAE, (kg).

$L_{\text{Si-HF}}$ : Contenido de Silicio en el hierro fundido de carga al HAE, (%.)

No toda la sílice que se forma pasa a la escoria, sino una parte de ella se volatiliza y por tanto pasa a los gases extraídos del horno, pero no hay una congruencia en la mayoría de ellas donde plantean desde un 5 % hasta un 20 %. Como seguridad para el cálculo de la Cal a añadir tomaremos que toda la sílice formada pasa a la escoria.

#### **2.1.6.4 Determinación del total de Cal para neutralizar la acidez de la escoria**

$$T_{\text{Cal}} = \left[ \left( \frac{T_{\text{Silicio-Carga}} * MM_{\text{SiO}_2}}{MA_{\text{Si}}} \right) * IB \right] * \left( \frac{10000}{L_{\text{CaO-Cal}} * R_{\text{Cal}}} \right) \quad (2.6)$$

Donde;

$T_{\text{Cal}}$  : Total de Cal a añadir para neutralizar la acidez de la escoria, (kg).

$T_{\text{Silicio-Carga}}$  : Total de Silicio que aporta la carga al HAE, (kg).

$MM_{\text{SiO}_2}$ : Masa Molecular del  $\text{SiO}_2$  (60 kg).

$MA_{\text{Si}}$ : Masa Atómica del silicio (28 kg).

$IB$  : Índice de Basicidad deseado (2,20) ,adimensional.

$L_{\text{CaO-Cal}}$ : Ley o contenido de CaO presente en la cal (%).

$R_{\text{Cal}}$ : Rendimiento de la cal como material (%) (Smirnov & Fanjul, 1984).

El rendimiento de la cal está dado principalmente por la presencia de finos que al adicionar la cal en el interior del horno, éstos son arrastrados por el sistema de aspiración de los gases y por tanto no van a formar parte de la escoria, por lo que se tomó un rendimiento del 95 % y un 5 % de finos.

#### **2.1.7 Desoxidación primaria del acero**

Una vez que la composición y la temperatura del baño deseada se alcanzaron en el horno, se abre la piqueta y el horno se inclinó para que el acero se pudiera verter en una cuchara para ser transferida a la siguiente operación (por lo general a un horno cuchara o una estación de cuchara), durante el proceso de vertido se realizan las mayores adiciones de los elementos,

calculado a partir de la composición química del acero al final del proceso del horno y del grado de acero deseado. Desoxidantes pueden ser añadidos al acero para reducir el contenido de oxígeno antes de continuar al próximo proceso, esto comúnmente es llamado como colada bloqueada o acero muerto, como desoxidantes se utilizan el aluminio o el silicio éste último en forma de ferrosilicio o silicomanganeso, en la investigación se utilizó el aluminio. La mayoría de las operaciones de acero al carbono tratan de que pase a la cazuela la menor cantidad de escoria proveniente del horno, una nueva escoria se construye durante el vertido.

Como para la realización de la escoria espumosa, el rango contenido del carbono en el acero debe estar en el orden de los 0,08 – 0,15 %; trayendo como consecuencia que al final del proceso del HAE el contenido de oxígeno disuelto esté en el orden de hasta los 800 ppm, se hace necesario disminuirlo no en el HAE, sino durante el vertido del mismo a la cazuela y más aún en nuestro caso que el vertido es por piquera sumergida y la posibilidad del paso de escoria del horno a la cazuela es inevitable. Para la determinación del contenido de oxígeno en el acero se utilizó el equipo LECO TC 136(figura 5)

### **Combinación del Aluminio durante el Vertido del acero del HAE a la Cazuela:**

Oxidación del aluminio con el oxígeno disuelto en el metal:



La realización de una desoxidación primaria del acero durante el vertido del Horno de Arco Eléctrico a la cazuela fue de gran importancia para el posterior tratamiento del mismo en el Horno Cuchara pues disminuye el tiempo de proceso, aumenta el rendimiento de los elementos aleantes y disminuye los índices de consumo, tanto de energía eléctrica como de electrodos y refractarios.

Luego del proceso de desoxidación con aluminio durante el vertido y el posterior desescoriado, el acero se trasladó al Horno Cuchara y se tomó una muestra para realizar el análisis químico y valorar el contenido de cada elemento presente en el acero, y se midió la temperatura.

## 2.2 Toma de muestras y temperatura en el proceso

### 2.2.1 Toma de Temperatura

- Antes de medir la temperatura se deberá retirar el oxígeno, el carbón, esperar 20-30 segundos que no haya reacción ni escoria espumosa y entonces el fundidor introducirá la lanza en el baño metálico de forma tal que haga contacto con el acero líquido, observará el semáforo que se encuentra a su izquierda y comprobará el encendido de la luz amarilla la cual indica que se está efectuando la medición. Al cabo de 3 – 4 segundos el semáforo reflejará la luz roja y al mismo tiempo sonará la sirena indicando que se efectuó la medición de la temperatura. Siempre que se cumpla con lo indicado en este punto no será necesario parar el arco para realizar la toma de temperatura.
- Dicha medición se reflejará en el equipo SIDERMES situado en la cabina del Horno de Arco Eléctrico. Si al final de los 3 ó 4 segundos la luz amarilla no cambia y la sirena no suena, entonces se sacará la lanza del baño metálico y se comprobará el contacto de la punta de la lanza con la del termopar, conexión del cable de alimentación, estado técnico de la lanza y semáforo.
- En caso de que el valor de temperatura reflejado en el equipo SIDERMES sea fijo, la medición es correcta, de no ser así, el valor de temperatura se considerará incorrecto y tendrá que repetirse la medición nuevamente.

En la figura 2 se muestra el semáforo y el equipo SIDERMES utilizados para la medición de temperatura.



Figura 2. Sidertemp A1- II y semáforo para la toma de temperatura.

A la izquierda Sidertemp A1- II, derecha semáforo

### 2.2.2 Toma de muestra con tomamuestra

- El primer fundidor de campo introducirá el tomamuestra en el baño metálico con ayuda del tubo destinado a este fin, esperará 4-10 segundos como máximo y entonces extraerá del baño metálico el tubo con el tomamuestra, al que le quitará la "chambelona" donde se encuentra la muestra de acero. Dicha muestra se enviará al laboratorio para el análisis de la composición química. Si la muestra es para analizar gases se debe tener en cuenta que junto con la "chambelona" salga el pin.
- En caso de que sea un termopar-tomamuestra, la muestra se tomará al mismo tiempo que se toma la temperatura.
- Tomar siempre muestra de escoria en las coladas con numeración terminadas en 0 y 5, antes del vertido tanto para acero al carbono como para inoxidable.

### 2.2.3 Equipos utilizados para la toma de muestra y temperatura

Termopar: Como se muestra en la figura 2 es un dispositivo para la toma de temperatura del acero líquido, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener.

Tomamuestra: Es un dispositivo para la toma de muestra de composición química del acero líquido, el cual en su interior cuenta con una CHAMBELONA como se ve en la figura 3.



Figura 3 Termopar y Tomamuestra para la toma de temperatura y muestras  
A la izquierda se encuentra el termopar y a la derecha el Tomamuestra.



Chambelona: Molde metálico que se encuentra en la punta del tomamuestra que al ser introducido en el acero líquido, recepciona una muestra del mismo.

### **2.3 Análisis de composición química del acero**

Para realizar el análisis de composición química y contenido de oxígeno se utilizó el cuantómetro OBLF QSG 750-II (figura 4), y el analizador de gases LECO TC-136 (figura 5). La muestra de composición química en los distintos puntos del proceso mencionados anteriormente se le realiza a veinte coladas de muestra.

El cuantómetro OBLF QSG 750-II es un instrumento para la determinación simultánea y multicanal de la composición química de una amplia gama de muestras metálicas. Para esto utiliza una chispa de alta energía producida bajo atmósfera de Argón inerte entre un electrodo y la muestra del material sometido al análisis. La chispa provoca en la superficie de la muestra la emisión de una radiación con las longitudes de onda características de cada elemento constituyente de la muestra. La radiación emitida pasa a través de una rendija primaria y experimenta, a través de una red de difracción, la separación de las distintas longitudes de onda correspondientes a los diferentes elementos que la componen, esta luz ya separada pasa a través de la rendija secundaria correspondiente y es enfocada por un espejo plano a un fotomultiplicador, el cual convierte la intensidad de luz recibida en un valor de intensidad de corriente eléctrica. Se procede seguidamente a la medida de las intensidades a través de una unidad microprocesador para posteriormente lograr una conversión precisa mediante el uso de un software específico instalado en una computadora y obtener los valores de concentración de cada elemento, según una curva previamente montada.



Figura 4 Cuantómetro OBLF QSG 750-II

El LECO TC 136 es un instrumento controlado por un microprocesador, determina simultáneamente nitrógeno y oxígeno (total en ambos casos) y posee un Horno de Electrodo EF-100.

El nitrógeno se mide por conductividad térmica, y el oxígeno por detección infrarroja y se detecta en forma de dióxido de carbono. La determinación se inicia poniendo un crisol de grafito vacío entre los dos electrodos del horno. Luego se pasa una corriente eléctrica intensa a través del crisol, con lo cual éste se calienta y desprende los gases atrapados en el grafito del crisol. A esta etapa o fase se le llama desgasificación. A continuación, la muestra cae al crisol, el cual se aísla de la atmósfera y es bañado por el gas portador (He) para eliminar todos los gases atmosféricos. Luego, a través del crisol, pasa una corriente eléctrica intensa (corriente del análisis) que calienta y funde la muestra, liberando los gases presentes en la misma. A temperatura muy alta ( $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y en atmósfera inerte (He) el oxígeno que se desprende de la muestra se combina con el carbono del grafito del crisol para formar monóxido.



Figura 5 Medidor de nitrógeno y oxígeno LECO TC 136

## 2.4 Ajuste del acero en el Horno Cuchara

### Material de ajuste

El ferro silicio manganeso (FeSiMn) con 65 % Mn y 16 % Si.

El ferro silicio 75 %, con 75 % de Si.

### 2.9.1 Cálculo de las cantidades de los elementos de ajuste empleados para la fabricación del S355JO

El acero S355JO tiene en su composición química final bajo por ciento de carbono por lo que durante el vertido se adicionó aluminio para la desoxidación primaria.

#### Determinación de la cantidad de Mn a añadir en el HC

$$m_{(Mn)HC} = \frac{(\%Mn_{OPTIMO} - \%Mn_{MUESTRA}) \cdot QL}{100} \quad (2.7)$$

Donde:

$m_{(Mn)HC}$ : Cantidad de Mn de ajuste al HC, kg;

$\%Mn_{OPTIMO}$ : Porcentaje de manganeso final o del cliente, %

$\%Mn_{MUESTRA}$ : Porcentaje de manganeso en la muestra, %

QL: Cantidad de acero líquido, Kg.

#### Determinación de la cantidad de FeSiMn a añadir en el HC, 65 % Mn.

$$m_{(FeSiMn)} = \frac{m_{(Mn)HC}}{Ley_{Mn-FeSiMn}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

#### Determinación del silicio contenido en el FeSiMn adicionado en el HC.

$$m_{(Si-FeSiMn)} = \frac{m_{(FeSiMn)} \cdot Ley_{(Si-FeSiMn)}}{100} \quad (2.9)$$

#### Determinación del silicio necesario adicionar para el ajuste del acero.

$$m_{(Si)HC} = \left( \frac{(\%Si_{OPTIMO} - \%Si_{MUESTRA}) \cdot QL}{100} \right) - m_{(Si-FeSiMn)} \quad (2.10)$$

$m_{(Si)HC}$ : Cantidad de Si de ajuste al HC, kg;

$\%Si_{OPTIMO}$ : Porcentaje de silicio final o del cliente, %.

$\%Si_{MUESTRA}$ : Porcentaje de silicio en la muestra, %

**Determinación de la cantidad de FeSi-75 a añadir en el HC, 75 % Si.**

$$m_{(FeSi-75)} = \frac{m_{(Si)HC}}{Ley_{Si-FeSi75}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

**Determinación del rendimiento de los materiales (Mn y Si).**

$$R_{(Si,Mn)} = \frac{m_{(Si,Mn)sale}}{m_{(Si,Mn)entra}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

$R_{(Si,Mn)}$ : Rendimiento del Mn y Si, (%)

$m_{(Si,Mn)sale}$ : Cantidad de Mn y Si que sale en el acero final, (kg)

$m_{(Si,Mn)entra}$ : Cantidad de Mn y Si que entra con acero líquido vertido del HAE y con las ferroaleaciones adicionadas en el HC, (kg)

**Determinación de la cantidad de Mn y Si que entra con el acero líquido vertido del HAE.**

$$m_{(Si,Mn)vertHAE} = \frac{\%_{(Si,Mn)mustraHAE} \cdot QL}{100} \quad (2.13)$$

$m_{(Si,Mn)vertHAE}$ : Cantidad de Mn y Si que entra con acero líquido vertido del HAE, kg.

$\%_{(Si,Mn)mustraHAE}$ : Contenido de Mn y Si en el acero líquido vertido del HAE. (Tabla 3 del anexo 3.)

$QL$ : Cantidad de acero líquido, kg;

**Determinación de la cantidad de Mn y Si que entra con las ferroaleaciones (FeSiMn y FeSi-75) adicionadas en el HC.**

$$m_{(Si,Mn)ferroaleaciones} = \frac{\%_{(Si,Mn)ferroaleaciones} \cdot QL}{100} \quad (2.14)$$

$m_{(Si,Mn)ferroaleaciones}$ : Cantidad de Mn y Si que entra con las ferroaleaciones adicionadas en el HC, (kg)

$\%_{(Si,Mn)ferroaleaciones}$ : Contenido de Mn y Si en las ferroaleaciones.

**Determinación del total de Mn y Si que entra con acero líquido vertido del HAE y con las ferroaleaciones adicionadas en el HC.**

$$m_{(Si,Mn)total-entra} = m_{(Si,Mn)vertHAE} + m_{(Si,Mn)ferroaleaciones} \quad (2.15)$$

**Determinación de la cantidad de Mn y Si que sale en el acero final.**

$$m_{(Si,Mn)sale} = \frac{\%_{(Si,Mn)colada} \cdot QL}{100} \quad (2.16)$$

$m_{(Si,Mn)sale}$  : Cantidad de Mn y Si que sale en el acero final, kg.

$\%_{(Si,Mn)colada}$  : Contenido de Mn y Si en la colada.

Cuando se realiza el proceso de ajuste en el Horno Cuchara se toma una muestra para conocer si el contenido de cada elemento está en el rango pedido, y si no, se realizan nuevas adiciones y se toman muestras hasta que la valoración química sea la requerida.

### **Conclusiones parciales**

1. Quedó establecido el procedimiento relacionado con la tecnología de elaboración del acero de bajo contenido de carbono S355JO, analizando cada una de las etapas de elaboración.
2. De acuerdo a la composición del acero de bajo carbono S355JO establecida por el cliente con un contenido de carbono óptimo de 0,13 % se establece que la desoxidación primaria del acero se realiza con aluminio para poder controlar el bajo contenido de carbono de este.
3. El análisis químico de la composición del acero en los distintos momentos de la tecnología de elaboración se realizó mediante un equipamiento de alta tecnología instalado en el laboratorio de la empresa ACINOX-Tunas.
4. Se implementó una metodología de cálculo para determinar el ajuste del acero en el HC mediante las adiciones necesarias.

### 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos para evaluar la tecnología de elaboración del acero de bajo contenido de carbono S355JO, así como la metodología de cálculo empleada para su ajuste en el Horno Cuchara.

#### 3.1 Análisis del comportamiento eléctrico

Luego de un minucioso análisis del estudio del comportamiento de los valores de corriente y voltaje en los diferentes TAP del transformador por etapa, se llegó a la conclusión que el tiempo de boredown es de apenas un minuto, se pudo comprobar que este tiempo es suficiente para la penetración de los electrodos en la chatarra, y que no irradiara hacia la bóveda enfriada del horno. Es importante decir que en las cestas de carga en la parte superior se debe colocar una cantidad de aproximadamente 5 toneladas de chatarra de baja densidad que facilite la penetración rápida de los electrodos. Por otra parte es conocido, que durante este tiempo la el arco presenta un comportamiento inestable y por ello es preciso no dilatarlo sin que ello conlleve a una avería por descarga eléctrica en la bóveda del horno.

Durante la fusión de las cestas, donde se trabaja con la máxima potencia, el nivel de corriente oscila entre 38 y 42 kA mientras que el voltaje oscila entre los 350 y 400 V; ambos parámetros se comportan de forma muy estable en las tres fases con un  $\cos \phi$  promedio de 0,78. Durante la fusión (luego del boredown), el arco se estabiliza algo más, alcanzando su máxima estabilidad durante la realización de la escoria espumosa tal y como se observa en la figura 6



Figura 6 Comportamiento del Arco

Al principio cuando el arco está pasando entre el electrodo de grafito comparativamente templado y los pedazos fríos de chatarra, la inestabilidad del voltaje del arco está en el máximo. Durante el curso de la fusión la forma de la

onda del voltaje del arco es líquida. En el extremo cuando los arcos están sumergidos en escoria espumosa, las formas de onda del voltaje son casi sinusoidales.

### 3.2 Resultado de la intensificación con oxígeno

En las operaciones de inyección de oxígeno, parte del hierro que se oxida pasa a la escoria.

Con el oxígeno de la escoria, reduciéndose el hierro de la escoria reaccionan(SMIRNOV, 1984):



Por cada  $\text{Nm}^3$  de oxígeno inyectado,  $0,75 \text{ Nm}^3$  reaccionarán con el carbono para producir  $1,5 \text{ Nm}^3$  de CO (basado en el valor promedio de sustitución de la energía de  $3,5 \text{ Kwh} / \text{Nm}^3$  de  $\text{O}_2$ ). Si además el efecto de la agitación producto de la inyección pone en contacto el carbono del baño o el carbono inyectado con el óxido de hierro en la escoria, puede resultar una cantidad aún mayor de monóxido. Que esto ocurra está apoyado por datos que indican una eficiencia en la descarburación mayor del 100 %. Así durante el período de descarburación resulta hasta  $2,5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ , y por lo general están limitados por la capacidad del sistema del cuarto orificio para evacuar los gases del HAE.

Realizando una comparación, acorde al flujo actual de oxígeno nuestro (limitado por disponibilidad de nuestra planta de fraccionamiento de aire), podemos observar menor índice de energía eléctrica por tonelada de acero líquido para una menor inyección de oxígeno tal y como se muestra en la figura 7.



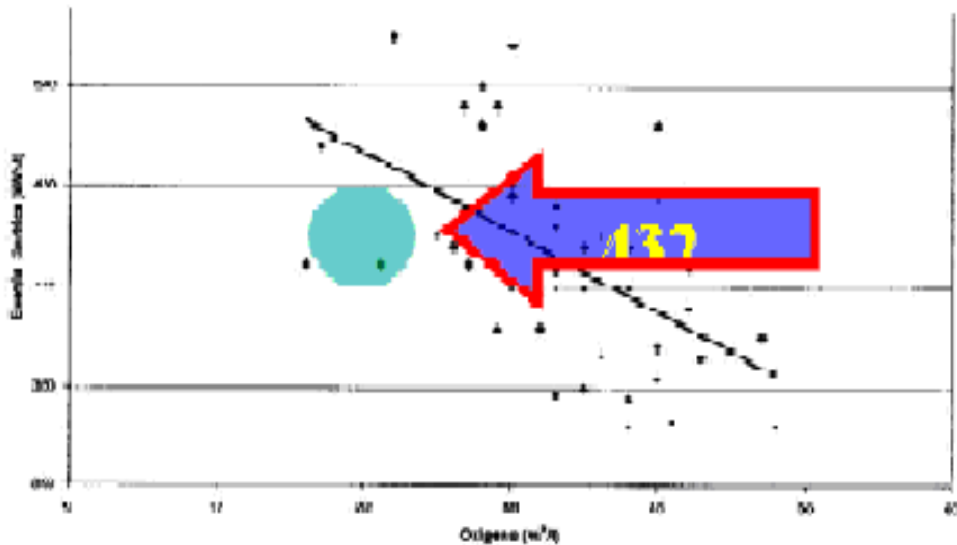


Figura 7 Consumo de energía eléctrica vs consumo de oxígeno

El uso de la inyección de oxígeno durante toda la colada se logra debido al Pie Líquido en el HAE. El oxígeno se inyecta a un caudal inferior durante toda la colada para espumar la escoria. Esto brinda una mejor protección del arco conduciendo a una mejor eficiencia eléctrica. También de caudales picos de monóxido de carbono inferiores hacia el sistema de gas de salida, por cuanto reduce el requerimiento de extracción del sistema del gas de salida.

### 3.3 Resultados de la práctica de Escoria Espumosa

Se produce al reaccionar el carbono con el oxígeno, formando monóxido de carbono principalmente (ecuación XIV), dicho gas al salir hacia la superficie provoca un burbujeo en la escoria haciéndola crecer en altura, disminuyéndola en densidad; esta escoria fue muy favorable para el aprovechamiento de la energía, además de proteger los refractarios del horno y paneles, reducir el ruido y mejorar la eficiencia de las reacciones de oxidación y reducción. Formar la escoria espumosa no es tan complicado como mantenerla, debido a que con el avance de la colada, la escoria se va calentando perdiendo viscosidad y las burbujas emergentes se hacen menos intensas, perdiendo la efervescencia y disminuyendo su altura. Las reacciones de formación de la escoria espumosa son las siguientes:



En la figura 8 se muestra la influencia del óxido de hierro en la escoria.

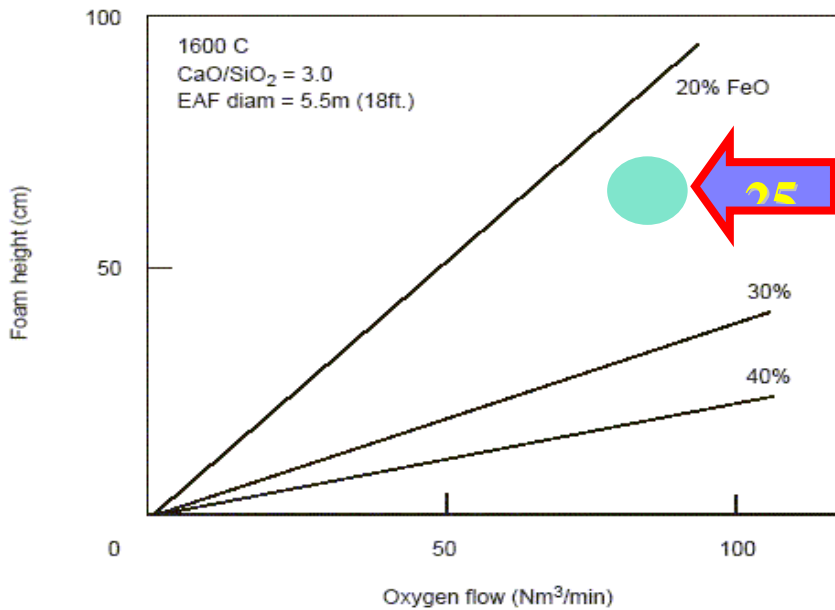


Figura 8 Relación entre el flujo de Oxígeno y la altura de la Espuma en función del contenido de óxido de hierro en la escoria.

Se observa que el porcentaje de óxido de hierro en la escoria oscila alrededor del 25 %.

Se podría pensar que si se sigue aumentando el contenido de óxido de hierro en la escoria, se lograrán mejores resultados en la realización de la escoria espumosa y esto es totalmente incierto. El óxido de hierro tiene un efecto dual en el comportamiento de la escoria que explicaremos continuación.

Como se puede observar en la ecuación 2.1 y 2.2 del capítulo anterior, un aumento del (FeO) hace que disminuya la tensión superficial, pero por otra parte provoca una fuerte disminución de la viscosidad superficial. Es por ello su efecto dual.

Otros de los parámetros de gran importancia es la basicidad de la escoria. Esta influye en la altura de la espuma de escoria en un rango bien definido tal y como se muestra en la figura 9.

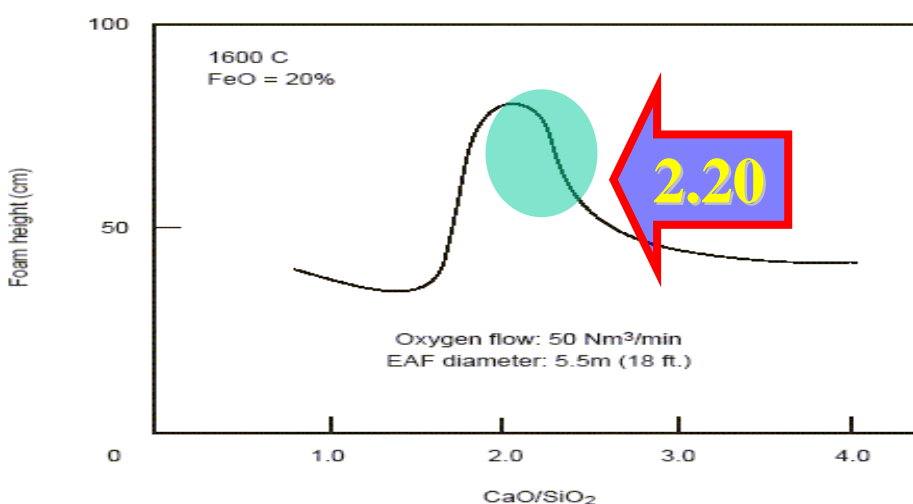


Figura 9 Relación entre la basicidad de la escoria y la altura de la Espuma

El otro parámetro importante es la correlación que debe existir entre el flujo de oxígeno y el carbón inyectado durante la realización de la escoria espumosa tal y como se muestra en la figura 10.

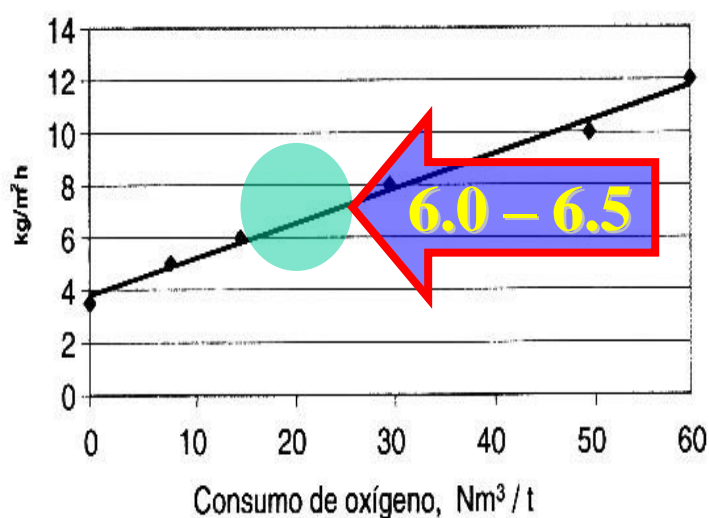


Figura 10 Razón de consumo de grafito en función del consumo de oxígeno

En el Anexo 2 aparece un esquema que representa las ventajas del uso efectivo de la práctica de Escoria Espumosa en el Horno de Arco Eléctrico durante el calentamiento del metal.

### 3.4 Determinación del carbono y silicio total de carga

Es importante conocer que para la realización de una buena escoria espumosa durante la etapa de calentamiento en el Horno de Arco Eléctrico, el contenido de carbono óptimo en el acero líquido está entre 0,08 % y 0,15 % pues con ello se logra un contenido de FeO en la escoria de alrededor del 25 % lográndose una buena estabilidad de la espuma y además se garantiza una exitosa desfosforación, si el contenido de carbono hubiese sido inferior al 0,08 % se generan muchas burbujas de monóxido de carbono pero muy inestables (se rompen y no crecen) y además ocurre una pérdida de hierro en la escoria disminuyendo el rendimiento metálico, si el contenido de carbono fuese superior al 0,15 %, trae como consecuencia insuficientes burbujas de monóxido de carbono para espumar la escoria. Otro factor importante a tener en cuenta para

el cálculo del oxígeno a inyectar para la intensificación durante la fusión de la carga metálica es que durante la misma (fusión) alrededor del 30 % del carbono total de carga al HAE se combustiona con el aire de infiltración ocasionado por el sistema de extracción primario de los gases del HAE; el dato anterior se determina por datos estadísticos.

De acuerdo a las ecuaciones (2.3 a la 2.6) del capítulo 2 se determina el carbono y silicio total de carga, el oxígeno inyectado y la cal. En la tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3 Relación por colada del carbono y silicio total de carga, el oxígeno inyectado y la cal.

Coladas	C <sub>totcarg</sub> (kg)	O <sub>iny</sub> (Nm <sup>3</sup> )	Si <sub>totcarg</sub> (kg)	Cal (kg)
1	175,625	263,786	112,4	648,575
2	385,925	701,328	112,56	649,498
3	386,175	713,75	112,72	650,421
4	385,05	711,712	112	646,267
5	385,3	725,773	112,16	647,19
6	386,05	706,515	112,64	649,96
7	443,05	821,126	149,12	860,458
8	427,185	806,879	112,08	646,728
9	177,375	229,296	113,52	655,038
10	451,185	885,523	127,44	735,359
11	427,435	815,001	112,24	647,652
12	427,685	792,812	112,4	648,575
13	176,625	255,107	113,04	652,268
14	176,5	252,582	112,96	651,806
15	202,25	309,843	129,44	746,9
16	175,625	256,822	112,4	648,575
17	175	238,054	112	646,267
18	175,875	263,101	112,56	649,498
19	175,125	281,744	112,08	646,728
20	176,625	236,88	113,04	652,268

Según la tabla anterior, tomando como ejemplo la primera colada, el carbono total aportado por la carga es de 175,625 kg por lo que es necesario introducir 263,786 Nm<sup>3</sup> de oxígeno durante el proceso de intensificación que produce una energía química de 64,182 kWh. Utilizando esta primera colada se tiene que

para el silicio total aportado por la carga de 112,400 kg se deben añadir en el proceso de fusión 648,575 kg de cal para neutralizar la acidez de la escoria formada entre el silicio y el oxígeno ( $\text{SiO}_2$ ).

### **3.5 Resultado de la desoxidación primaria del acero**

Normalmente en el mundo se utiliza o la desoxidación con aluminio, con silicio o combinada; estos elementos son muy caros y “ensucian” el acero, por otra parte la máquina de Vaciado Continuo (de 90 min. de vaciado por solo dos líneas de 140 x 140), no admite más de 70 ppm de Al en el acero; también es utilizada la desoxidación con carbono.

Teniendo en cuenta que el acero que se quiere obtener debe ser de bajo contenido de carbono, aunque el carbono es un buen desoxidante y más barato, utilizarlo aumentaría el contenido de carbono en lugar de disminuirlo; utilizar silicio formaría la escoria ácida ( $\text{SiO}_2$ ) que actuaría contra el refractario básico de la cazuela y luego habría que utilizar cal para neutralizar esa acidez y se elevarían los gastos económicos; entonces se desoxidará con aluminio que es un buen desoxidante, aunque es necesario un posterior desescoriado ya que producto de la desoxidación con aluminio se tienen inclusiones de alúmina en el acero líquido. Estas inclusiones pueden precipitarse en las buzas del distribuidor y cuchara, pudiendo ocasionar un clogging o cierre de buzas. El aluminio es muy ávido por el oxígeno, tanto para desoxidar el acero como para reoxidarse con el oxígeno del aire cuando el acero líquido entra en contacto con el medio. Esto debido a que la reacción de este elemento con el oxígeno tiene una energía libre bastante baja, incluso menor que la del silicio. Ver figura 11.

En la figura 11, se observa que la reacción del aluminio con el oxígeno tiene una energía libre inferior que la reacción oxígeno-silicio.

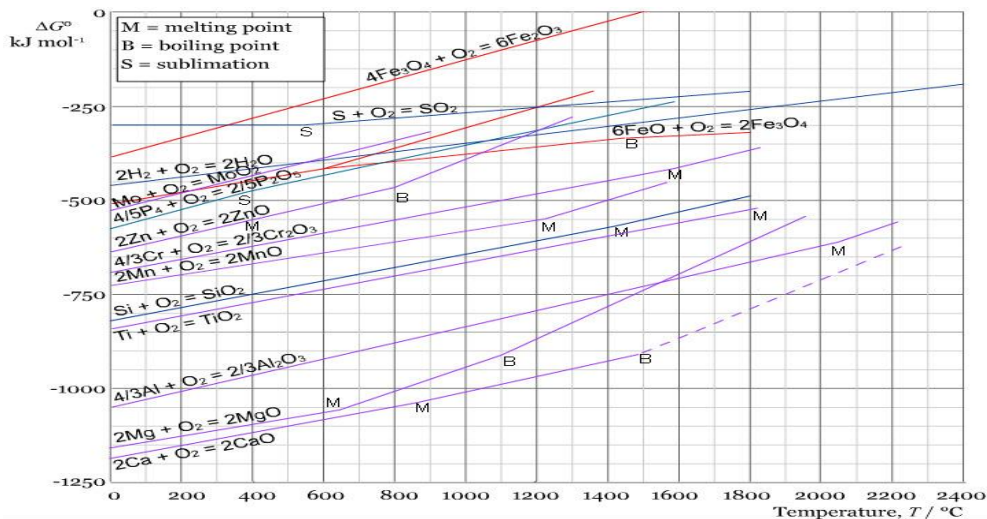


Figura11 Diagramas de Energía libre  $\Delta G$  vs Temperatura

En el proceso de desoxidación del acero durante el vertido en la empresa de ACINOX-Tunas el aluminio utilizado como desoxidante está enmarcado en un rango de 80-100 kg, en la investigación que se desarrolla se debe obtener un acero de bajo carbono con la mejor calidad, teniendo en cuenta los ppm de oxígeno presentes en el acero, se decide introducir en el proceso 100 kg de aluminio por colada tratando de minimizar la formación de inclusiones no metálicas que posteriormente afecten la máquina de Vaciado Continuo. La temperatura de vertido se encuentra de 1610 a 1620 °C y el contenido de carbono para el vertido  $\leq 0,08$  %.

En la tabla se muestran los contenidos de oxígeno presentes en las veinte coladas de muestra, estos resultados se determinaron con el analizador de gases LECO TC 136.

Tabla 4 Contenido de oxígeno presente en el acero del vertido

Coladas	ppm O <sub>2</sub>	k g O <sub>2</sub>
1	911,758	526,996
2	756,165	511,167
3	756,165	467,310
4	1102,189	678,948
5	624,613	343,537
6	911,758	594,466
7	756,165	527,803
8	1102,189	660,211
9	756,165	578,466
10	911,758	428,526
11	756,165	424,965

12	510,657	343,672
13	1102,189	695,481
14	911,758	585,349
15	510,657	324,778
16	911,758	557,996
17	1102,189	768,225
18	911,758	532,467
19	911,758	442,203
20	756,165	544,439

Los valores de oxígeno disuelto en el acero no superan los 1102 ppm y con la utilización de los 100 kg de aluminio se logra eliminar del acero 84,544 kg de oxígeno por colada.

La relación existente entre el contenido de oxígeno y carbono presente en el acero se representa en la figura 12.

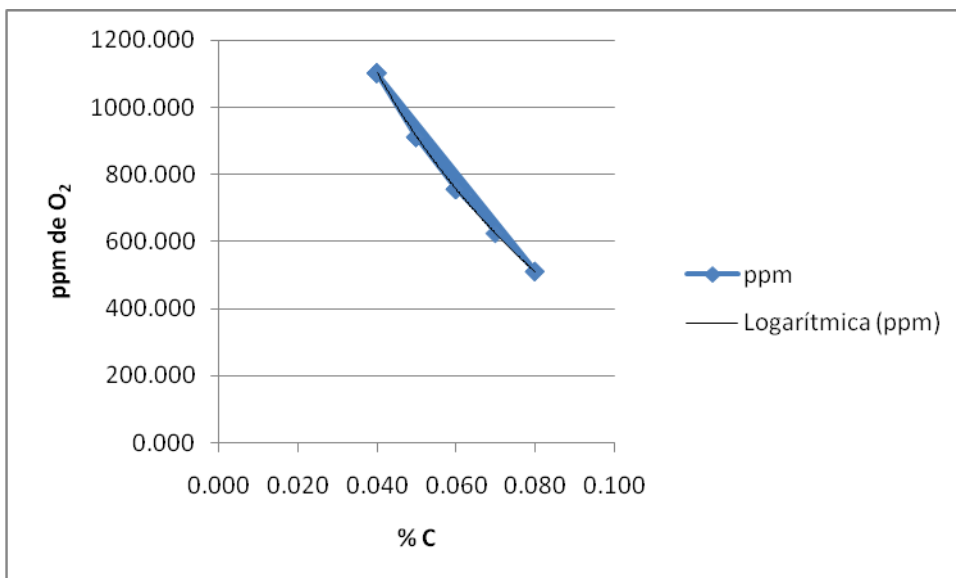


Figura12 Influencia del Carbono en el contenido de oxígeno presente en el acero del vertido

Se muestra un rasgo importante de la relación C– O, cuando se oxida el carbono por debajo de 0,04 % el total de oxígeno aumenta de forma acelerada a valores superiores de 1000 ppm.

### 3.6 Análisis químico del acero

Con la utilización del cuantómetro OBLF QSG 750-II instalado en el laboratorio de la empresa ACINOX-Tunas, certificado por la NC ISO 17025, se valora la composición química de las muestras de acero.

Luego del proceso de fusión en el HAE, el contenido de los principales elementos del acero se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Composición química del S355JO vertido del HAE

<b>Coladas</b>	<b>%C<sub>Vert</sub></b>	<b>%Mn<sub>Vert</sub></b>	<b>%Si<sub>Vert</sub></b>	<b>%P<sub>Vert</sub></b>	<b>%S<sub>Vert</sub></b>
1	0,05	0,05	0,007	0,005	0,033
2	0,06	0,08	0,006	0,004	0,036
3	0,06	0,05	0,008	0,007	0,042
4	0,04	0,05	0,009	0,003	0,049
5	0,07	0,05	0,009	0,005	0,033
6	0,05	0,04	0,009	0,007	0,034
<b>Coladas</b>	<b>%C<sub>Vert</sub></b>	<b>%Mn<sub>Vert</sub></b>	<b>%Si<sub>Vert</sub></b>	<b>%P<sub>Vert</sub></b>	<b>%S<sub>Vert</sub></b>
7	0,06	0,04	0,009	0,009	0,039
8	0,04	0,05	0,008	0,004	0,035
9	0,06	0,07	0,006	0,007	0,034
10	0,05	0,05	0,011	0,005	0,02
11	0,06	0,06	0,07	0,005	0,023
12	0,08	0,06	0,01	0,007	0,033
13	0,04	0,08	0,006	0,004	0,029
14	0,05	0,04	0,007	0,007	0,028
15	0,08	0,06	0,006	0,005	0,027
16	0,05	0,09	0,006	0,003	0,033
17	0,04	0,06	0,006	0,002	0,024
18	0,05	0,04	0,006	0,004	0,024
19	0,05	0,04	0,011	0,004	0,027
20	0,06	0,05	0,01	0,004	0,025

Luego del vertido del S355JO este se desoxida con aluminio y el contenido de los principales elementos se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 Composición química del S355JO luego de la desoxidación con aluminio

<b>Coladas</b>	<b>%C<sub>Fvert</sub></b>	<b>%Mn<sub>Fvert</sub></b>	<b>%P<sub>Fvert</sub></b>	<b>%S<sub>Fvert</sub></b>	<b>%Si<sub>Fvert</sub></b>
1	0,038	0,057	0,005	0,035	0,011
2	0,041	0,073	0,004	0,031	0,008
3	0,098	1,220	0,012	0,012	0,183
4	0,029	0,094	0,002	0,042	0,010
5	0,039	0,092	0,006	0,040	0,006
6	0,040	0,030	0,005	0,040	0,004
7	0,022	0,055	0,009	0,032	0,009
8	0,049	0,154	0,009	0,035	0,008
9	0,025	0,081	0,009	0,029	0,006
10	0,031	0,038	0,004	0,021	0,006



11	0,034	0,037	0,004	0,023	0,009
12	0,027	0,036	0,004	0,029	0,004
13	0,027	0,076	0,005	0,028	0,008
14	0,046	0,091	0,080	0,027	0,195
15	0,030	0,091	0,004	0,023	0,183
16	0,035	0,089	0,003	0,025	0,195
17	0,035	0,072	0,003	0,021	0,184
18	0,032	0,044	0,006	0,019	0,182
19	0,049	0,048	0,004	0,027	0,178
20	0,031	0,045	0,004	0,024	0,220

### 3.7 Resultados del ajuste en el Horno Cuchara

Con las ecuaciones (2.7 a la 2.16) presentadas en el apéndice 2.9 del capítulo 2 se determinó la cantidad de FeSi-75 y FeSiMn que se debía añadir al HC para ajustar el acero y se obtuvo el rendimiento del Mn y Si. Estos cálculos se le realizaron a las veinte coladas de muestra y los resultados se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7 Relación del FeSi-75, FeSiMn, rendimiento del manganeso y silicio por colada

Coladas	FeSi-75	FeSiMn	Rsi	RMn
1	20	1500	39,880	67,087
2	104	1255	54,451	91,705
3	30	1108	59,786	99,838
4	0	1124	67,233	96,995
5	72	1028	46,752	91,912
6	70	1174	53,278	98,414
7	224	2340	25,182	53,869
8	100	1204	45,213	87,438
9	136	1558	40,690	82,997
10	50	955	46,735	86,763
11	105	1094	35,694	85,920
12	92	1290	50,857	92,211
13	50	1252	56,581	89,757
14	40	1268	29,772	89,832
15	48	1206	54,405	92,136
16	0	1224	59,713	84,849
17	20	1180	57,643	98,756
18	40	1090	51,891	93,187
19	70	930	40,526	94,388
20	60	1402	59,068	90,659

La adición de FeSi-75 y FeSiMn en el proceso se realiza para ajustar principalmente el manganeso y el silicio al de la marca deseada, luego el alto rendimiento del manganeso indica la efectividad con que se realizó el proceso de elaboración del acero.

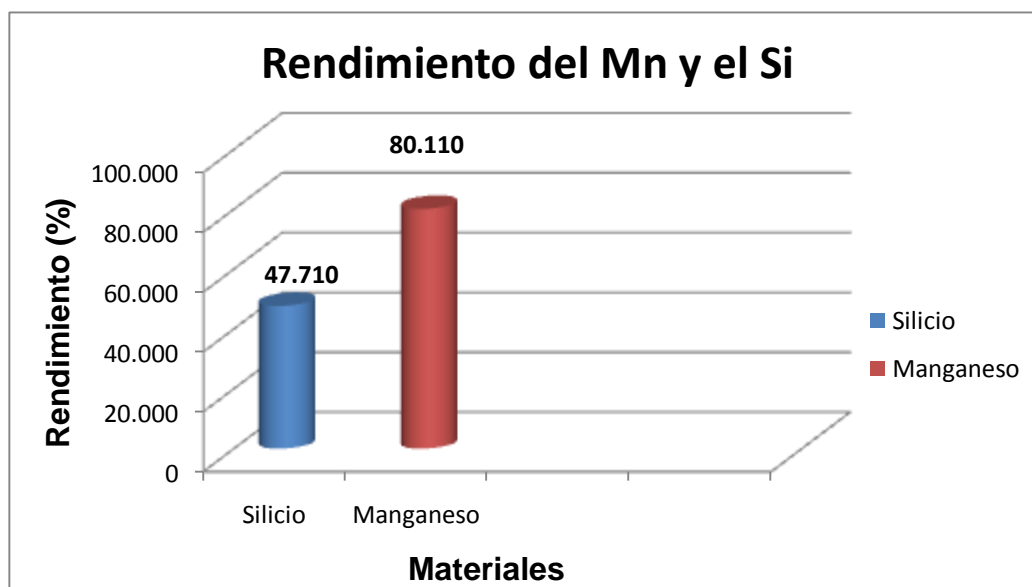


Figura13 Rendimiento del Si y el Mn en el proceso

Luego de los resultados expuestos anteriormente se presenta la composición de la colada en la tabla 8.

Tabla 8 Composición química de la colada

Coladas	%C <sub>F</sub>	%Mn <sub>F</sub>	%P <sub>F</sub>	%S <sub>F</sub>	%Si <sub>F</sub>	%Cr <sub>F</sub>	%Ni <sub>F</sub>	%Cu <sub>F</sub>	%Al <sub>F</sub>	%Sn <sub>F</sub>	%N <sub>F</sub>
1	0,091	1,165	0,008	0,011	0,178	0,061	0,110	0,265	0,004	0,015	0,009
2	0,092	1,180	0,010	0,013	0,222	0,090	0,120	0,243	0,005	0,019	0,007
3	0,100	1,213	0,012	0,014	0,197	0,075	0,126	0,229	0,004	0,016	0,009
4	0,093	1,199	0,013	0,017	0,201	0,096	0,129	0,259	0,003	0,018	0,008
5	0,099	1,163	0,011	0,015	0,186	0,074	0,120	0,226	0,004	0,017	0,009
6	0,103	1,191	0,010	0,024	0,197	0,057	0,134	0,234	0,003	0,014	0,010
7	0,084	1,195	0,012	0,014	0,195	0,081	0,148	0,261	0,004	0,015	0,011
8	0,089	1,186	0,009	0,015	0,205	0,068	0,162	0,238	0,004	0,013	0,009
9	0,111	1,157	0,012	0,018	0,183	0,073	0,167	0,215	0,004	0,014	0,011
10	0,095	1,189	0,010	0,011	0,188	0,057	0,136	0,273	0,005	0,018	0,010
11	0,101	1,139	0,010	0,017	0,186	0,055	0,114	0,251	0,004	0,012	0,008
12	0,089	1,204	0,010	0,017	0,212	0,053	0,117	0,247	0,004	0,013	0,009
13	0,099	1,229	0,010	0,018	0,215	0,066	0,096	0,262	0,004	0,014	0,008
14	0,079	1,189	0,011	0,021	0,107	0,167	0,017	0,251	0,004	0,015	0,009
15	0,093	1,191	0,010	0,009	0,190	0,065	0,108	0,234	0,004	0,040	0,012
16	0,083	1,179	0,008	0,021	0,193	0,077	0,117	0,276	0,004	0,014	0,011
17	0,089	1,146	0,009	0,015	0,163	0,062	0,117	0,210	0,004	0,013	0,010
18	0,089	1,168	0,010	0,013	0,183	0,058	0,140	0,254	0,004	0,024	0,007

19	0,089	1,214	0,010	0,012	0,169	0,071	0,132	0,253	0,004	0,015	0,007
20	0,098	1,193	0,008	0,015	0,221	0,054	0,117	0,240	0,004	0,014	0,008

La composición química del S355JO requiere un contenido óptimo de carbono del 0,13 % y de manganeso de 1,30 %, teniendo en cuenta el ajuste en el HC el contenido de carbono no excede el 0,11 % lo que se logra polvoreando carbono en el acero luego del proceso de ajuste, y el contenido de manganeso no sobrepasa el 0,25 % debido a las adiciones en el proceso de HC.

### **Propuesta Tecnológica para la Elaboración del acero S355JO.**

#### **Horno de Arco Eléctrico:**

- Adicionar 900 kg de Cal.
- El contenido de Carbono para el vertido  $\leq 0,08$  %.
- La Temperatura de vertido de 1 610°C-1 625°C.
- Adicionar 100 kg de Aluminio durante el vertido luego de ~5 ton de acero en cazuela.

#### **Horno Cuchara:**

- Grúa lista para efectuar el desescoriado.
- Ejecutar el desescoriado hasta el 80 % del total de escoria.
- Ajustar el contenido de Manganeso hasta el 1,00 % con FeSiMn y ajustar el contenido de Silicio hasta 0,19 % y calentar hasta una Temperatura de 1 620°C-1630°C y efectuar la desulfuración hasta lograr un contenido de Azufre inferior a lo especificado por el cliente.
- El ajuste final del contenido de Manganeso se realizará con la combinación de FeSiMn y FeSi 75, siempre que el contenido de Silicio en el acero lo permita.

#### **Máquina de Vaciado Continuo:**

- Trabajar para ciclos de secuencia.
- Realizar la apertura de la cazuela de las primeras coladas de cada ciclo cuando se inicie el desescoriado de la siguiente colada en el Horno Cuchara.

### **Conclusiones parciales**

- 1 La tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO propuesta posibilita la obtención del mismo con la mejor calidad debido a la desoxidación con aluminio en sustitución de otro desoxidante.
- 2 Con la aplicación de las técnicas de muestreo fue posible evaluar la composición química del S355JO y en especial el contenido de carbono presente en este.

## VALORACIÓN ECONÓMICA

En la tecnología para la elaboración del acero de bajo contenido de carbono S355JO para el análisis económico solo se tuvo en cuenta el uso de los 100 kg del desoxidante de aluminio y su implicación en el posterior tratamiento del acero en el HC.

En la tabla se muestran los precios de los materiales utilizados en el proceso de desoxidación.

Tabla 9. Precio de los materiales

	Precio(CUC/t)	Precio(cuc/MWh)
Al-95	2598,75	
FeSi-75	2417,91	
CaO	60	
Energía		99,18

### Determinación de la ganancia:

$$G_{(COLADA)} = (m_{FeSi-75} \cdot P_{FeSi-75}) + (m_{CaO} \cdot P_{CaO}) + \left(\frac{C_{energ} \cdot P_{eng}}{1000}\right) - (m_{Al} \cdot P_{Al})$$

$G_{(COLADA)}$ : Ganancia obtenida por colada, cuc;

$m_{FeSi-75}$ : Cantidad de FeSi-75 necesario para desoxidar el acero, kg;

$P_{FeSi-75}$ : Precio del FeSi-75, cuc;

$m_{CaO}$ : Cantidad de CaO necesaria, kg

$P_{CaO}$ : Precio del CaO, cuc

$C_{energ}$ : Consumo de energía, MWh;

$P_{eng}$ : Precio de la energía

$m_{Al}$ : Cantidad de Al que actúa como desoxidante, kg

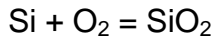
$P_{Al}$ : Precio del Al.

**Determinación del FeSi-75 que hubiese sido necesario utilizar para la desoxidación del acero.**

$$m_{(FeSi-75)} = \frac{m_{Si(desox)}}{0,75}$$

$m_{Si(desox)}$ : Cantidad de Si desoxidante, kg.

Determinación del Si que actuaría como desoxidante.



Por relaciones estequiométricas:

$$m_{(Si)desox} = \frac{n_{(Si)} \cdot M_{(Si)} \cdot m_{O_2(e\lim.xAl)}}{n_{(O_2)} \cdot M_{(O_2)}}$$

$m_{(Si)desox}$ : Cantidad de Si que actuaría como desoxidante, kg

$n_{(Si)}$ : Cantidad de Si en el  $SiO_2$ , mol

$M_{(Si)}$ : Masa atómica del Si (28 kg/mol)

$m_{O_2(e\lim.xAl)}$ : Cantidad de  $O_2$  que se elimina con el aluminio, (84,444 kg)

$n_{(O_2)}$ : Cantidad de  $O_2$  en el  $SiO_2$ , mol

$M_{(O_2)}$ : Masa molar del Si (16 kg/mol)

Luego la cantidad de Si que actuaría como desoxidante sería 73,889 kg por colada.

Entonces la cantidad de  $SiO_2$  formada sería:

$$m_{(Si)desox} + m_{O_2(e\lim.xAl)} = 158,333 \text{ kg}$$

Luego la cantidad de FeSi-75 necesaria para desoxidar el acero sería 98,519 kg por colada.

**Determinación del CaO que hubiese sido necesario utilizar para contrarrestar el efecto de la formación del  $SiO_2$ .**

$$IB = \frac{m_{CaO}}{m_{SiO_2}} \cdot 0,85$$

IB: Índice de basicidad (2,2)

$m_{CaO}$ : Cantidad de CaO utilizada para contrarrestar la formación del  $SiO_2$

$m_{SiO_2}$ : Cantidad de  $SiO_2$  que se formó, 158,333 kg

85%: Contenido del CaO en la cal.

Luego la cantidad de cal necesaria es 409,804 kg por colada.

**Determinación de la pérdida de temperatura y energía por la utilización del CaO.**

- El HC dando arco eléctrico consume 120 kWh/min.
- El HC dando arco eléctrico sube la temperatura 3 °C/min.

- Por cada % en la carga de cal (CaO) que se adiciona disminuye la temperatura del acero 35 °C.(Vaciado continuo del acero ACINOX-Tunas)

Como 600 kg de cal disminuyen 35 °C:

Entonces 409,584 kg de cal disminuyen 23,905 °C.

Luego la pérdida de energía sería 956,209 kWh por colada.

Por lo tanto:

La ganancia con la implementación del desoxidante Al en sustitución del Si es de 3016,983 cuc por colada.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Se obtuvo la tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO en la planta de Acería de ACINOX-Tunas con la utilización del aluminio como desoxidante primario del acero en sustitución del carbono y silicio, analizando el régimen eléctrico del HAE donde el nivel de corriente oscila entre 38 y 42 kA mientras que el voltaje oscila entre los 350 y 400 V, aplicando la práctica del Pie Líquido, manteniendo una buena intensificación con oxígeno que produce una energía de 64,182 kWh, y haciendo un uso efectivo de la práctica de Escoria Espumosa, el contenido de FeO en la escoria es de un 25 %.
2. Se evaluó la desoxidación primaria del acero realizada a los 1610 -1620 °C con aluminio en sustitución del carbono o silicio como desoxidantes, donde se adicionan 100 kg de aluminio que eliminan 84,544 kg de O<sub>2</sub> del acero y permite mantener los perfiles bajos de contenido de carbono en el S355JO.
3. En el proceso de ajuste en el HC se adicionó FeSi-75 y FeSiMn y el rendimiento del manganeso fue de un 80 % aproximadamente y el del silicio de un 47 %, también se polvoreó carbono para ajustar el contenido de carbono al de la marca deseada.
4. La utilización del aluminio para la desoxidación del S355JO en sustitución del silicio dio una ganancia de 3017 cuc por colada.



## RECOMENDACIONES

1. Se propone hacer uso de la tecnología de elaboración del acero de bajo carbono S355JO propuesta, utilizando el aluminio como desoxidante primario del acero en sustitución del carbono o silicio.
2. Para la producción de estos tipos de acero se requiere la menor cantidad de escoria contenida en el horno a la cazuela durante el vertido del mismo y para ello es preciso modificar el vertido del acero líquido del horno a la cazuela por un sistema de vertido por el fondo (del tipo EBT). También se requiere de una máquina para la inyección de alambre que facilitaría realizar ajustes del acero dentro de pequeños rangos, modificar inclusiones no metálicas que se encuentren en el acero líquido y mejor calidad externa e interna del acero durante su vaciado. Esta máquina debe cumplir con las siguientes especificaciones técnicas:
  - Tres (3) líneas de alimentación (inyección).
  - Velocidad de alimentación de 0-300 m/min.
  - Para diámetros de alambres de 9, 13, 16 y 21 mm.

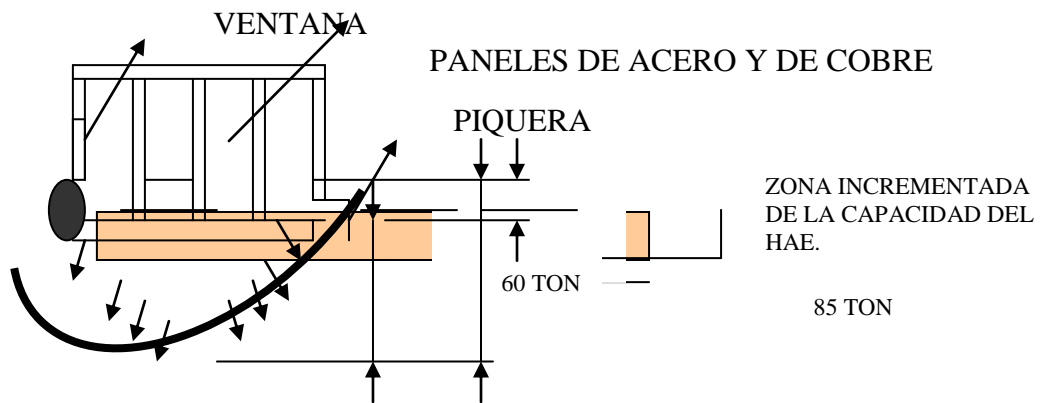
## BIBLIOGRAFÍA

1. A. Palmaers, J. D., L. Philipe. (1979). Desoxidation of continuously cast low carbon steel for billets.
2. Barcenas, A. C. (2010). Fabricacion de acero. Universidad de Santiago de Chile.
3. Botella, R. S. y. (1998). Efecto del contenido de azufre y del grado de desoxidacion sobre la ductilidad en cal
4. Berciano, J. L. E. (2000). Monografias sobre Tecnologia del acero, Parte I.
5. Berciano, J. L. E. (2007). Fabricacion de acero. Metalurgia Secundaria. Universidad Politecnica de Madrid.
6. iente de aceros inoxidables austeniticos resulfurados en estado de solidificacion. Revista de Metalurgia.
7. Contreras, I. G. (2012). Mejoras en el proceso de desoxidacion de aceros en hornos de induccion.
8. D. L. Schroeder. (1991). Use of Energies in Electric Steelmaking Shops, Electric Furnace Conference Proceedings 49 (Warrendale: Iron and Steel Society, .
9. E. Inagaki, I. K., and M. Ichikawa. (1988). "Integrated Oxygen Enrichment Control to Attain Maximum Overall Economy in Steelmaking Arc Furnaces," (Malaga, Spain: 11th International Electric Melting Conference).
10. García, C., Lisca, L. H. S., Martínez, A. A., Aguila, Y. B., Escobar, I. M. L., & Rosa, S. d. I. ((2005)). Tecnología para la elaboración de crisoles de hierro gris resistentes a las altas temperaturas para la fusión de aleaciones de aluminio. from <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/tecnologia-elaboracion-crisoles-hierro/tecnologia-elaboracion-crisoles-hierro.shtml>
11. J.M, F., J.; IASHERAS. (1991). Ciencia de los materiales: Editorial Donostiarra, S.A.
12. K. Bergman and R. Gottardi. (1990). "Design Criteria for the Modern UHP Electric Arc Furnace With Auxiliaries," Ironmaking and Steelmaking

13. Kundrin. (1981). Metalurgia del hierro y los aceros.
14. Medina, E. N., J. Arzola Ruiz, y A. Batista Cabrera. (2007). Produccion de aceros al carbono en Hornos de Arco Electrico en condiciones de mineral de manganeso. Ingenieria Mecanica.
15. Morera, V. (2004). Ponencia metalurgica, Argentina.
16. Morera, V. (2011). Capacitacion en Horno de Arco Electrico, ACINOX-Tunas.
17. ONDE, M. (2005). Efecto de la desoxidacion sobre la obturacion de buzas de cuchara.
18. P., S. M. (2008). Control para la formacin de escoria espumosa en Hornos de Arco Electrico. Universidad Simon Bolivar, Venezuela.
19. Ramirez, J. M. (2003). El acero. Universidad de Pamplona, Colombia.
20. Rangel, E. (2009). Aceracion.
21. Robles, E. C., Jose Luis Enrique Berciano, y Enrique Tremps Guerra. (2014). Fabricacion de acero inoxidable.
22. SMIRNOV, N. y F., A. (1984). Produccion de acero. Pueblo y Educacin, La Habana.
23. Teoh, L. L. (1989). "Electric Arc Furnace Technology: Recent Developments and Future Trends," Ironmaking and Steelmaking
24. Urquiza, J. A. (1999). Hornos de arco para fusion de acero. MacGraw Hill.
25. Vera, C. (2009). La didactica sobre la obtencion de la fundicion y el acero.

## ANEXOS

### Anexo1: Modificación a la Cuba del Horno de Arco Eléctrico:



#### Paneles de Acero:



#### Juego de Paneles: Acero - Cobre:



### Anexo2: Tecnología de escoria espumosa.

## TECNOLOGÍA DE ESCORIA ESPUMOSA

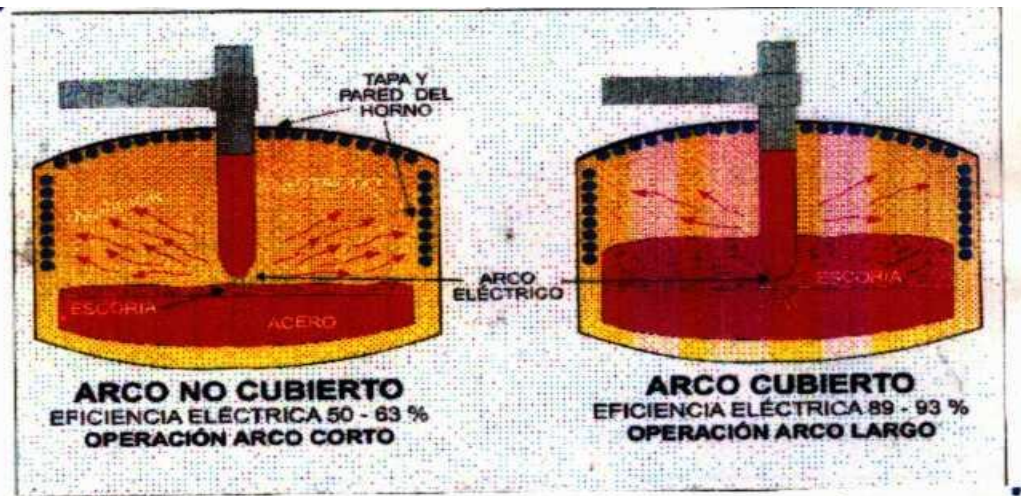
Baño plano  
T=1530-1550°C

$\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 = \text{FeO}$   
20-60%

$\text{C} + 1/2\text{O} = \text{CO}$

Espumación  
300-400 mm

1.4 kwh/Nm3  
de O2



### Anexo3

**Tabla1: Datos necesarios en el proceso.**

<b>Chat<sub>EXT</sub></b>	<b>Fe<sub>Fund</sub></b>	<b>Chat<sub>Int.</sub></b>	<b>Total</b>	<b>C<sub>Carga-HAE</sub></b>	<b>Al<sub>Vert</sub></b>	<b>Ac<sub>HC</sub></b>
70,25	0,00	0,00	70,40	0	100	57,8
70,35	0,00	0,00	70,56	250	100	67,6
70,45	0,00	0,00	70,61	250	100	61,8
70,00	0,00	0,00	70,17	250	100	61,6
70,10	0,00	0,00	70,26	250	100	55
70,40	0,00	0,00	70,53	250	100	65,2
93,20	0,00	0,00	93,34	250	100	69,8
65,55	0,00	4,50	70,19	300	100	59,9
68,60	0,00	2,35	71,13	0	100	76,5
79,65	0,00	0,00	79,82	300	100	47
70,15	0,00	0,00	70,35	300	100	56,2
70,25	0,00	0,00	70,41	300	100	67,3
70,65	0,00	0,00	70,82	0	100	63,1
70,60	0,00	0,00	70,72	0	100	64,2
80,90	0,00	0,00	81,05	0	100	63,6
70,25	0,00	0,00	70,46	0	100	61,2
70,00	0,00	0,00	70,20	0	100	69,7
70,35	0,00	0,00	70,47	0	100	58,4
70,05	0,00	0,00	70,18	0	100	48,5
70,65	0,00	0,00	70,79	0	100	72

Chemical Composition																
Grade	Thickness (mm)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	Ti	Nb	N	
S355JR	<40	.24 max	1.60 max	.035 max	.035 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355JR	41 - ≤150	.24 max	1.60 max	.035 max	.035 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355JR	151 - ≤250	.24 max	1.60 max	.035 max	.035 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355JO	<40	.20 max	1.60 max	.030 max	.030 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355JO	41 - ≤150	.22 max	1.60 max	.030 max	.030 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355JO	151 - ≤250	.22 max	1.60 max	.030 max	.030 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	.012 max	
S355J2	<40	.20 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	
S355J2	41 - ≤150	.22 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	
S355J2	151 - ≤250	.22 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	
S355J2	>250 - ≤400	.22 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	
S355K2	<40	.20 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	
S355K2	41 - ≤150	.22 max	1.60 max	.025 max	.025 max	.55 max	-	-	-	-	-	.55 max	-	-	-	