



ISMMM

Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez

Metalurgia y Materiales

Facultad De Metalurgia
y Electromecánica Instituto Superior

Minero Metalúrgico de Moa

*Desoxidación y Preajuste del acero
SAE 1030 con carbón antracita durante el
vertido del HAE
en la Empresa Acinox – Las Tunas*

Autora: Anabell Rodríguez González

Moa, 2017



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

Dr. “ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA- QUÍMICA

Trabajo de Diploma

Desoxidación y Preajuste del acero SAE 1030 con carbón antracita durante el vertido del HAE en la Empresa Acinox –Las Tunas

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERA EN METALURGIA Y MATERIALES

AUTOR: Anabell Rodríguez González **Firma:** _____

TUTORA: Ms.C. Yunaydi Paumier Castañeda **Firma:** _____

TUTOR: Ing. Alexander Rodríguez Guerrero **Firma:** _____

Moa, 2017

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Anabell Rodríguez González** autora de este trabajo de Diploma y la tutora Ms.C Yunaydi Paumier Castañeda declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: *Anabell Rodríguez González*

Tutora: _____

Ms.C. Yunaydi Paumier Castañeda

Tutor: _____

Ing. Alexander Rodríguez Guerrero

PENSAMIENTO

“Es de importancia para quien desee alcanzar una certeza en su investigación, el saber dudar a tiempo”

Aristóteles

Dedicatoria

Dedico mi tesis a mis padres que me apoyaron tanto y a mi familia. A los profesores que de una manera u otra me ayudaron a formarme como ingeniera.

Agradecimientos

En estos cinco años de educación superior aprendí muchas cosas como estudiante y como mujer, pero todo se lo debo a mi familia que me apoyó en los momentos que más los necesité, a mis padres Ana María y Osvaldo, a mi hermano Osvaldito y mi cuñada Yeilen, a mis abuelas Josefina y Elvia, a mis tíos Froilan y Adys, Roberto y Silvia, Susy y Manolo, Aldo y Rubi, a mis primos Mabel, Pavel, Karel, Yurko, Livan, Mayito, Luisito, Aldito y Chairó, a mis vecinos, a la familia Valdés Claro, a los doctores Zenia y Roberto y a la abuelita Sofia, a mis amigas Yumaiby, Yunaimy, Aylén, Wendy, Katia, Mairelis, Rachel. A mi hermana Rosalia y a su familia a la que quiero mucho, a mis compañeros de aula, a mi amigo Luis y Teresa, Irianna y a los que ya se graduaron que no pudieron estar conmigo Josué, Lisander y Soelia, a mis hermanitos Claudia y Eugenio. A mis amigos de Puerto Padre en especial a Viviana y Lili.

A Mis profesores de los cinco años que me enseñaron y me educaron, Mercedes que de vez en cuando me alaba las orejas, Carlitos Izaguirre, Antonio Chang y a todos los demás que siempre con sus métodos nos incitaron al estudio. Cómo no mencionar a mi tutora Yunaidy quien me ha ayudado y apoyado en el momento más decisivo de mi carrera.

Le agradezco al grupo tecnológico de acería de la empresa Acinox-Las Tunas, a mis tutores Vladimir y Alexander que me soportaron y me ayudaron en todo momento.

A todos los que me ayudaron y todavía me ayudan, les agradezco de todo corazón

GRACIAS POR TODO

Resumen

En el presente trabajo se estableció el uso del carbón antracita como desoxidante durante el proceso de desoxidación durante el vertido del acero SAE 1030 en la empresa Acinox-Tunas. La composición química de la escoria se obtuvo mediante el método de Fluorescencia de rayos X, se empleó el analizador de gases modelo, LECO TC-136 para obtener la cantidad de oxígeno existente así como el Cuantómetro OBLFQSG 750-II para determinar la composición química del acero. Para el nivel de oxidación típico del acero antes de ser vertido del horno de arco eléctrico a la cazuela se obtuvo valores de óxido de hierro en la escoria que fluctúan entre 20 – 40 % y 300 a 1000 ppm de oxígeno en el metal, estos valores reflejan un alto nivel de oxidación. Fueron obtenidos resultados referentes a la recuperación del manganeso de la escoria y el porcentaje del preajuste del carbón y el silicio en el acero líquido siendo de 52 %, 62 % y 23 % respectivamente.

Palabras claves: acero SAE1030, desoxidación, carbón antracita, horno cuchara

Summary

In the present work, the behavior of the anthracite coal during the SAE 1030 steel deoxidation process in Acinox-Tunas Company was evaluated. The slag chemical composition was obtained using the X-ray Fluorescence method. Also, the LECO TC-136 model gas analyzer was used to obtain the amount of oxygen present and the OBLFQSG 750-II Cuanthometer to determine the steel chemical composition. For the typical oxidation level of the steel prior to being poured from the EAO to the pan, iron oxide values in the slag ranging from 20-40 % and 300 to 1000 ppm of oxygen in the metal were obtained. These values reflect a high oxidation level. It was determined the performance for manganese, silicon and carbon when pouring in EAO. Manganese showed a 52 %; silicon 23 %, and carbon 63.

Key words: SAE1030 steel, deoxidation, anthracite coal, spoon oven (SO).

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	4
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	4
1.1 Antecedentes y actualidad del tema	5
1.2 Marco teórico o conceptual	8
1.3 Características químicas del carbón antracita	9
1.4 Generalidades del Carbón	10
1.5 Tecnologías limpias de carbón	10
1.6 Fundentes y Aditivos.....	11
1.7 Características de la Desoxidación	13
1.8 Desoxidación con carbono	15
1.8.1 Desoxidación del Acero con carbono durante el Vertido	15
1.9 Cinética del proceso de oxidación del carbono	16
1.10 Termodinámica de la reacción de oxidación del carbono	21
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I.....	24
CAPÍTULO II	25
MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Metodología de la investigación	25
2.1.1 Material empleado	27
2.1.2 Instrumentos utilizados	27
2.1.3 Métodos empleados en el proceso	28
2.2 Determinación del rendimiento del Mn, Si, C	31
2.3 Cálculo de la cantidad de oxígeno que se elimina y la que está presente en la escoria	39
CONCLUSINES PARCIALES DEL CAPÍTULO II.....	45
CAPÍTULO III	46
Análisis y Discusión de los resultados.....	46
3.1 Relación entre el contenido de oxígeno y carbono en el metal	46
3.2 Desoxidación del acero al carbono SAE1030 durante el vertido con carbono en sustitución de otro desoxidante.....	49

3.3 Determinación del rendimiento del Mn, Si y C	50
3.4 Valoración económica.....	55
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III.....	56
CONCLUSIONES GENERALES.....	57
Recomendaciones.....	58
Bibliografía	59
Anexos	61

INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica desempeña un importante papel en el desarrollo de cualquier país, debido a que el acero es el metal más utilizado en el mundo. La tecnología de fabricación del acero ha cambiado mucho en las últimas décadas bajo la presión de una mayor demanda, nuevas especificaciones, y la necesidad de reducir el consumo de energía y material.

Las principales empresas siderúrgicas en el mundo las lideran Arcelor Mittal (Luxemburgo), seguido por la compañía Posco (Corea del Sur) y la Nippon Steel & Sumitomo Metal (Japón); en América Latina sobresalen las empresas brasileñas Gerdau y CSN. (<http://infoacero.camacero.org>)

A partir del triunfo de la Revolución, como resultado de la visión del Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz en relación con el desarrollo industrial del país, se trazó la estrategia y se puso en marcha el programa integral de desarrollo de la industria mecánica, la cual había sido nacionalizada, y pasó a formar parte del Ministerio de Industrias. Fue Ernesto Che Guevara quien inició la materialización de este programa en 1963 (<https://www.ecured.cu>).

Comenzó entonces el reordenamiento de las instalaciones existentes, la creación de nuevas plantas como la Empresa Siderúrgica José Martí conocida como Antillana de acero en La Habana y la de ACINOX-Las Tunas fundada en el año 1992 con el objetivo de producir aceros inoxidables en forma de planchones con destino a la exportación. A partir del año 1995 la empresa ACINOX-Las Tunas se dio a la tarea de producir aceros al carbón, medio, alto, aceros aleados y especiales. La reacción más importante en el proceso de elaboración del acero (según Smirnov 1984), es la reacción de oxidación del carbono, el producto de esta reacción es el monóxido de carbono (CO). Al desprenderse una cantidad considerable de este gas, ocurre un fuerte mezclado entre el metal y la escoria, donde ocurren las llamadas reacciones metalúrgicas, además, homogeniza la composición química del acero, facilita la extracción de gases (H_2 y N_2) y el desprendimiento de las inclusiones no metálicas de la masa fundida.

El horno arco eléctrico (HAE) con que cuenta ACINOX-Tunas, trabaja a presión atmosférica lograda por un control automático del sistema de extracción de gases, la atmósfera en su interior es oxidante, además en el mismo se insufla oxígeno técnico de 99,99 % con el objetivo de oxidar el carbono que trae la chatarra para agilizar el proceso de fusión y lograr una escoria con alto contenido de FeO, que garantice una buena práctica de escoria espumosa, y genera energía química.

En el proceso de desoxidación del acero se utiliza como uno de los desoxidantes el aluminio, pero debido a su alto precio en el mercado internacional (2598,75 cuc/t), es necesario evaluar el uso de un sustituto del mismo. En este trabajo se pretende establecer el empleo del carbón antracita para este fin el cual posee un precio inferior (522,48 cuc/t) y a su vez no afecta la calidad del acero.

Situación Problemática: Luego de terminar el proceso en el horno de arco eléctrico, se lleva a cabo la desoxidación del acero con aluminio, éste material tienen un alto precio en el mercado internacional y a la vez, es formador de inclusiones no metálicas afectando la calidad del acero líquido. Es por esto que su utilización no constituye la vía más idónea para la línea de producción; por lo que es necesaria la búsqueda de nuevos materiales que logren este objetivo y sean a la vez más económicos, una de las alternativas puede ser la sustitución de éstos materiales por el carbón antracita.

Problema científico: Insuficiente conocimiento sobre el uso del carbón antracita como desoxidante en la obtención del acero SAE 1030 en la empresa Acinox-Las Tunas.

Campo de acción: Comportamiento del proceso de desoxidación con carbón antracita y preajuste del acero durante el vertido del horno arco eléctrico.

Hipótesis: Si se establece el uso del carbón antracita como agente desoxidante entonces se podrá sustituir por el aluminio en la obtención del acero SAE 1030.

Objeto de estudio: Carbón antracita como desoxidante utilizado durante el vertido del horno arco eléctrico.

Objetivo General: Establecer el uso del carbón antracita como agente desoxidante durante el vertido del horno arco eléctrico.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar desde el punto de vista químico el acero SAE 1030 con el uso del carbón antracita como desoxidante durante el vertido del Horno Arco Eléctrico a la Cuchara (HC).
2. Comparar los resultados del uso del carbón antracita con el aluminio como desoxidante durante el vertido del horno de arco eléctrico para el acero SAE 1030.
3. Determinar el costo económico para la obtención del acero SAE 1030 utilizando el carbón antracita como agente desoxidante.

Tareas:

1. Establecimiento del estado del arte, sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Medición de la composición química del acero en las diferentes etapas de la desoxidación usando carbón antracita.
3. Toma de muestras de 50 coladas del horno cuchara (escoria) y su posterior análisis químico.
4. Cálculo del rendimiento del silicio, manganeso y carbono durante el vertido para el proceso de ajuste.
5. Preajuste del acero en el horno cuchara.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos que resultan de importancia para el desarrollo de la investigación. Con el propósito de disponer de las tendencias actuales, de los principales trabajos realizados y las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada sobre el tema de la desoxidación del carbón antracita que resulten esenciales para el avance del mismo.

Se denomina acero a toda aleación hierro-carbono forjable cuyo contenido de carbono está generalmente comprendido entre 0,10 % y 2,1 % (Fernández y Lasheras, 1991).

Al principio de la década de los 90 los precios del acero bajaron considerablemente tras el abarrotamiento del mercado en Europa y China conjuntamente con la crisis asiática que ya se veía venir. Esto trajo como consecuencia la disminución de los consumos de refractarios y ferroaleaciones y el comienzo de la utilización del carbono como desoxidante. La inconveniencia de la desoxidación con carbono es el fenómeno conocido como “overflow” (desbordamiento de la escoria de la cazuela hacia el exterior de la misma) fundamentalmente en los HAE con piquera sumergible o de nariz donde se hace difícil evitar el paso de la escoria a la cazuela durante el vertido.

La desoxidación con carbono tomó auge principalmente en las acerías de Europa y Asia en las transnacionales tales como Usinor-Sucilor de Francia, Kruup y Tissen de Alemania y Nipón Steel en Japón. En la actualidad ya es una práctica muy usada también en las acerías de América Latina tales como IMEXSA y Aceros DM de México, Acesita de Brasil y Acindar de Argentina. (<http://infoacero.camacero.org/>

1.1 Antecedentes y actualidad del tema

Botella J. et al .Sánchez R. 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 {as cast condition). Se realizaron ensayos de tracción en un sistema Gleeble, a temperaturas entre 1 150 y 1 250 °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, sin embargo para nuestra investigación se evalúa la efectividad de la desoxidación bajo la acción de otro elemento desoxidante que es el carbón antracita.

Carreño V.et al. 1998, realizó una investigación donde se concluyó que los procesos de fabricación de acero se mejoran constantemente en respuesta a las demandas del consumidor que exige un mayor control de limpieza del metal líquido en las diversas etapas de su elaboración. En este trabajo se presentó un simulador matemático que predice la precipitación y composición de las inclusiones no metálicas que se encuentran en el acero líquido en diferentes etapas de su procesamiento, asumiendo que las inclusiones formadas por reoxidación también se pudo simular al incrementar arbitrariamente los niveles de oxígeno que deben consumir los elementos residuales altamente oxidables (Al, Ca), y empezar la reacción con los desoxidantes menores (Si y/o Mn), esta investigación no tiene en cuenta el carbón antracita como elemento desoxidante.

Estupiñan, H. et al, Vásquez, J. 2006, obtuvieron carbón activado a partir de una antracita proveniente del páramo del almorzadero (municipio de Cerrito, Santander), con un 96,6 % de carbono fijo analizaron la antracita y se trató en dos etapas, una de activación química con ácidos para incrementar la reactividad de la superficie externa y facilitar el acceso a la superficie interna del carbón, y otra de activación física a temperaturas de 800, 1 000 y 1 200 °C con CO₂. Evaluaron el efecto de las variables del proceso de activación sobre la actividad del carbón y se hallaron las mejores condiciones para lograr un producto con las mejores

características, se obtuvo una superficie específica del carbón activado de 107,4 m²/g.

Uza J. et al. Landauro A. 2007, realizaron un trabajo sobre la optimización del proceso de desoxidación y mejora de la calidad superficial en los aceros calidad 1008A2 de la corporación aceros Arequipa. El trabajo mostró la optimización del proceso de desoxidación del acero líquido, se analizaron los problemas de reoxidación del acero líquido y los cierres de buzas o clogging en el distribuidor de la colada continua. Además, hicieron un estudio de las variables del proceso metalúrgico (solubilidad de gases, temperatura de sangrado, desoxidación) para la reducción de la porosidad superficial y un análisis del mecanismo de oscilación de la colada continua para reducir la profundidad de las marcas de oscilación. Las condiciones empleadas para este trabajo son diferentes que las utilizadas en nuestra investigación, referente a los agentes desoxidantes y de acuerdo a la marca.

Siderca, T. et al. Simini, J. (2007). La composición de las inclusiones presentes en el acero puede afectar la marcha del proceso de elaboración del mismo y tener un fuerte impacto en las propiedades finales del producto obtenido. Por lo tanto, para optimizar las prácticas utilizadas en el proceso industrial, resulta de gran importancia contar con herramientas termodinámicas que ayuden a comprender cuantitativamente los fenómenos involucrados. En el presente trabajo se describe un modelo que permite determinar la composición de las inclusiones resultantes cuando el acero es desoxidado con aluminio, silicio y manganeso. A partir de la composición total del acero y la temperatura del proceso, el programa desarrollado calcula como se reparten los distintos elementos (Al, Si, Mn, O) entre el acero líquido y las inclusiones utilizando un algoritmo que minimiza la energía libre del sistema. Los resultados del modelo fueron comparados con mediciones reportadas en la literatura y con datos de pruebas industriales realizadas durante el presente trabajo. En ambos casos se observó un buen acuerdo entre los valores medidos y calculados. Finalmente, se presentan los cálculos realizados para evaluar cómo influye la composición total del acero en las inclusiones resultantes.

Según Rocha E. 2009. 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. El acero sometido a la operación de desoxidación se denomina desoxidado. Tal acero durante la solidificación en las lingoteras se comporta de un modo calmado, de él casi no se desprenden gases y por eso se llama con frecuencia acero calmado. Por lo contrario, si no se efectúa la operación de desoxidación, en el acero durante su enfriamiento gradual en la lingotera transcurrirá la reacción entre el oxígeno disuelto en el metal y el carbono $[O] + [C] = CO_{(g)}$. En este caso las burbujas de monóxido de carbono formadas se desprenderán desde el lingote en su cristalización, el metal se agitará enérgicamente en la lingotera y la superficie del mismo será tumultuosa o turbulenta. Tal acero se llama “efervescente”.

En algunos casos la desoxidación del acero se lleva a cabo de modo tal que a partir del metal no se elimine todo el oxígeno. El oxígeno disuelto quedado provoca una efervescencia breve del metal a comienzos de su cristalización. Tales aceros se denominan aceros semi-calmado.

Gómez, P. et al. 2009, propuso desarrollar un método para juzgar la certidumbre de la información pertinente al equilibrio de desoxidación de fundidos de hierro. Se recolectaron y evaluaron datos termoquímicos existentes. Las teorías sobre desoxidación se describieron mediante el comportamiento Henriano de soluciones diluidas del agente desoxidante y el hierro fundido en equilibrio con un óxido. En este estudio, solo se tomaron en cuenta reacciones convencionales a 1 873 K, de forma tal que se consideraron las constantes de equilibrio y coeficientes de interacción de primer orden. El criterio empleado para utilizar la expresión más adecuada de la energía libre se basó en evaluar dos puntos críticos: uno, donde se satisface una relación oxígeno/desoxidante dictada por la estequiometría y dos, cuando el contenido de oxígeno alcanza un valor mínimo en presencia de una cantidad predeterminada del desoxidante. Con la información así clasificada y bajo las restricciones evaluadas en los puntos críticos uno y dos, las composiciones al equilibrio se relacionaron con la electronegatividad del desoxidante.

Gualda I. 2012, realizó una investigación donde obtuvo una serie de líneas de mejora que permitieron una desoxidación más efectiva y por lo tanto, para mejorar la calidad del acero, para ello se introdujeron cambios y nuevas acciones que se debieran realizar para mejorar la desoxidación y desgasificación del acero.

Putan, A. et al. 2013, estudió los resultados del experimento que se refiere a la desulfuración y desoxidación de las escorias sintéticas con escorias del sistema ternario $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Los experimentos se hicieron en un horno de inducción de 10 kg de capacidad. Para formar las escorias reductoras se utilizó una mezcla compuesta de cal, alúmina y óxido de titanio en porcentaje del 2 % del peso de la carga del 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 calcular el contenido de azufre de 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.

Ortiz-Bárceñas, J. et al. 2014, plantearon que la reducción en condiciones no isotérmicas de la mena laterítica ferruginosa de un yacimiento de Nicaro fue estudiada usando como reductores carbón puro, carbón antracita y finos de carbón coque. Se empleó análisis termogravimétrico en un equipo Derivatograph Q-1500D con un régimen de calentamiento lineal hasta los 1 200 °C. Los resultados de la energía aparente de activación, cuando se empleó carbón puro, variaron desde 10 kJ/mol hasta 70 kJ/mol lo que indica que el proceso es controlado por la reacción química.

1.2 Marco teórico o conceptual

La antracita es un carbón mineral con un alto grado de carbono de hasta 95 %, tiene un color negro de estructura brillante y amorfa. Es especialmente pensada para el tratamiento de aguas debido a su dureza y su grado de uniformidad. Gracias a esta dureza se puede utilizar en filtros multimedia o de lecho profundo, con flujos más elevados que en filtros de arena, y reducido contenido de azufre que

le confieren unas excelentes propiedades para ser utilizado en procesos de reducción, y también como fuente de energía, suele ser usado en la fundición de los metales especialmente el hierro mezclado con carbones bituminosos. (<https://www.garciamunte.com>)

Beneficios:

- Velocidades más altas, ciclos más largos y filtración en profundo.
- Mayor capacidad de captación de partículas.
- Evita grietas en el lecho.
- Filtra indistintamente soluciones ácidas o alcalinas.
- Adecuada donde existen problemas con la sílice.
- Elimina fácilmente los depósitos de hierro y manganeso.
- Impide el intermezclado de capas.
- Compatible con la arena sílica
- Eleva la calidad del agua.

1.3 Características químicas del carbón antracita

Tiene como número atómico 6 valencia 2, +4, -4 estado de oxidación +4 electronegatividad 2,5, radio covalente (Å) 0,77, radio iónico (Å), 0,15 radio atómico (Å) 0,914, Configuración electrónica 1s²2s²2p², primer potencial de ionización (eV) 11,34, Masa atómica (g/mol) 12,01115, Densidad (g/ml) 2,26, el carbono es uno de los elementos que se encuentran con mayor frecuencia en la naturaleza, es capaz de formar diversas combinaciones con otros átomos y con átomos de su mismo tipo gracias a su configuración electrónica y tiene muchas aplicaciones.

El grado de un carbón mineral se lo mide de acuerdo al rango (pureza) se interpreta que aquellos con mayor rango tiene concentraciones de carbono más grandes por unidad de volumen, determinándose el primer lugar a la Antracita. La cual entre otras cosas carece de volátiles por lo cual requiere un esfuerzo especial para provocarle ignición y genera poco humo, así como una llama pequeña de color azul, los bituminosos bajos en volátiles reubican en segundo lugar en esta

clasificación después de la Antracita con una capacidad calórica cercana a los 30 MJ/Kg, la Antracita resulta muy atractiva en las aplicaciones metalúrgicas. (<https://www.ecured.cu>).

1.4 Generalidades del Carbón

Los diferentes tipos de carbón se clasifican según su contenido de carbono fijo como: la turba, la primera etapa en la formación de carbón, tiene un bajo contenido de carbono fijo y un alto índice de humedad, el lignito carbón de peor calidad, tiene un contenido de carbono mayor. El carbón bituminoso tiene un contenido aún mayor, por lo que su poder calorífico también es superior. La antracita es el carbón con el mayor contenido en carbono y el máximo poder calorífico. Una de las propiedades es la presión y el calor adicionales que pueden transformar este material en grafito, que es prácticamente carbono puro. Además de carbono, el carbón contiene hidrocarburos volátiles, azufre y nitrógeno, así como diferentes minerales que quedan como cenizas al quemarlo. Ciertos productos de la combustión del carbón pueden tener efectos perjudiciales sobre el medio ambiente. Al quemar carbón se produce dióxido de carbono entre otros compuestos, muchos científicos creen que, debido al uso extendido del carbón y otros combustibles fósiles (como el petróleo), la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre podría aumentar hasta el punto de provocar cambios en el clima de la Tierra. Por otra parte, el azufre y el nitrógeno del carbón forman óxidos durante la combustión que pueden contribuir a la formación de lluvia ácida. (<https://www.garciamunte.com>).

1.5 Tecnologías limpias de carbón

Las tecnologías del carbón son una nueva generación de procesos avanzados para su utilización, algunas pueden ser desde un punto de vista comercial, viables a principios del siglo XXI teniendo como características ser las más limpias y eficientes y menos costosas que los procesos convencionales. Hay muchas tecnologías limpias, pero la mayoría altera la estructura básica del carbón antes de la combustión, durante la misma o después de ella. Con ello reducen las emisiones

de impurezas como azufre y óxido de nitrógeno y aumentan la eficiencia de la producción energética.

En la década de 1980, algunos gobiernos emprendieron programas de colaboración con la industria privada para fomentar el desarrollo de las tecnologías limpias de carbón más prometedoras, como los métodos mejorados para limpiar el carbón, la combustión en lecho fluido, la inyección de sorbentes de horno y la desulfuración avanzada de gases de combustión. (www.fisicanet.com).

1.6 Fundentes y Aditivos

El Carbono es esencial para la fabricación del acero, es uno de los elementos que determina los diferentes grados de acero y sus propiedades, es utilizado en las operaciones de afino en la elaboración del acero y aporta una cantidad grande de la energía requerida en las operaciones de su producción. En los procesos BOF (Horno Básico de Oxígeno), el carbono está presente en el metal caliente que se produce en el Alto Horno, en la elaboración de aceros en Hornos Eléctricos, el carbono está contenido en la chatarra de carga, en el DRI (Proceso de reducción directa), HBI (Briqueta de Hierro Caliente) u otras alimentaciones al horno de hierro alternativo. La cantidad de carbono contenido en estas alimentaciones al HAE, generalmente serán considerablemente inferiores que el contenido en el metal caliente y típicamente se carga algún carbono adicional (Coque, Antracita, etc.) al HAE (Carbón de carga).

En el pasado el carbono se cargaba al horno para asegurar que el nivel de carbono en la fusión estuviera por encima del deseado en el producto final, según la utilización de mayores niveles de oxígeno inyectado como una práctica estándar del HAE, entonces más carbono se requiere en el HAE. La reacción del carbono con el oxígeno dentro del baño para producir monóxido de carbono ($\text{CO}_{(g)}$), trae como resultado una entrada significativa de energía al proceso y ha conducido a reducciones sustanciales en el consumo de energía eléctrica en las operaciones del HAE. La generación de (CO) dentro del baño, también es clave para disminuir concentraciones de gases disueltos (nitrógeno e hidrógeno) en el acero, ya que

estos salen con el monóxido de carbono. Además, las inclusiones de óxidos se evacúan también del acero hacia la escoria.

En las operaciones de inyección de oxígeno, parte del hierro se oxida y pasa a la escoria, estas operaciones con quemadores de oxi - combustible traen también como resultado la oxidación de parte de la chatarra pasando también a la escoria una vez que se funde la chatarra. El carbono disuelto en el acero reaccionará con el FeO de la escoria en la interfaz escoria/metal para producir $\text{CO}_{(g)}$ y recuperar la mayor cantidad de hierro de la escoria hacia el acero.

La cantidad de carbono de carga utilizado estará en dependencia de varios factores incluyendo el contenido de carbono que aporta la chatarra, consumo de oxígeno proyectado, carbono vertido deseado y la economía del rendimiento del hierro contra el costo del hierro. En general, la cantidad utilizada corresponderá a un balance carbono / oxígeno en lo que el elaborador del acero tratará de maximizar el rendimiento del hierro. Las tasas de carbono de carga típicas para la producción de aceros al carbono medios yace en el rango de 2 – 12 kg/t de acero líquido.

Generalmente, los 3 tipos de materiales de carbono utilizados como carbono de carga en las operaciones del HAE, son carbón Antracita, Coque metalúrgico y Coque del petróleo crudo. La mayoría del carbón antracita utilizado en las operaciones de elaboración del acero en América de Norte, es extraído de las minas del este de Pensilvania. Este material tiene una composición general de 3 – 8 % de contenido de Humedad, 11 – 18 % de Cenizas y 0,4 – 0,7 % de Azufre.

La alta variación en el contenido de Cenizas, se traduce en amplias variaciones en el contenido de carbono fijo y en general, las operaciones en el HAE se esfuerzan por mantener el contenido de cenizas en el mínimo. La ceniza consta principalmente de sílice, un alto incremento de cenizas al HAE requerirá una adición mayor de Cal con el fin de mantener la relación de la basicidad deseada en la escoria. Los mejores grados de carbón antracita han fijado contenidos de carbono de 87 – 89 %, carbones antracita de bajo grado pueden haber fijado niveles de carbono tan bajos como 50 %.

1.7 Características de la Desoxidación

La desoxidación es una operación tecnológica con la cual el oxígeno disuelto en el metal se transforma en un compuesto insoluble en el metal o se elimina de este último. El acero desoxidado tras la solidificación no desprende apenas gases, por ello se denomina acero calmado.

Cuando no se desoxida un acero, las burbujas del monóxido de carbono formadas se desprenderán en cristalización, el metal se agitará enérgicamente y la superficie del metal será tumultuosa. Tal acero se llama efervescente. Existe una desoxidación intermedia que da acero semicalmado (Voskoboinikov, 1981)

A continuación se describen los siguientes procedimientos de desoxidación:

- a) Desoxidación por precipitación o clásica.
- b) Desoxidación por difusión
- c) Desoxidación tratando el metal por la escoria en la cuchara

Desoxidación por precipitación o clásica.

Consiste en transformar el oxígeno disuelto en el acero en óxido insoluble agregando al metal un elemento llamado desoxidante.

El desoxidante debe de ser afín con el oxígeno que el hierro, como resultado de la reacción se forma un óxido, poco soluble en el metal cuya densidad es menor que la del acero. El precipitado obtenido emerge pasando a la escoria. (Voskoboinikov, 1981).

En la práctica se ha visto que en la fabricación de aceros de 0,40 a 0,90 % de carbono, el acero esta calmado, cuando el contenido en oxígeno es inferior a 0,0030 % y, en los aceros de 0,14 a 0,40 % de carbono, cuando es inferior a 0,0050 %. Finalmente los aceros de 0,08 % de carbono están calmados cuando es inferior a 0,0080 % (Enríquez y Tremps, 2007).

Desoxidación por difusión

Cuando el metal no está en efervescencia, entre la escoria y la actividad del oxígeno en el baño existe una relación, ley de distribución de las impurezas disueltas en dos líquidos inmiscibles.

Por lo que si se disminuye la actividad de los óxidos de hierro en la escoria disminuirá el grado de oxidación del metal. Al efectuar la desoxidación por difusión suelen suministrarse a la escoria reductores fuertes: carbono, (coque, carbón vegetal, electrodo) el silicio (ferrosilicio) y el aluminio.

En la desoxidación por difusión los productos de desoxidación no quedan en el metal, quedando un acero con menos inclusiones no metálicas, ventaja sobre la desoxidación por precipitación. El inconveniente principal es la velocidad de difusión en un metal calmado cuando este es pequeña, teniendo menor rendimiento, además, al estar en una atmósfera oxidante la mayoría de los desoxidantes añadidos reaccionan con la atmósfera y no con los óxidos de hierro, siendo por ello una opción trabajar en atmósfera protectora (Voskoboinikov, 1981)

Desoxidación por difusión en cuchara

En una variedad de la desoxidación por difusión que se efectúa en la cuchara en vez de en el horno y se distingue por la gran velocidad del proceso. Si durante la salida del horno a la cuchara se mezcla con una escoria que no contiene óxidos de hierro, entonces ocurre la difusión del oxígeno en forma de óxidos que pasa del metal a la escoria. El proceso ocurre con velocidad, ya que el chorro del metal al caer desde una altura considerable sobre la superficie de la escoria forma una emulsión de escoria y metal. La escoria se prepara por separado, está compuesta principalmente por $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ y se denomina escoria sintética.

Para que se realice la desoxidación realmente, lo fundamental es que el contenido de óxido de hierro en la escoria sea mínimo. Además es necesario asegurar la actividad máxima de CaO . Asegurando esto se crean las condiciones para eliminar el oxígeno y además el azufre.

La escoria sintética debe tener una temperatura de fusión baja, y debe humectarse mal con el metal, para que se separe completamente de este último.

La desoxidación por difusión en cuchara disminuye el tiempo de fusión del acero, aumentan la calidad y la estabilidad de las propiedades del metal (Voskoboinikov, 1981).

1.8 Desoxidación con carbono

El proceso de desoxidación como su nombre lo indica no es más que la disminución del oxígeno soluble en el acero ($[O]$) con el uso de uno o más elementos (aluminio, silicio, calcio, titanio, carbono y otros) que por su característica es afín al oxígeno. Algunos de estos elementos que normalmente se utilizan son en primer lugar caros, en segundo lugar dañinos en las condiciones de la metalurgia actual y en tercer lugar “ensucian” el acero (como son el aluminio y el silicio). De estos agentes desoxidantes el que menos cumple con los tres aspectos anteriormente mencionado es el carbono cuyo producto de la reacción de desoxidación es un gas que se evacúa del acero con facilidad.

1.8.1 Desoxidación del Acero con carbono durante el Vertido

El tipo de acero al carbono a elaborar, se trabaja en los niveles de concentración de carbono entre 0,08 a 0,15 % en el HAE garantizando con ello un contenido de FeO en la escoria suficientemente alto (entre 20 - 40 %) para lograr utilizar eficientemente la práctica de escoria espumosa. Por tal motivo el acero a verter del HAE a la cazuela promedia entre los 300 y 1 000 ppm de oxígeno disuelto en él.

En la empresa el proceso de desoxidación se realiza con carbono ya que el producto de la reacción es un gas que abandona el acero líquido y por ello es un acero mucho más limpio que si se desoxidara con el aluminio y silicio.

Normalmente la desoxidación del acero durante el vertido del HAE a la cazuela se realiza de la siguiente forma:

Luego de abrir la piquera del HAE (estando la cazuela en posición de vertido), se procede al vertido del acero y cuando ya exista aproximadamente 5 toneladas en la cazuela se comienzan las adiciones de carbono y FeSiMn calculados no solo para desoxidar el metal sino también para ajustar el acero aproximadamente al 80 % de su composición química deseada. Posteriormente la cazuela con el acero contenido en ella se traslada al HC donde se realiza el ajuste final de la composición química, se homogeniza composición química y temperatura. El departamento técnico de la acería define el procedimiento de cálculo de tales adiciones, tanto en el vertido como en el ajuste final en el HC. Generalmente fija valores de adiciones durante el vertido del acero del HAE a la cazuela (en este caso de FeSiMn y Carbón) dejando a los fundidores del HC el cálculo de ajuste final por la metodología basada en el procesamiento estadístico.

1.9 Cinética del proceso de oxidación del carbono

El carbono disuelto en el metal se oxida fundamentalmente hasta $\text{CO}_{(g)}$. No obstante para concentraciones bajas de carbono además de la reacción $[\text{C}] + [\text{O}] \rightarrow \text{CO}_{(g)}$ se debe tomar en consideración la reacción $[\text{C}] + 2 [\text{O}] \rightarrow \text{CO}_{2(g)}$ (Post combustión).

En la mayoría de los casos se puede considerar, con una precisión suficiente para fines prácticos, que el carbono se oxida formando $\text{CO}_{(g)}$. La constante de equilibrio de esta reacción “Kc” puede ser expresada de la siguiente forma: (según Smirnov 1984)

$$K_c = \frac{p(\text{CO})}{[\text{C}] \times [\text{O}]} \quad (1)$$

Pero si la presión de ($\text{CO}_{(g)}$) es constante e igual a 1atm, entonces:

$$K_c = \frac{1}{[\text{C}] \times [\text{O}]} \quad (2)$$

Las investigaciones (según Smirnov 1984) demostró que el valor de $[\text{C}] \cdot [\text{O}]$ será constante si la temperatura oscila entre (1 853-1 893) K y $p(\text{CO}) = 1 \text{ atm}$ y sus

valores se encuentran próximos a los determinados por primera vez por Wachter y Hamilton (EUA) a 1 620 °C, $m = 0,0025$.

De forma general, en el límite de temperaturas de (1 723- 1 923) K que es lo que representa un interés práctico para los fundidores de acero, el valor de la constante de equilibrio se mantiene constante.

El proceso de oxidación del carbono en el metal es un proceso complejo y se considera que se realiza de la siguiente forma:

Primera etapa: Paso del oxígeno de la atmósfera a la escoria y de la escoria al metal. Esta etapa está formada por:

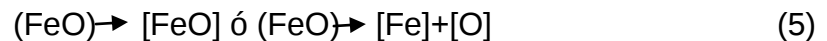
- a) Difusión del oxígeno de la atmósfera hacia el límite de separación gas - escoria.
- b) Absorción química del gas sobre la superficie de la escoria, con la oxidación simultánea del óxido ferroso hasta óxido férrico:



- c) Difusión del óxido férrico (Fe_2O_3) en la masa de escoria hacia el límite de separación escoria - metal.
- d) Reducción del óxido férrico en la capa superficial escoria-metal hasta óxido ferroso.



- e) Paso del óxido ferroso de la escoria al metal



- f) Difusión del oxígeno en la masa del metal hacia el lugar donde reacciona con el carbono, que es la superficie entre revestimiento y la fase metálica.

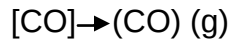
Segunda etapa: Intercambio químico del carbono con el oxígeno, formada por:

- a) Localización del [C] y el [O], es decir, acumulación de ambos en aquellas áreas de la masa metálica donde existen posibilidades para que reaccionen (poros del revestimiento refractario).(conocido como el ángulo de contacto)
- b) El intercambio químico:



Tercera etapa: Formación de la burbuja de $CO_{(g)}$, su ascenso y eliminación en la superficie del metal, o sea:

- a) Formación de la burbuja gaseosa en la interface metal- revestimiento.



- b) Crecimiento y traslado de las burbujas a la fase gaseosa de la atmósfera del horno, con la reacción final $CO_{(g)}$ hasta $CO_{2(g)}$ (esta reacción de combustión completa del carbono, ocurre en el conducto enfriado de extracción de los gases del HAE de ACINOX - Tunas). En los HAE modernos esta práctica es muy importante llamada la post combustión. (según Smirnov 1984)

Estas etapas se pueden resumir en:

1. Suministro de los reactivos (O_2 y C) a la zona de la reacción.
2. Reacción $[C] + [O] \rightarrow [CO]$.
3. Desprendimiento de los productos de la reacción, las burbujas de $CO_{(g)}$ (o mezcla de $CO_{(g)}$ y $CO_{2(g)}$) en la fase gaseosa.

La energía de activación aparente de la reacción $[C] + [O] \rightarrow CO_{(g)}$ tiene un valor relativamente pequeño (según Kudrin; 1981, $E = 80'000 - 120'000$ J/mol), lo cual testimonia que la reacción se verifica prácticamente de modo instantáneo. La solubilidad del $CO_{(g)}$ en el acero líquido es ínfima, por esta razón puede considerarse que la reacción de oxidación del carbono transcurre de manera heterogénea, es decir, solo en el límite de separación entre el metal y la fase gaseosa, los átomos de $[C]$ y $[O]$ forman la molécula de $CO_{(g)}$ que de inmediato pasa a la fase gaseosa y evacuada del acero líquido del HAE.

Es diferente el carácter de las curvas cinéticas de la combustión del carbono para sus diversas concentraciones: Una vez alcanzada la concentración crítica de carbono (0,15 – 0,35) % se observa la disminución notable de la velocidad de su oxidación. El oxígeno y el carbono son impurezas tensoactivas, la presencia de la concentración crítica de carbono (en el proceso de su oxidación durante la marcha de la fusión) se condiciona por la reorganización de la capa superficial y por el paso

de la absorción preponderante del carbono a la ocupación preponderante de la capa superficial por el oxígeno (es decir, se crea la situación en la que la velocidad de la reacción se determina por la difusión del carbono hacia la zona de la reacción). Las investigaciones realizadas (según Kudrin; 1981) permiten establecer también que el valor de la concentración crítica de carbono se determina por la intensidad del suministro del oxidante al baño (se incrementaba con el aumento de la intensidad del suministro de O_2 y se reducía durante la ebullición y mezclado del baño), por tanto, a las concentraciones superiores a las críticas la intensidad del transcurso de la reacción de descarburación se determina por la intensidad del suministro del oxidante, en tanto que a las concentraciones inferiores a las críticas, por la difusión del carbono hacia la zona de la reacción. Prácticamente esto significa que para el contenido lo suficientemente alto de carbono en el metal la velocidad de su oxidación será tanto mayor cuanto más intensiva sea la alimentación del oxígeno.

A las concentraciones bajas del carbono, la intensificación del suministro del oxígeno al baño no proporciona el efecto necesario, por eso de alguna manera es preciso mezclar artificialmente el baño de metal (intensificar la alimentación del carbono a la zona de reacción), con el fin de aumentar la velocidad de la oxidación del carbono, el HAE objeto de estudio, no presenta ningún tipo de agitación artificial que no sea la de la propia reacción de oxidación con el carbono (formación del $CO_{(g)}$).

Como planteamos anteriormente la velocidad del proceso de descarburación también puede ser limitada por la tercera etapa: desprendimiento del $CO_{(g)}$. Para que en el metal pueda formarse una burbuja de $CO_{(g)}$ ella tiene que vencer la presión de la columna de metal (P_{met}) Presión Ferrostática, de escoria (P_{esc}), y de la atmósfera (P_{atm}) sobre ella, así como las fuerzas de cohesión ($\frac{2\gamma}{r}$), donde “r” es el radio de la burbuja de $CO_{(g)}$.

$$P_{desCO} > P_{met} + P_{esc} + P_{atm} + \frac{2\gamma}{r} \quad (7)$$

El valor de $\frac{2\gamma}{r}$ se hace prácticamente notable a los pequeños valores del radio, pero cuando $r > 1\text{mm}$ se puede despreciar este término. (Refractario desgastado o liso)

Por esta razón en la práctica, es imposible la formación de las burbujas en el seno del volumen líquido del metal. Ella puede tener lugar solo en el límite de separación entre las fases.

Tales límites pueden ser los de separación, escoria - metal, inclusión no metálica - metal, burbuja de gas - metal, revestimiento – metal (como se explicó anteriormente).

Teniendo en cuenta la rugosidad y bajo grado de humectación del revestimiento refractario por el metal, se puede considerar que las condiciones más favorables para la formación de las burbujas de $\text{CO}_{(g)}$ se encuentran en el límite metal - revestimiento refractario.

Durante el soplado del metal con oxígeno o con gas inerte, los sectores del transcurso predominante de la reacción se hacen también las cavidades gaseosas en el interior del metal las cuales tienen una superficie de separación bien desarrollada entre las fases líquida y gaseosa (Para la presente investigación se pone de manifiesto el primero).

El grado de oxidación del metal observado en la práctica $[\text{O}]_{\text{obs}}$ como se planteó anteriormente, siempre es mayor que el de equilibrio $[\text{O}]_{\text{Equil}}$, no obstante la diferencia $\Delta [\text{O}]$, como regla es pequeña. En dependencia de la profundidad del baño (altura de la columna de metal) y del punto en que se tomen las muestras (bajo la escoria o cerca de la solera) en la interfaz metal-escoria el valor de $\sum P = P_{\text{atm}} + P_{\text{esc}} + P_{\text{met}}$ para diferentes instalaciones puede variar de 106 a 112 Kpa (1). Respectivamente cambian los valores de las concentraciones en equilibrio del $[\text{O}]$, ya que la variación de la presión ejerce cierta influencia en la relación entre las concentraciones de equilibrio de $[\text{C}]$ y $[\text{O}]$. Si se tiene en cuenta que

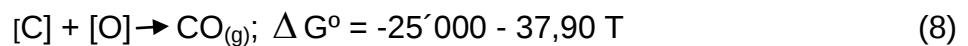
$K_c = \frac{p(CO)}{[C] \times [O]}$; entonces a la presión atmosférica normal, en la superficie del baño $K_c = \frac{1}{[C] \times [O]}$. Mientras que en la profundidad del baño, tomada en consideración la presión de una columna de escoria de metal, la presión total en el punto de desprendimiento de las burbujas de CO puede ser mayor, por ejemplo 1,5 veces. Con ello, el valor de $K_c = \frac{1,5}{[C] \times [O]}$ y $[O] = 1,5/K_c \cdot [C]$, es decir, para las condiciones dadas la concentración de equilibrio de oxígeno será 1,5 veces mayor. Ya que al ser un gas tensoactivo, siempre busca la superficie del baño metálico, (según Kudrin; 1984).

1.10 Termodinámica de la reacción de oxidación del carbono

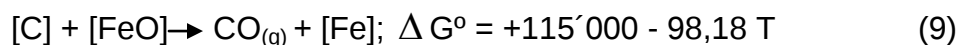
Para analizar que ocurre termodinámicamente con la reacción de oxidación del carbono partiremos analizando que ocurre al aumentar la temperatura:

La variación en la energía libre en dependencia con la temperatura para las siguientes reacciones (según Kudrin; 1981) se puede expresar de la forma siguiente:

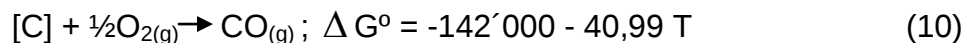
- a) Para la oxidación del carbono disuelto en el metal con el oxígeno disuelto en el mismo:



- b) Para la oxidación con óxidos de hierro de la escoria:



- c) Para la oxidación directamente con el oxígeno:



Así pues, en todos los casos el cambio en la energía libre disminuye con el aumento de la temperatura, o sea, se crean las condiciones más favorables para el

transcurso de la reacción de oxidación del carbono. Donde prácticamente se hace instantánea.

Teniendo en cuenta que el incremento de la temperatura siempre provoca el aumento de las velocidades de las reacciones, así como el hecho de que la reacción de oxidación del carbono sea irreversible, ya que el monóxido de carbono abandona continuamente la zona de reacción y el proceso transcurre sólo en el sentido de la disminución de la cantidad de carbono. Se puede considerar que la subida de la temperatura siempre contribuirá a la aceleración de la oxidación del carbono.(principio de Le Châtelier).

Partiendo de que las expresiones de la variación de la energía libre fue determinada de forma aproximada, calculando ΔG° (según Krestóvnikov, Vigdróvich) para la primera reacción (es la que más interesa para el desarrollo de los experimentos) a la temperatura de 1630°C (1903K) que es la temperatura media de vertido en ACINOX-Tunas, y específicamente de gran interés.

Es importante conocer también que al aumentar la temperatura aumenta la solubilidad del oxígeno y el carbono en equilibrio con el oxígeno disuelto en el metal es bajo, por ello desde el punto de vista de la factibilidad de la reacción del $[C] + [O] \rightarrow CO_{(g)}$ se favorece con temperaturas del acero superiores a 1 600 °C.

Para el cálculo de ΔG° a esta temperatura fue necesario recurrir a la ecuación de Kirchoff, la cual expresa (según) la dependencia del ΔH°_R con la

temperatura:
$$\Delta H^\circ_T - \Delta H^\circ_{298} = \int_{298}^T \Delta C_p dT$$

Lo mismo para el caso del ΔS° :

$$\Delta S^\circ_T - \Delta S^\circ_{298} = \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

Por último se aplica la ecuación de Gibbs – Helmholtz que plantea:

$$\Delta G^{\circ}_T = \Delta H^{\circ}_T - T\Delta S^{\circ}_T$$

$$\Delta G^{\circ}_{1903} = -29,42 - 1903 \times 0,01869$$

$$\Delta G^{\circ}_{1903} = -15078.97 \text{ KJ/mol}$$

De esta forma queda demostrada la espontaneidad de la reacción a 1 630 °C.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I

- ✓ Durante la búsqueda bibliográfica y caracterización teórica del proceso de desoxidación durante el vertido de los hornos de arco eléctrico a la cazuela se pudo conocer y caracterizar las diferentes tecnologías empleadas para ello, lo cual permitió usarlo como elemento de referencia y de comparación para la implementación de la desoxidación con carbón antracita durante el vertido en sustitución del aluminio.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hace referencia de la selección adecuada de los materiales y los métodos de análisis de la composición química y de gases durante el proceso de elaboración del acero al carbono SAE 1030, es de vital importancia para el desarrollo del trabajo investigativo que permitan garantizar su desarrollo de manera eficaz, la autenticidad de los resultados en cuanto a la toma de muestra, se describe de modo resumido el fundamento de cada uno de ellos y se especifica la metodología experimental, para determinar el éxito del proceso de desoxidación.

Tabla 1. Composición química del SAE 1030 (%)

Acero	Composición química (%)					
	C	Mn	Si	Al	P	S
SAE 1030	0,26-0,32	0,6-0,9	0,10-0,30	-	0,05	0,05

2.1 Metodología de la investigación

Se procedió a realizar una corrida de 50 coladas en el Horno de Arco Eléctrico de ACINOX – Tunas tomando muestras de metal y de escoria justamente antes del proceso de vertido del acero del mencionado agregado metalúrgico a la cazuela, con el objetivo de determinar las concentraciones de oxígeno y carbono disueltos en el metal y el contenido de óxido de Hierro (FeO) en porcentaje de la escoria. Controlamos también el peso del metal y de la escoria. (Ver anexo 2)

Estas 50 coladas debieron cumplir una serie de requisitos para ser consideradas como coladas representativas y válidas para la realización de su análisis. Estos requisitos o condiciones a cumplir fueron las siguientes:

- Tiempo de proceso (Tap – to – Tap) no mayor de 100 minutos.
- No tuvieron interrupciones durante el proceso en el HAE ni en el HC.
- Índice de consumo de energía no mayor de 485 kWh/ton.
- Tonelaje metálico entre 57 y 65 toneladas.
- Coladas realizadas con la práctica de intensificación para agilizar el proceso de fusión.
- Coladas realizadas con la práctica de escoria espumosa.
- Coladas con contenido de carbono entre 0,08 a 0,15 % (escoria espumosa).
- Temperatura de vertido entre 1610 – 1640 °C.
- Presencia nuestra en estas coladas.

Tabla 2. Composición química promedio del acero al carbono SAE 1030.

Composición química del acero (%)									
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Al	Sn
0,26-0,32	0,60-0,90	0,05	0,05	0,10-0,30	0,30	0,30	0,35	0,0021	0,050

Tabla 3. Composición química promedio de la escoria durante el vertido del HAE

Composición química de la escoria (%)			
NiO	0,14	P ₂ O ₅	0,626
Cr ₂ O ₃	1,285	S	0,14
MnO	7,495	TiO ₂	0,442
CaO	34,085	V ₂ O	0,14
MgO	7,545	Fe	0,286
SiO ₂	16,235	Na ₂ O	0,023
Al ₂ O ₃	3,861	K ₂ O	0,051
FeO	23,049	Zn	0,007
C]	0,16		

Muestra patrón utilizando aluminio como desoxidante

Para comprobar la efectividad de los resultados obtenidos a partir de la utilización del carbono como agente desoxidante se llevará a cabo una comparación del mismo con una muestra obtenida al utilizar el aluminio como desoxidante (tabla 4).

Tabla 4. Muestra patrón

Composición química (%)									
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Al	Sn
0,295	0,734	0,0116	0,022	0,1183	0,06	0,11	0,26	0,004	0,01

2.1.1 Material empleado

Material a utilizar:

Carbón antracita para la desoxidación del acero durante el vertido del Horno Arco Eléctrico en la empresa Acinox - Las Tunas.

2.1.2 Instrumentos utilizados

- ✓ Toma muestra (Figura 1) es un dispositivo que permite tomar una muestra de acero líquido para determinar la composición química del acero.
- ✓ Termopar (Figura2) es el dispositivo que se usa para saber la temperatura del acero líquido en el HAE y HC, reflejándose en la pantalla de fusión del HAE y HC mediante el OLTEK.



Figura 1. Instrumento toma muestra



Figura 2. Instrumento termopar

Toma y selección de la muestra

✓ Toma de la muestra

En el horno cuchara, donde ya está el acero líquido, se introduce el instrumento toma muestra el mismo tiene una lanza con una chambelona (molde metálico) que es por donde penetra el acero líquido, segundos después se solidifica, se rompe la chambelona y se lleva la muestra al laboratorio instrumental, donde se hace la caracterización química del acero y se realiza el ajuste del mismo.

✓ Termopar

En el horno cuchara (HC) donde se encuentra el acero líquido, se introduce el instrumento termopar con el objetivo de saber la temperatura con la que llega el acero, para determinar si tienen que aumentar la misma o no, el trabajador de esa área introduce el termopar que en su interior tiene una lanza que se conecta mediante un cable al equipo llamado OLTEK el cual tiene un semáforo el que indica como el trabajador debe proceder a la toma de temperatura, el verde es para la introducción de la lanza en el HC ,el amarillo es que ya está tomando la temperatura y el rojo es que ya la temperatura es reconocida por la computadora y el operador iniciará la función que le corresponde.

2.1.3 Métodos empleados en el proceso

Para obtener la composición química de la escoria se empleó el método de Fluorescencia de rayos X, en el laboratorio instrumental de la empresa Acinox-Las Tunas, así como el analizador de gases modelo, LECO TC-136 para obtener la cantidad de oxígeno existente y el Cuantómetro OBLFQSG 750-II para determinar la composición química del acero.

Método de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Mediante este método se determina la composición química de las muestras de las coladas para determinar el grado de oxidación del metal.El método consiste en hacer incidir un haz de Rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes

elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad y mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.



Figura 3. Difractómetro de Fluorescencia de Rayos X

Método empleado analizador de gases modelo LECO TC 136

Este método permite controlar por un microprocesador el nitrógeno y oxígeno, determinándolo simultáneamente, posee en un Horno de Electrodo EF-100.

El nitrógeno se mide por conductividad térmica y el oxígeno por detección infrarroja. El oxígeno 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.



Figura 4. Analizador de gases modelo LECO TC 136.

Cuantómetro OBLF QSG 750-II

OBLF QSG 750-II determina simultáneamente 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. El OBLF QSG 750-II tiene la posibilidad de dar a pesar de la composición química el contenido de nitrógeno. Permite la medición de 24 líneas espectrales, en el rango comprendido entre 178,29 nm a 405,78 nm para los siguientes elementos P, S, B, Sn, C, As, Si, W, Ni, Cr, Fe, Mo, Mn, V, Nb, Cu, Zn, Ti, Al, Ca, Pb, Co.



Figura 5. Cuantómetro modelo OBLF QSG 750-II

Metodología de cálculo para determinar los rendimientos del Manganeso, Silicio y Carbono

2.2 Determinación del rendimiento del Mn, Si, C

Materiales

FeSi-75, 75 % Si

FeSiMn, 67 % Mn, 17 % Si

Carbón III de ajuste, 80% C.

Para el cálculo del rendimiento total del Mn, Si, C es necesario recurrir a la siguiente expresión:

$$RTotal_{Mn} = \frac{TotalMn_{Sale}}{TotalMn_{Entra}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

$$[RTotal_{Mn}] = \frac{[Kg]}{[Kg]} \cdot [\%] = [\%]$$

donde:

$RTotal_{Mn}$: Rendimiento total de Mn; %.

$TotalMn_{Sale}$: Masa total de “Mn” en el acero a la salida del HC (final); Kg.

$TotalMn_{Entra}$: Masa total de “Mn” añadido al acero; Kg.

Para determinar el $TotalMn_{Sale}$ se procede de la siguiente forma:

$$TotalMn_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%Mn_{Acero}}{100} \quad (2.2)$$

$$[TotalMn_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HC; Kg. (Anexo 4)

$\%Mn_{Acero}$: Contenido de “Mn” en el acero; %. (Anexo 4)

Para determinar el $TotalMn_{Entra}$ se procede de la siguiente forma:

$$TotalMn_{Entra} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%Mn_{Acero} + Mt_{FeSiMn} \cdot \%Mn_{FeSiMn}}{100} \quad (2.3)$$

$$Mt_{FeSiMn} = Mt_{FeSiMn}(Vert) + Mt_{FeSiMn}(HC) \quad (2.4)$$

$$[TotalMn_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HAE; Kg. (Anexo 4)

%Mn_{Acero}: Contenido de “Mn” en el acero que sale del HAE; %. (Anexo 4)

Mt_{FeSiMn}(Vert): Masa total de FeSiMn añadido durante el vertido; Kg.(Anexo 5)

%Mn_{FeSiMn}: Contenido de “Mn” en el FeSiMn; %.(67 %)

Mt_{FeSiMn}(HC): Masa total de FeSiMn añadido durante el ajuste en HC; Kg.(Anexo 5)

Para el cálculo de los rendimientos de estos elementos en las diferentes etapas del proceso de elaboración del acero se utilizan las siguientes expresiones:

Para el proceso de vertido:

$$RMnVert = \frac{mMn_{Sale}}{mMn_{Entra}} \cdot 100. \quad (2.5)$$

$$[RMnVert] = \frac{[Kg]}{[Kg]} \cdot [\%] = [\%]$$

donde:

RMnVert.: Rendimiento del manganeso en el proceso de vertido; %.

mMn_{Sale}: Cantidad de manganeso en el acero después de ser vertido; Kg.

MMn_{Entra}: Cantidad de manganeso que entra durante el proceso de vertido; Kg.

Para el cálculo de Mn_{Sale} se procede de la siguiente forma:

$$mMn_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%Mn_{Acero}}{100} \quad (2.6)$$

$$[mMn_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero}: Masa total de acero que sale del HAE; Kg.

%Mn_{Acero}: Contenido de “Mn” en el acero al final del vertido; %.

La masa de Mn que entra durante el vertido se determina por la siguiente expresión:

$$mMn_{Entra} = \frac{Mt_{FeSiMn} \cdot \%Mn_{FeSiMn} + Mt_{Acero}(Sal.HAE) \cdot \%Mn_{Acero}}{100} \quad (2.7)$$

$$[mMn_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$Mt_{Acero}(Sal.HAE)$: Masa total de acero que sale del HAE; Kg.

$\%Mn_{Acero}$: Contenido de “Mn” en el acero que sale del HAE; %.

$Mt_{FeSiMn}(Vert)$: Masa total de FeSiMn añadido durante el vertido; Kg.

$\%Mn_{FeSiMn}$: Contenido de Mn en el ferro; %.

Para el proceso de ajuste en el HC:

$$RMnCuch = \frac{mMn_{Sale}}{mMn_{Entra}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

$$[RMnCuch] = \frac{[Kg]}{[Kg]} \cdot [\%] = [\%]$$

donde:

$RMnCuch$: Rendimiento del manganeso en el HC; %.

mMn_{Sale} : Masa de manganeso en el acero después de ajustado (final); Kg.

mMn_{Entra} : Masa de manganeso que entra al HC; Kg.

La masa de Mn que sale se calcula de la siguiente manera:

$$mMn_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%Mn_{Acero}}{100} \quad (2.9)$$

$$[mMn_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HC; Kg.

$\%Mn_{Acero}$: Contenido de “Mn” en el acero; %.

La masa de Mn que entra se calcula por la siguiente expresión:

$$mMn_{Entra} = \frac{Mt_{FeSiMn} \cdot \%Mn_{FeSiMn} + Mt_{Acero} \cdot \%Mn_{Acero}}{100} \quad (2.10)$$

$$[mMn_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{FeSiMn} : Masa total de FeSiMn añadida en HC; Kg.

$\%Mn_{FeSiMn}$: Contenido de Mn en el FeSiMn añadido; %.

Mt_{Acero} : Masa total de acero líquido que entra al HC; Kg.

$\%Mn_{Acero}$: Contenido de Mn en el acero que entra al HC; %.

Para el cálculo del silicio se procedió de la misma manera utilizando las siguientes ecuaciones de la 2.1 hasta la 2.10 sustituyendo el manganeso por silicio.

Cálculos referidos al “C”

El Rendimiento total del “C” se calcula de forma análoga a los elementos anteriores, o sea por la expresión (2.1).

Para determinar el $TotalC_{Sale}$ se procede de la siguiente forma:

$$TotalC_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%C_{Acero}}{100} \quad (2.11)$$

$$[TotalC_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HC; Kg.

$\%Ci_{Acero}$: Contenido de “C” en el acero; %.

Para determinar el $TotalC_{Entra}$ se procede de la siguiente forma:

$$TotalC_{Entra} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%C_{Acero} + Mt_{FeSiMn} \cdot \%C_{FeSiMn} + Mt_{Antrac. (HC)} \cdot \%C_{Antrac.}}{100} \quad (2.12)$$

$$Mt_{FeSiMn} = Mt_{FeSiMn (Vert)} + Mt_{FeSiMn (HC)} \quad (2.13)$$

$$[TotalC_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HAE; Kg. (Anexo 4)

$\%C_{Acero}$: Contenido de “C” en el acero que sale del HAE; %. (Anexo 5)

$Mt_{FeSiMn (Vert)}$: Masa total de FeSiMn añadido durante el vertido; Kg. (Anexo 5)

$\%C_{FeSiMn}$: Contenido de “C” en el FeSiMn; %.

$Mt_{FeSiMn (HC)}$: Masa total de FeSiMn añadido durante el ajuste en HC; Kg.

$Mt_{Antrac. (HC)}$: Masa total de antracita añadido durante el ajuste en HC; Kg.

$\%C_{Antrac.}$: Contenido de “C” en la antracita; %.

Para el cálculo del rendimiento de este elemento en las diferentes etapas del proceso de elaboración del acero se utilizan las siguientes expresiones:

Para el proceso de vertido:

$$RC_{Vert.} = \frac{mC_{Sale}}{mC_{Entra.}} \cdot 100 \quad (2.14)$$

$$[RC_{Vert.}] = \frac{[Kg]}{[Kg]} \cdot [\%] = [\%]$$

donde:

$RC_{iVert.}$: Rendimiento del “C” en el proceso de vertido; %.

mC_{iSale} : Cantidad de “C” en el acero después de ser vertido; Kg.

$MC_{Entra.}$: Cantidad de “C” que entra durante el proceso de vertido; Kg.

Para el cálculo de C_{Sale} se procede de la siguiente forma:

$$mC_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%C_{Acero}}{100} \quad (2.15)$$

$$[mC_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero} : Masa total de acero que sale del HAE; Kg. (Anexo 5)

$\%Si_{Acero}$: Contenido de “C” en el acero al final del vertido; %. (Anexo 4)

La masa de “C” que entra durante el vertido se determina por la siguiente expresión:

$$mC_{Entra} = \frac{Mt_{FeSiMn} \cdot \%C_{FeSiMn} + Mt_{Acero} (Sal.HAE) \cdot \%C_{Acero}}{100} \quad (2.16)$$

$$[mC_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$Mt_{Acero}(Sal.HAE)$: Masa total de acero que sale del HAE; Kg.

$\%C_{Acero}$: Contenido de “C” en el acero que sale del HAE; %.

Mt_{FeSiMn} : Masa total de FeSiMn añadido durante el vertido; Kg.

%C_{FeSiMn}: Contenido de “C” en el FeSiMn; %.

Para el proceso de ajuste en el HC:

$$RCCuch = \frac{mC_{Sale}}{mC_{Entra}} \cdot 100 \quad (2.17)$$

$$[RCCuch] = \frac{[Kg]}{[Kg]} \cdot [\%] = [\%]$$

donde:

RCCuch: Rendimiento del “C” en el HC; %.

mC_{Sale}: Masa de “C” en el acero después de ajustado (final); Kg.

mC_{iEntra}: Masa de “C” que entra al HC; Kg.

La masa de “C” que sale se calcula de la siguiente manera:

$$mC_{Sale} = \frac{Mt_{Acero} \cdot \%C_{Acero}}{100} \quad (2.18)$$

$$[mC_{Sale}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{Acero}: Masa total de acero que sale del HC; Kg.

%C_{Acero}: Contenido de “C” en el acero; %.

La masa de “C” que entra se calcula por la siguiente expresión:

$$mC_{Entra} = \frac{Mt_{FeSiMn} \cdot \%C_{FeSiMn} + Mt_{Acero} \cdot \%C_{Acero} + Mt_{Antrac} \cdot \%C_{Antrac}}{100} \quad (2.19)$$

$$[mC_{Entra}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

Mt_{FeSiMn} : Masa total de FeSiMn añadida en HC; Kg.

$\%C_{FeSiMn}$: Contenido de “C” en el FeSiMn añadido; %.

Mt_{Acero} : Masa total de acero líquido que entra al HC; Kg.

$\%C_{Acero}$: Contenido de “C” en el acero que entra al HC; %.

$Mt_{Antrac.}$: Masa total de antracita añadida durante el ajuste en HC; Kg.

$\%C_{Antrac.}$: Contenido de “C” en la antracita; %.

2.3 Cálculo de la cantidad de oxígeno que se elimina y la que está presente en la escoria

Partiendo del promedio de carbono contenido en el acero, en la corrida de las 50 coladas del vertido del HAE que fue de 0,111 %, se interpola este valor en el gráfico de la Figura 7 del Capítulo III y se obtiene el oxígeno disuelto en el metal (430 ppm) y el contenido de FeO en la escoria (25 %). Con estos datos se procede a determinar el total de oxígeno a eliminar del acero y de la escoria remanente luego del desescoriado en el H.C:

$$T(O_2)_{Elim.} = T(O_2)_{Cont.Metal} + T(O_2)_{Cont.Escoria} \quad (2.20)$$

donde:

$T(O_2)_{Cont. Metal}$: Contenido de oxígeno disuelto en el metal posible a eliminar; Kg.

$T(O_2)_{Cont. Escoria}$: Contenido de oxígeno posible a eliminar de la escoria químicamente combinado con el “Fe” en forma de FeO; Kg.

$$T(O_2)_{Cont.Metal} = \frac{(\%[O_2]_{Total} - \%[O_2]_{Equil.}) \cdot Q_{Met.}(Vert.)}{100} \quad (2.21)$$

$$^o[T(O_2)_{Cont.Metal}] = \frac{[\%] \cdot [Kg]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

%[O₂]Equil: Contenido de oxígeno en equilibrio en el metal que no es posible eliminar(se determina estadísticamente 0,005); %.

%[O₂]Total: Contenido de oxígeno disuelto en el metal según la relación [C] – [O]; %.

QMet.: Masa de acero líquido vertido del HAE a la cazuela; Kg.

$$T(O_2)_{Cont.Escoria} = T(O_2)_{FeO} \quad (2.22)$$

donde:

T(O₂)FeO: Contenido de oxígeno posible a eliminar de la escoria químicamente combinado con el “Fe”; Kg.

$$T(O_2)_{FeO} = \frac{(\%[FeO]_{Total(Vert)} - \%[FeO]_{Equil.}) \cdot Q_{Esc.Cazuela}}{100} \cdot \frac{MMO_2}{MMFeO} \quad (2.23)$$

$$[T(O_2)_{FeO}] = \frac{[\%] \cdot [Kg]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

%[FeO]Equil: Contenido de FeO en equilibrio en la escoria por debajo del cual no es posible eliminar (se determina estadísticamente 15); %.

%[FeO]Total.(Vert.) : Contenido de FeO en la escoria vertida del HAE según la relación [O₂] – [FeO] de la Figura 7; %.

QEsc.Cazuela: Masa de escoria que queda en la cazuela luego del desescoriado (200); Kg.

MMO₂: Masa molar del oxígeno; g/mol.

MMFeO : Masa molar del FeO; g/mol.

El próximo paso es el cálculo de los materiales (ferroaleaciones, carbón y cal) tanto para la desoxidación del metal y de la escoria (en función del oxígeno total a

eliminar que aparece en la (Tabla 7 del capítulo III) como para el ajuste del acero en el H.C

Procedimiento de los cálculos de los materiales adicionales en el HC estimados por el cliente.

Tabla 5. Datos adicionales estimados por el cliente

Composición química (%)		
C	Mn	Si
0,26-0,32	0,60-0,90	0,10-0,30

De acuerdo con los datos presentados por el cliente se procede a calcular las ferroaleaciones y la antracita con el objetivo de saber la cantidad que se debe añadir en el horno, siempre y cuando cumpliendo con la marca establecida.

Determinación del FeSiMn a adicionar en el H.C:

$$TFeSiMn = (TMnNec.Marca - TMn(Vert)) \cdot \frac{100}{\%Mn_{FeSiMn}} \quad (2.24)$$

$$[TFeSiMn] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

TMnNec.Marca : Masa total de “Mn” que se necesita para el ajuste del metal vertido del HAE; Kg.

%Mn_{FeSiMn}: Contenido de “Mn” en el FeSiMn; %.

$$TMnNec.Marca = \frac{(\%Mn_{Marca} - \%Mn_{Vert}) \cdot QMet.(Vert)}{100} \quad (2.25)$$

$$[TMnNec.Marca] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$\%Mn_{\text{Marca}}$: Contenido de “Mn” requerido para el ajuste del metal a la marca especificada (tomaremos el promedio de la corrida de las 50 coladas del anexo 4); %.

$\%Mn_{\text{Vert.}}$: Contenido de “Mn” en el acero vertido del HAE; %.

Determinación del FeSi-75 a adicionar en el HC:

$$T_{\text{FeSi-75}} = (TSiNec.Marca - TSiAport.FeSiMn) \cdot \frac{100}{\%Si_{\text{FeSi-75}}} \quad (2.26)$$

$$[T_{\text{FeSi-75}}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$TSiNec.Marca$: Masa total de “Si” que se necesita para el ajuste del metal vertido del HAE; Kg.

$TSiAport.FeSiMn$: Masa total de “Si” aportado por el FeSiMn añadido en el H.C; Kg.

$TSi_{\text{FeSi-75}}$: Masa total de “Si” aportado por el FeSi-75 añadido en el H.C; Kg.

$$TSiNec.Marca = \frac{(\%Si_{\text{Marca}} - \%Si_{\text{(Vert.)}}) \cdot QMet.(Vert.)}{100} \quad (2.27)$$

$$[TSiNec.Marca] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$\%Si_{\text{Marca}}$: Contenido de “Si” requerido para el ajuste del metal a la marca especificada (tomaremos el promedio de la corrida de las 50 coladas del anexo 4); %.

$\%Si_{\text{Vert.}}$: Contenido de “Si” en el acero vertido del HAE. (Anexo 4); %.

$$TSiAport.FeSiMn = \frac{TFeSiMn \cdot \%Si_{\text{FeSiMn}}}{100} \quad (2.28)$$

$$[TSiAport.FeSiMn] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

%Si_{FeSiMn}: Contenido de “Si” en el FeSiMn; %.

Determinación de la antracita a adicionar en el HC:

$$TAntrac = \left\{ (TCNec.Marca - TCAport.FeSiMn) \cdot \frac{100}{\%C_{Antrac}} \right\} \cdot \frac{100}{Rend.C} \quad (2.29)$$

$$[TAntrac] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

TCNec.Marca: Masa total de “C” que se necesita para el ajuste del metal vertido del HAE; Kg.

TCAport.FeSiMn: Masa total de “C” aportado por el FeSiMn añadido en el H.C; Kg.

%C_{Antrac}: Contenido de “C” en la antracita; %.

Rend.C. : Rendimiento del “C” (se determina estadísticamente, 95); %.

$$TCNec.Marca = \frac{(\%C_{Marca} - \%C_{(Vert.)} \cdot QMet.(Vert.))}{100} \quad (2.30)$$

$$[TCNec.Marca] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

%Si_{Marca}: Contenido de “C” requerido para el ajuste del metal a la marca especificada (tomaremos el promedio de la corrida de las 50 coladas del anexo 4); %.

%Si_{Vert.}: Contenido de “C” en el acero vertido del HAE; %.

$$TCA_{port.FeSiMn} = \frac{T_{FeSiMn} \cdot \%C_{FeSiMn}}{100} \quad (2.31)$$

$$[TCA_{port.FeSiMn}] = \frac{[Kg] \cdot [\%]}{[\%]} = [Kg]$$

donde:

$\%C_{FeSiMn}$: Contenido de “C” en el FeSiMn; %.

CONCLUSINES PARCIALES DEL CAPÍTULO II

- El sistema de análisis de los diferentes materiales y productos están respaldados por un equipamiento de alta tecnología, instalado en un laboratorio certificado por la norma NC ISO 17025 y un sistema integrado de gestión; lo que respalda la confiabilidad de los diferentes resultados.
- La metodología de cálculo utilizadas en las diferentes etapas de los procesos desarrolladas en el HAE y HC están avaladas por los resultados obtenidos en la Planta ACINOX- Las Tunas, en cuanto a calidad de sus producciones, ahorros energéticos y bajos índices de consumos, que posibilitan la obtención del acero a muy bajo costo de producción.

CAPÍTULO III

Análisis y Discusión de los resultados

La reacción más importante en el proceso de elaboración del acero (según Smirnov 1984), es la reacción de oxidación del carbono, el producto de esta reacción es el monóxido de carbono (CO). Al desprenderse una cantidad considerable de este gas, ocurre un fuerte mezclado entre el metal y la escoria, además, homogeniza la composición química del acero, la temperatura, facilita la extracción de gases (H_2 y N_2) y el desprendimiento de las inclusiones no metálicas de la masa fundida (del acero líquido).

3.1 Relación entre el contenido de oxígeno y carbono en el metal

A partir de los datos experimentales (según Kudrin; 1982) se ha establecido que en el curso de la reacción de descarbonación el contenido de [C] determina ante todo la concentración de [O]. En el contenido de oxígeno cierta influencia también ejerce la actividad de los óxidos ferrosos en la escoria, la temperatura del metal. Sin embargo, en los momentos de la fusión en los que el baño está en ebullición la reacción $[C] + [O] \rightarrow CO(g)$, transcurre de modo intensivo, el grado de oxidación del metal se determina por el contenido de carbono (Figura 6). Puesto que la subida de la temperatura del baño hace aumentar la velocidad de oxidación del carbono, en los períodos de la ebullición el aumento de la temperatura ocasiona la disminución del grado de oxidación del metal. Elevada la temperatura también se intensifica la reacción $[C] + [FeO] \rightarrow CO_{(g)} + [Fe]$ (en el curso de esta reacción se absorbe calor), por eso, al ascender la temperatura, a las mayores velocidades de oxidación del carbono corresponderán menores valores del grado de oxidación de la escoria. La situación cambia si cesa la efervescencia del metal. La presencia de oxígeno en la fase gaseosa conducirá, al no haber ebullición, al aumento del contenido de [O] y de óxidos ferrosos en la escoria esto se debe a la atmósfera oxidante que reina dentro de los HAE y a la no presencia de [Si] en el metal

ocasionando el aumento del contenido de [O] al disminuir el [C] en el metal como se muestra en la siguiente figura.

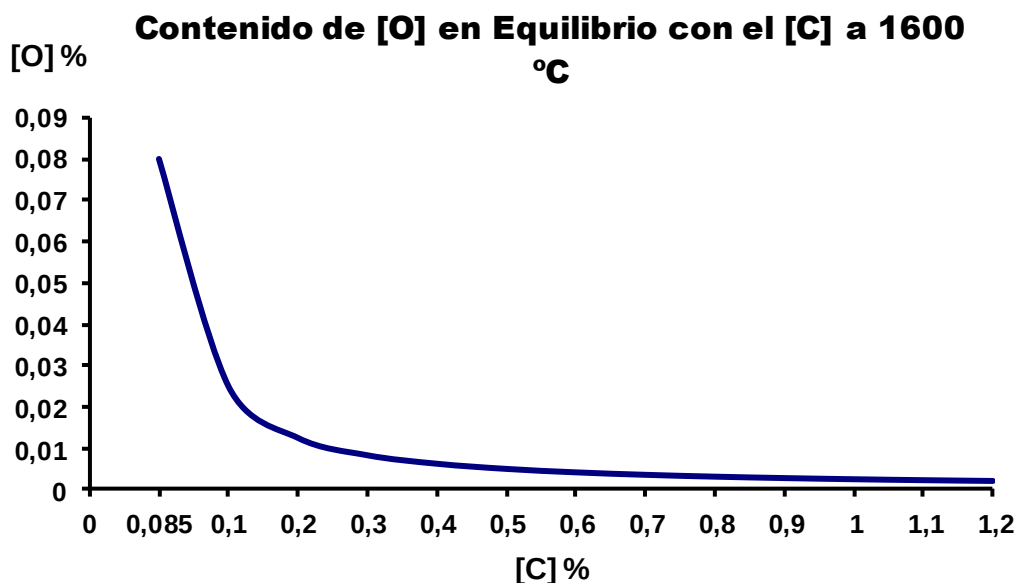


Figura 6. Relación de oxígeno con respecto al carbono

Con los resultados de O_2 disuelto en el metal y del contenido de FeO en la escoria mostrada en el anexo 2, se estableció la relación existente entre ellos antes del proceso de vertido del HAE (figura 7).

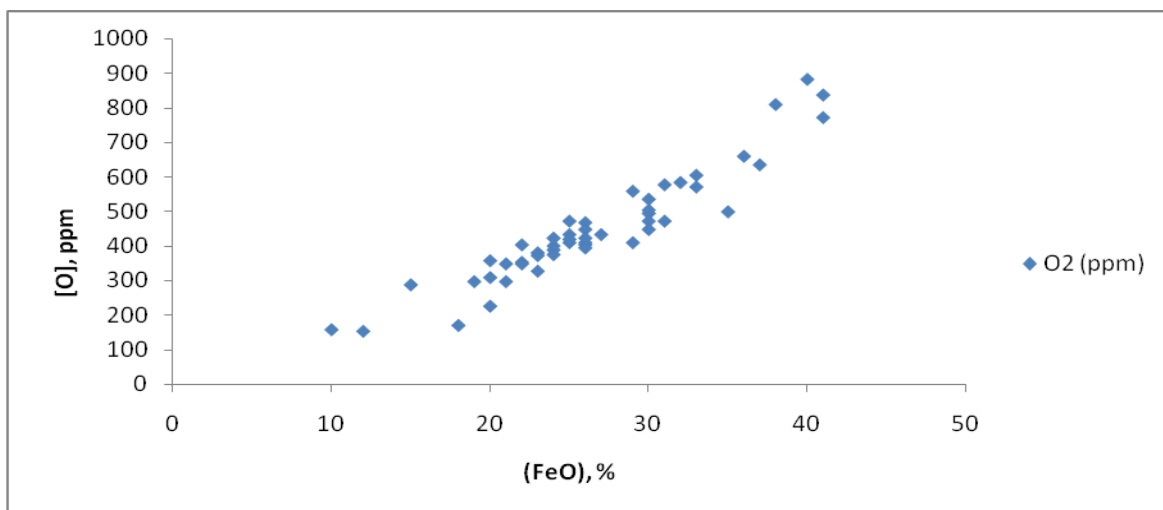


Figura 7. Relación (FeO) – [O] antes del Vertido.

En el gráfico anterior se puede observar que el porcentaje de (FeO) en la escoria oscila alrededor del 25 %. Se exhibe el nivel de oxidación típico del acero antes de ser vertido del HAE a la cazuela, obteniéndose valores de óxido de hierro en la escoria que fluctúan entre 20 – 40 % y 300 a 1 000 ppm de oxígeno en el metal, estos valores reflejan un alto nivel de oxidación.

Como consecuencia del alto grado de oxidación es de esperar valores bajos en la concentración de carbono, tal como se muestra en la figura 8. Se observan valores del carbono de vertido que oscilan entre 0,050 – 0,18 % predominando los valores por debajo de 0,15 %. Un rasgo importante de esta relación [C] – [O] es el comportamiento exponencial, de tal forma que cuando se oxida el carbono por debajo de 0,11 % el total de oxígeno aumenta de forma acelerada a valores superiores de 900 ppm.

Con los resultados de [O] disuelto en el metal y del [C] en el mismo mostrados en el anexo 2, se estableció la relación existente entre ellos antes del proceso de vertido del HAE. Esta relación se muestra en la figura 8.

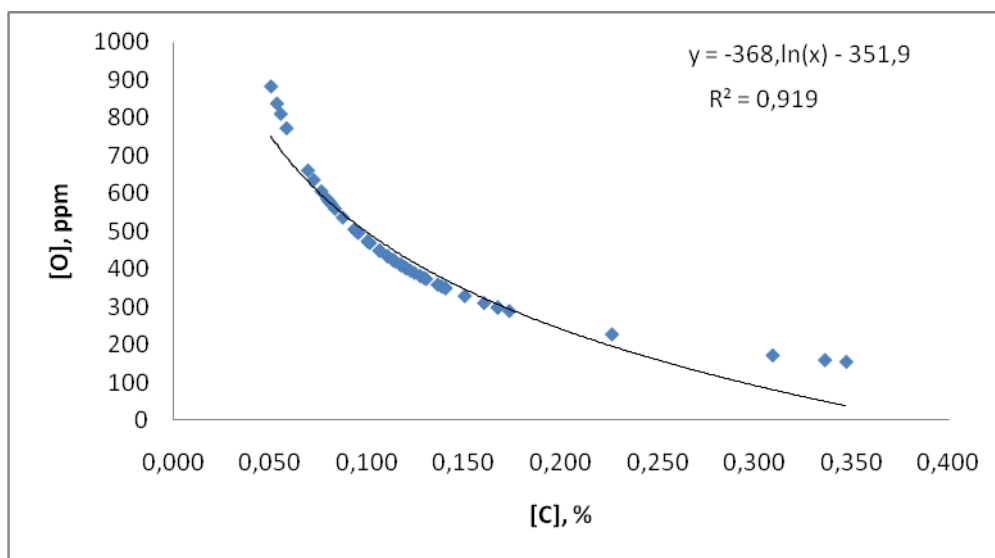


Figura 8. Relación [C] – [O] antes del vertido

Se observa como aumenta de manera brusca el contenido de oxígeno en el metal a concentraciones de carbono inferiores a 0,11 %. En dicha figura se muestra la

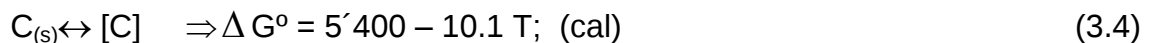
ecuación que caracteriza este comportamiento con un muy buen coeficiente de correlación R^2 .

3.2 Desoxidación del acero al carbono SAE1030 durante el vertido con carbono en sustitución de otro desoxidante

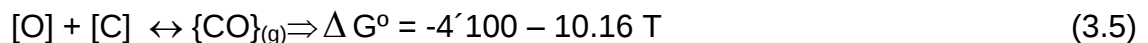
La desoxidación con este elemento presenta como atractivo principal que reduce la concentración de oxígeno soluble y no deja productos de la desoxidación en el interior del metal.

Las etapas en las que se incurre con la desoxidación con carbono son las siguientes:

- Disolución del carbono adicionado:



- Reacción de desoxidación propiamente dicha:



La constante de equilibrio de esta ecuación es la siguiente:

$$K_c = \frac{p(CO)}{[C] \times [O]} \quad (3.6)$$

La ecuación de la constante de equilibrio anterior pone de manifiesto la limitante de la desoxidación con carbono, relacionada con la presión parcial del CO. Para que la reacción sea totalmente eficiente se requiere de bajas presiones (presión de vacío), en el caso contrario su eficiencia disminuye. Bajo las condiciones presente en el proceso (en el vertido es presión atmosférica) se desoxida pero no se alcanza todo el potencial de este elemento. Por otra parte existen factores cinéticos que modifican la velocidad de la desoxidación como son la temperatura y el gradiente de concentración ($O - O_{eq}$). Como expresamos anteriormente, con el aumento de la temperatura aumenta la solubilidad del oxígeno, por tanto para una mejor desoxidación conviene operar a temperaturas bajas (inferior a los 1600°C). En la práctica real nuestra se observa que es difícil realizar la descarburación a bajas temperaturas donde la solubilidad del oxígeno es baja y el carbono en equilibrio es

alto. Por tanto desde el punto de vista de la desoxidación con carbono (que es nuestro interés), conviene verter del HAE el acero a una temperatura tal que se logre en la cazuela una temperatura inferior a los 1600°C (la menor dentro de lo posible).

La importancia sustancial del uso del carbono como pre – desoxidante consiste en aumentar la eficiencia del desoxidante final (en nuestro caso es el silicio) y en consecuencia disminuir su consumo, disminuye el tiempo total de proceso en el HC, el consumo de energía eléctrica, electrodos y refractarios. Al reducirse el consumo del desoxidante final, disminuirá el contenido de inclusiones no metálicas en el acero (nuestro caso la SiO_2) y por tanto se obtendrá un acero con un mayor grado de limpieza, una escoria menos agresiva y menor costo. Utilizar el aluminio como desoxidante principalmente causaría inclusiones no metálicas en el acero que afectarían el proceso de vaciado continuo, implementar el silicio con la formación del compuesto SiO_2 tendría que incorporar en el proceso la cal para neutralizar la acidez y entonces habría más gastos económicos.

3.3 Determinación del rendimiento del Mn, Si y C

Utilizando las ecuaciones 2.1, 2.5 y 2.8 (capítulo II) se determinó el rendimiento para el manganeso, silicio y carbono durante el vertido en HAE, (tabla 6 y figura 8).

Tabla 6. Rendimiento del Mn, Si, C

Elemento	Resultados obtenidos, %	
	Reducción con aluminio en el vertido del HAE	Reducción con carbón antracita en el vertido del HAE
Mn	50,5	52
Si	25	23
C	60	63

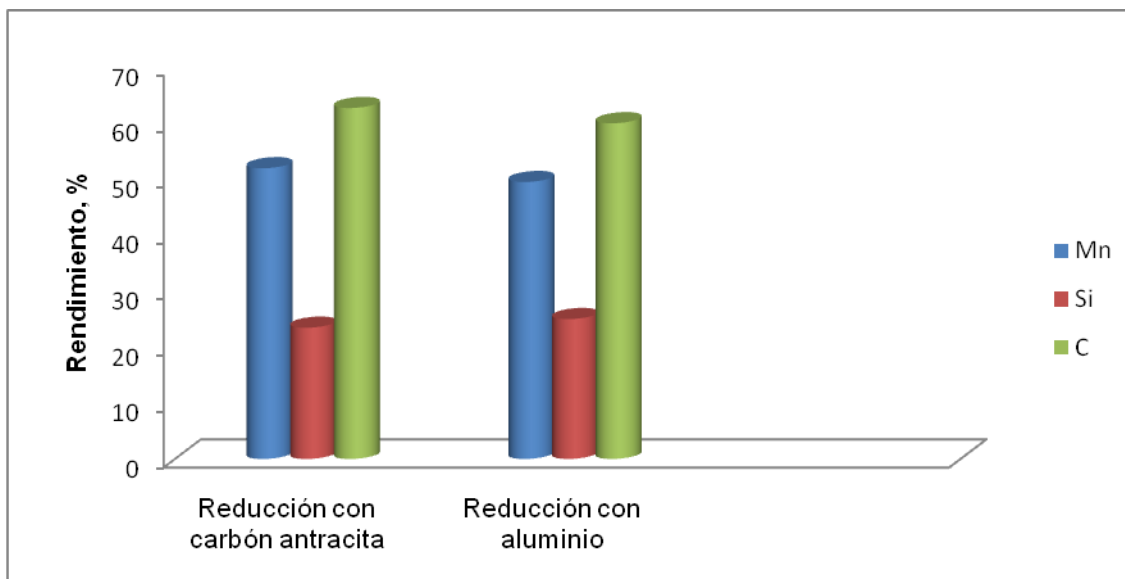


Figura 9. Representación del rendimiento del carbón y el aluminio.

De acuerdo con los cálculos presentados en la tabla 6 y graficado en la figura 9 referentes a la desoxidación durante el vertido empleando carbón antracita se observa una recuperación del 52 % del manganeso contenido en la escoria lo que da la medida de la eficiencia de este proceso, además se logra un preajuste inicial del carbón y el silicio equivalente al 63 % y 23 % respectivamente antes de su tratamiento en el horno cuchara donde se debe obtener la composición química solicitada por el cliente. Demostrando esto que los resultados obtenidos en algunos casos son similares y en otros superiores a los obtenidos con la reducción empleando aluminio durante el vertido.

En el capítulo II muestra el procedimiento de cálculo de como se elimina el oxígeno en la escoria y la que está presente en el metal reflejado en las ecuaciones de la 2.20 a la 2.23 dicho resultado se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7 Oxígeno necesario a eliminar del metal y contenido en la escoria

Distribución del oxígeno posible a eliminar (kg)		
Oxígeno Cont. Metal	Oxígeno Cont. Escoria	Oxígeno Total
25	9,4	67,3

En la Tabla 7 aparece la distribución del oxígeno tanto en el metal disuelto como en la escoria, en esta última en forma de óxido de hierro (FeO)_{Total} que es necesario eliminar para la desoxidación del metal y de la escoria remanente en la cazuela luego del desescoriado.

Ya calculado el oxígeno se procede a determinar las ferroaleaciones y el carbón antracita mostrándose en la siguiente tabla.

Tabla 8. Adiciones realizadas en el HC

Adiciones en el HC(kg)		
FeSiMn	FeSi-75	Antracita
468	89	158

En la tabla ya mencionada muestra los resultados obtenidos de las ferroaleaciones y del carbón antracita con el objetivo de saber la cantidad que se va añadir para el ajuste, está presente en las ecuaciones de 2.24 a la 2.31.

A partir de análisis realizado con el Cuantómetro (capítulo II), se obtuvo la composición química de las 50 coladas estudiadas a la salida del horno cuchara (final), la cual se corresponde con la solicitada por el cliente.

Tabla 9. Composición química de las 50 coladas

Composición del acero en las 50 coladas, %										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Al	Sn
1	0,281	0,673	0,018	0,026	0,178	0,112	0,111	0,242	0,002	0,013
2	0,283	0,692	0,010	0,031	0,194	0,082	0,120	0,252	0,002	0,017
3	0,281	0,694	0,016	0,036	0,215	0,105	0,118	0,263	0,002	0,016
4	0,273	0,716	0,013	0,025	0,186	0,115	0,108	0,268	0,002	0,016
5	0,282	0,722	0,016	0,025	0,184	0,134	0,166	0,289	0,002	0,017
6	0,289	0,699	0,014	0,023	0,200	0,101	0,114	0,302	0,002	0,021
7	0,269	0,736	0,012	0,022	0,171	0,120	0,109	0,291	0,003	0,020
8	0,291	0,724	0,014	0,016	0,174	0,084	0,119	0,324	0,002	0,021
9	0,277	0,727	0,015	0,022	0,222	0,084	0,095	0,245	0,002	0,015
10	0,280	0,721	0,009	0,021	0,177	0,069	0,082	0,180	0,002	0,011
11	0,282	0,749	0,012	0,023	0,217	0,061	0,074	0,152	0,003	0,011
12	0,290	0,706	0,007	0,018	0,186	0,048	0,073	0,159	0,003	0,011
13	0,287	0,703	0,004	0,018	0,191	0,054	0,096	0,266	0,003	0,018
14	0,297	0,698	0,010	0,024	0,190	0,068	0,098	0,253	0,003	0,014

Continuación de la tabla										
15	0,282	0,782	0,015	0,015	0,163	0,086	0,114	0,291	0,0021	0,016
16	0,300	0,718	0,009	0,027	0,197	0,090	0,127	0,281	0,002	0,014
17	0,281	0,711	0,011	0,019	0,194	0,097	0,145	0,210	0,002	0,010
18	0,273	0,680	0,006	0,023	0,182	0,073	0,125	0,256	0,002	0,014
19	0,292	0,735	0,007	0,019	0,180	0,072	0,102	0,267	0,0023	0,015
20	0,285	0,797	0,007	0,018	0,179	0,069	0,101	0,186	0,0021	0,011
21	0,283	0,750	0,012	0,020	0,193	0,123	0,109	0,234	0,003	0,013
22	0,280	0,697	0,007	0,025	0,205	0,075	0,086	0,206	0,003	0,016
23	0,277	0,668	0,010	0,022	0,224	0,086	0,138	0,301	0,0022	0,014
24	0,305	0,691	0,012	0,016	0,190	0,079	0,113	0,253	0,003	0,016
25	0,280	0,722	0,011	0,017	0,203	0,070	0,112	0,213	0,003	0,012
26	0,293	0,722	0,014	0,023	0,230	0,086	0,117	0,244	0,003	0,015
27	0,280	0,737	0,011	0,020	0,213	0,100	0,113	0,242	0,0022	0,014
28	0,293	0,713	0,007	0,018	0,187	0,084	0,165	0,235	0,002	0,017
29	0,275	0,667	0,009	0,020	0,134	0,092	0,086	0,162	0,002	0,015
30	0,285	0,689	0,007	0,017	0,172	0,065	0,098	0,187	0,002	0,015
31	0,288	0,716	0,007	0,014	0,206	0,073	0,125	0,176	0,002	0,016
32	0,291	0,704	0,007	0,023	0,213	0,064	0,147	0,294	0,003	0,017
33	0,280	0,708	0,013	0,024	0,221	0,106	0,091	0,204	0,002	0,016
34	0,290	0,727	0,007	0,015	0,223	0,080	0,083	0,193	0,002	0,014
35	0,285	0,779	0,015	0,018	0,187	0,060	0,122	0,294	0,002	0,022
36	0,285	0,715	0,011	0,018	0,189	0,078	0,113	0,260	0,003	0,018
37	0,285	0,779	0,015	0,018	0,187	0,060	0,122	0,294	0,002	0,022
38	0,291	0,753	0,016	0,013	0,174	0,081	0,111	0,221	0,002	0,017
39	0,295	0,699	0,012	0,022	0,201	0,056	0,075	0,153	0,002	0,018
40	0,297	0,765	0,010	0,022	0,190	0,059	0,119	0,166	0,002	0,013
41	0,291	0,761	0,012	0,019	0,204	0,091	0,084	0,177	0,002	0,013
42	0,279	0,712	0,006	0,017	0,189	0,076	0,106	0,243	0,003	0,015
43	0,283	0,710	0,010	0,016	0,180	0,110	0,097	0,251	0,003	0,019
44	0,291	0,731	0,013	0,022	0,188	0,095	0,083	0,235	0,002	0,020
45	0,295	0,744	0,009	0,017	0,213	0,075	0,130	0,222	0,003	0,020
46	0,286	0,697	0,010	0,016	0,169	0,109	0,155	0,327	0,002	0,015
47	0,293	0,730	0,017	0,015	0,204	0,138	0,118	0,267	0,003	0,024
48	0,290	0,751	0,008	0,020	0,190	0,076	0,159	0,283	0,003	0,018
49	0,276	0,685	0,010	0,020	0,157	0,109	0,185	0,249	0,003	0,013
50	0,290	0,713	0,009	0,022	0,217	0,130	0,153	0,243	0,002	0,014
Promedio	0,286	0,720	0,011	0,020	0,193	0,086	0,114	0,240	0,003	0,016

Si se comparan los valores obtenidos en la tabla anterior con la composición química promedio del acero SAE 1030 y los de la muestra patrón mostrados en el capítulo II se observa que el contenido de los elementos en las 50 coladas están en el rango que se desea obtener y se corresponden con los de la muestra patrón, esto evidencia que al emplear el carbón antracita pueden obtenerse valores similares que con el empleo del aluminio como desoxidante, por lo que se puede afirmar que el uso del carbón antracita es efectivo para desoxidar el acero SAE 1030, disminuyendo el tiempo de proceso y el índice de consumo tanto energía eléctrica como de electrodos y refractarios y aumentando el rendimiento de los elementos aleantes.

3.4 Valoración económica

A continuación se analiza el efecto económico de la sustitución del aluminio como desoxidante en el vertido por el carbón antracita para lo cual se define el índice de consumo empleado de cada desoxidante y se tuvo en cuenta su precio en el mercado. Los resultados de los cálculos se muestran a continuación.

Tabla 10. Efecto económico de la desoxidación en el vertido empleando carbón antracita para el acero marca SAE 1030 comparado con el empleo de aluminio.

Desoxidantes empleados				Efecto Económico
Carbón		Aluminio		
kg/t	cuc/t	kg/t	cuc/t	cuc/t
2,56	1,33	1,67	4,33	3

La tabla anterior refleja que por cada tonelada de acero empleando como desoxidante en sustitución por el aluminio genera un efecto económico 3 cuc/t.

Tabla 11. Resultados económicos para la producción de 200 coladas, equivalen a 12 000 t/año de acero SAE 1030.

Descripción	cuc/t	Precio (cuc/t)	cuc/año
Carbón	1,33	522,48	15 960
Aluminio	4,33	2 598,75	51 960
Efecto económico	3	-	36 000

La tabla 11 refleja que para una producción de 12 000 toneladas de acero al año de SAE 1030 (esta es la producción media anual realizada en Acinox) empleando como desoxidante el carbón antracita en sustitución del aluminio genera un efecto económico 36 000 cuc/t.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III

- Se demostró que empleando el carbón antracita como desoxidante en el vertido del acero del horno de arco eléctrico a la cazuela es eficiente desde el punto de vista tecnológico y económico.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se demostró la viabilidad tecnológica y económica de la sustitución del aluminio como desoxidante en el vertido del horno de arco eléctrico por el carbón antracita lo cual se demuestra con los resultados obtenidos referentes a la recuperación del manganeso de la escoria y el porcentaje del preajuste del carbón y el silicio en el acero líquido siendo de 52 %, 62 % y 23 % respectivamente.
2. Se demostró que para una producción de 12 000 toneladas de acero al año de SAE 1030 empleando como desoxidante el carbón antracita en sustitución del aluminio genera un efecto económico 36 000 cuc/t.

Recomendaciones

Continuar evaluando en próximos temas de investigación la tecnología de desoxidación en el vertido con carbón antracita en aras de caracterizar con mayor precisión los parámetros tecnológicos que definen esta etapa del proceso con el objetivo de minimizar en lo posible las desventajas del empleo de este desoxidante en el vertido del horno de arco eléctrico

Bibliografía

1. Botella, J, & Sánchez, R. (1998). Efecto del contenido de azufre y del grado de desoxidación sobre la ductilidad en caliente de aceros inoxidables austeníticos resulfurados en estado de solidificación. Revista de Metalurgia, 34 (Extra).195-198.
2. Contreras. I, G. (2012) Mejoras en el proceso de desoxidación de acero en el horno de inducción.
3. Carreño, V., Cabrera, J. M., Morales, R. D., Romero, A., & Fernández, M. (1998). Simulación de la precipitación de inclusiones en diferentes etapas del procesamiento del acero líquido. Revista de Metalurgia, 34(Extra), 151-157.
4. Carbón Antracita. <https://www.garciamunte.com>
5. Características químicas del carbón antracita. <https://www.ecured.cu>
6. Emilio Jimeno. P. Molera. En Metalurgia General
7. Enriquez, J. L.; Tremps, E. 2007. Monografías sobre tecnología
8. Estupiñan, H., & Vásquez, J. (2006). Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia. Revista Facultad de Ingeniería, (37), 31-40.
9. Fabricación y procesamiento del acero
(<https://metfusion.wordpress.com/2013/10/14/>)
10. Fernández, J.; Lasheras, J.M. 1991. Ciencia de materiales. San Sebastián: Editorial Donostiarra, S.A.
11. Gómez, P., (2009).Desoxidación con fundidos de hierro.Revista Facultad de Ingeniería,(48), 44-50.
12. Gualda I. Mejoras en el proceso de desoxidación de acero en horno de inducción. Tesis de grado. 2012.
13. Generalidades del carbón(<https://es.scribd.com>)
14. Kudrin, V. 1981: Metalurgia del acero. Mir, Moscú
15. Malishev A. y col. Tecnología de los Metales. Edit. MIR. Moscú. 1987

16. Meléndez Valencia, E, Rocha Rangel, E (2006). Aceración.
17. M. Nadif, M. Burty, H Souldard, Arcelor, Francia. 1990. Control de la reoxidación del acero y cierre de buzas en colada continua”
18. Osuna Arrieta, A. (2014). Método experimental para la determinación de la difusión de carbono en aceros de baja aleación en rangos industriales de composición (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León)
19. Ortiz-Bárcenas, J., Llópiz-Yurell, J. C. (2014). Regularidades cinéticas de la reducción carbotérmica de la laterita ferruginosa del yacimiento Mina Martí, Nicaro. Minería, Geología, 30(2), 87-92.
20. Portilla Carrera, M, E. (2012). Elaboración de un procedimiento para fundir acero de medio carbono en el horno de inducción para el laboratorio de fundición (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2012).
21. Putan, A, V, Heput, T, Socalici, A. (2013). Tratamiento del acero con escorias sintéticas de calcio y aluminio con óxido de titanio añadido. Revista de Metalurgia, 49(1). 31-44.
22. Rangel, E., R. Valencia, E., M., . (2009). Aceración.
23. Rocha E. 2009. Influencia de la desoxidación en el acero
24. Siderca, T., Simini, J. Desarrollo de un modelo para predecir el equilibrio acero-inclusiones en el sistema $Al_2O_3-SiO_2-MnO$. C. Cicutti (y C. Capurro.)
25. Smirnov, N. & Fanjul, A. 1984: Producción de acero. Pueblo y Educación, La Habana.
26. Tecnología limpia del carbón
www.fisicanet.com.ar/energias/carbones/en01_carbon.ph
27. Uza J. & Landauro A. 2007. Optimización del proceso de desoxidación y mejora de la calidad superficial en los aceros calidad 1008A2 de la corporación aceros Arequipa (tesis Argentina/2007)
28. Voskoboinikov, V.G; 1982. Metalurgia
29. Krestóvnikov, Vigdróvich. Variación de la energía libre.
30. Las empresas siderúrgicas más grandes del mundo
(<http://infoacero.camacero.org/>)

Anexos

Anexo 1y 2 fotos del carbón antracita



Anexo 3

Tabla 1. Estadísticas de la corrida de 50 coladas realizadas antes del vertido del HAE

#	Ac Líq (Kg)	Peso de Esc (Kg)	% C	O2 (ppm)	FeO %	Temp Vertido
1	65230	410	0,17	288	15	1597
2	63460	395	0,09	500	35	1595
3	70770	450	0,10	473	25	1654
4	58450	295	0,34	159	10	1611
5	73120	310	0,07	660	36	1612
6	68410	325	0,12	410	26	1604
7	60820	415	0,15	328	23	1604
8	58740	510	0,06	810	38	1635
9	55220	475	0,11	434	27	1621
10	58450	390	0,10	495	30	1613
11	68610	315	0,07	635	37	1613
12	58810	475	0,08	584	32	1601
13	61670	395	0,08	605	33	1615
14	62780	425	0,06	772	41	1624
15	55510	400	0,05	882	40	1640
16	61670	512	0,12	404	26	1545
17	59530	368	0,12	410	25	1616
18	65190	425	0,09	504	30	1611

Continuación de la tabla						
19	59530	375	0,10	468	26	1606
20	62020	290	0,12	401	24	1604
21	58440	325	0,11	448	26	1618
22	56830	385	0,11	434	25	1630
23	63750	411	0,08	578	31	1576
24	53880	385	0,10	473	30	1611
25	56830	295	0,14	354	22	1613
26	57790	435	0,23	227	20	1613
27	68410	415	0,13	381	23	1610
28	60060	401	0,11	448	30	1625
29	61150	375	0,08	559	29	1637
30	66820	290	0,16	309	20	1630
31	60060	325	0,35	154	12	1609
32	64910	465	0,05	837	41	1602
33	69020	415	0,14	358	20	1612
34	69470	365	0,12	404	22	1627
35	58730	282	0,08	571	33	1607
36	64910	415	0,11	420	25	1623
37	67930	285	0,10	473	31	1604
38	55510	475	0,09	536	30	1617
39	64900	385	0,12	410	29	1590
40	63420	425	0,12	389	24	1645
41	61960	365	0,13	376	24	1614
42	68160	379	0,13	373	23	1617
43	66220	295	0,12	395	26	1631
44	68410	360	0,31	171	18	1615
45	64950	402	0,17	298	21	1609
46	61990	460	0,14	349	22	1599
47	70030	388	0,11	423	26	1606
48	58800	525	0,17	298	19	1609
49	55520	392	0,14	349	21	1599
50	64050	298	0,11	423	24	1606
Promedio	62618	387	0,1	449	27	1613

Anexo 4

Tabla 2. Composición Química en las diferentes etapas durante la desoxidación con carbono

#	Fin del HAE(%)			Inicio del HC (%)			Fin del HC (%)		
	Mn	Si	C	Mn	Si	C	Mn	Si	C
1	0,095	0,025	0,173	0,630	0,130	0,160	0,673	0,178	0,281
2	0,071	0,010	0,094	0,590	0,080	0,160	0,692	0,194	0,283
3	0,082	0,015	0,100	0,550	0,070	0,170	0,694	0,215	0,281
4	0,148	0,021	0,336	0,670	0,110	0,260	0,716	0,186	0,273
5	0,088	0,002	0,069	0,490	0,090	0,120	0,722	0,184	0,282
6	0,056	0,015	0,117	0,610	0,110	0,170	0,699	0,200	0,289
7	0,097	0,013	0,150	0,670	0,100	0,220	0,736	0,171	0,269
8	0,032	0,005	0,055	0,551	0,009	0,113	0,724	0,174	0,291
9	0,059	0,010	0,110	0,466	0,120	0,174	0,727	0,222	0,277
10	0,053	0,006	0,095	0,600	0,098	0,179	0,721	0,177	0,280
11	0,077	0,008	0,072	0,570	0,089	0,120	0,749	0,217	0,282
12	0,061	0,001	0,079	0,360	0,041	0,190	0,706	0,186	0,290
13	0,058	0,001	0,076	0,350	0,061	0,090	0,703	0,191	0,287
14	0,047	0,002	0,058	0,454	0,074	0,111	0,698	0,190	0,297
15	0,047	0,003	0,050	0,461	0,065	0,050	0,782	0,163	0,282
16	0,067	0,009	0,119	0,531	0,073	0,138	0,718	0,197	0,300
17	0,114	0,004	0,117	0,724	0,117	0,220	0,711	0,194	0,281
18	0,084	0,003	0,093	0,630	0,155	0,152	0,680	0,182	0,273
19	0,128	0,006	0,101	0,697	0,172	0,185	0,735	0,180	0,292
20	0,368	0,013	0,120	0,153	0,002	0,074	0,797	0,179	0,285
21	0,112	0,004	0,106	0,675	0,098	0,160	0,750	0,193	0,283
22	0,099	0,006	0,109	0,156	0,110	0,176	0,697	0,205	0,280
23	0,060	0,006	0,110	0,564	0,184	0,135	0,668	0,224	0,277
24	0,070	0,004	0,080	0,500	0,070	0,068	0,691	0,190	0,305
25	0,080	0,006	0,110	0,643	0,092	0,170	0,722	0,203	0,280
26	0,080	0,002	0,080	0,084	0,002	0,120	0,722	0,230	0,293
27	0,093	0,006	0,100	0,572	0,110	0,146	0,737	0,213	0,280
28	0,105	0,007	0,138	0,670	0,110	0,283	0,713	0,187	0,293
29	0,238	0,002	0,226	0,580	0,079	0,139	0,667	0,134	0,275
30	0,093	0,009	0,127	0,592	0,111	0,160	0,689	0,172	0,285
31	0,087	0,003	0,106	0,450	0,110	0,110	0,716	0,206	0,288
32	0,109	0,002	0,083	0,541	0,088	0,199	0,704	0,213	0,291
34	0,246	0,006	0,347	0,662	0,101	0,225	0,727	0,223	0,290

Continuación de la tabla									
35	0,035	0,004	0,035	0,350	0,085	0,114	0,779	0,187	0,285
36	0,083	0,006	0,083	0,610	0,110	0,132	0,715	0,189	0,285
37	0,086	0,010	0,086	0,555	0,100	0,103	0,779	0,187	0,285
38	0,092	0,001	0,092	0,540	0,084	0,142	0,753	0,174	0,291
39	0,084	0,008	0,084	0,440	0,054	0,071	0,699	0,201	0,295
40	0,088	0,003	0,088	0,562	0,100	0,159	0,765	0,190	0,297
41	0,068	0,004	0,068	0,491	0,073	0,180	0,761	0,204	0,291
42	0,128	0,011	0,128	0,655	0,106	0,291	0,712	0,189	0,279
43	0,099	0,011	0,099	0,624	0,092	0,204	0,710	0,180	0,283
44	0,122	0,007	0,122	0,570	0,063	0,240	0,731	0,188	0,291
45	0,086	0,010	0,086	0,610	0,111	0,170	0,744	0,213	0,295
46	0,093	0,011	0,093	0,650	0,120	0,185	0,697	0,169	0,286
47	0,152	0,003	0,152	0,500	0,068	0,283	0,730	0,204	0,293
48	0,105	0,004	0,105	0,741	0,140	0,286	0,751	0,190	0,290
49	0,088	0,012	0,088	0,670	0,095	0,180	0,685	0,157	0,276
50	0,094	0,005	0,094	0,592	0,097	0,140	0,713	0,217	0,290
Promedio	0,099	0,007	0,111	0,546	0,092	0,164	0,720	0,193	0,286

Anexo 5

Tabla 3. Adiciones al acero durante el vertido y en el HC

#	Ac.- FHC,HAE	Adiciones en Vertido (kg)		Adiciones en HC (kg)			
	(kg)	FeSiMn	C III	FeSiMn	FeSi-75	Antracita	Cal
1	65230	537	0	0	124	120	700
2	63460	525	80	0	180	150	700
3	70770	516	240	50	140	140	700
4	58450	501	0	40	130	30	800
5	73120	507	80	120	190	190	700
6	68410	501	60	0	100	100	700
7	60820	503	60	50	150	130	700
8	58740	504	60	60	100	75	700
9	55220	521	60	60	120	95	700
10	58450	515	60	100	110	90	700
11	68610	528	60	60	160	170	700
12	58810	250	100	500	124	50	700
13	61670	517	20	160	120	50	700
14	62780	459	100	190	130	25	700
15	55510	506	20	70	190	50	900
16	61670	513	60	80	150	75	700
17	59530	541	120	0	100	50	700
18	65190	519	60	60	150	110	700
19	59530	526	60	20	150	80	700
20	62020	480	120	0	176	205	800
21	58440	500	40	500	158	129	850
22	56830	509	40	509	150	118	800
23	63750	401	0	401	130	142	800
24	53880	411	0	411	160	185	700
25	56830	448	0	448	170	120	700
26	57790	0	0	538	110	90	600
27	68410	505	60	0	100	155	700
28	60060	524	20	60	130	60	700
29	61150	500	0	0	180	100	700
30	66820	515	40	140	130	116	700
31	60060	418	0	200	65	166	700

Continuación de la tabla							
32	64910	411	140	180	100	90	650
33	69020	400	0	0	120	116	650
34	69470	421	0	40	140	90	700
35	58730	419	60	150	250	195	700
36	64910	512	100	70	130	165	800
37	67930	525	100	30	200	200	700
38	55510	528	120	40	180	216	1000
39	64900	510	0	180	220	360	600
40	63420	512	0	170	170	120	1000
41	61960	505	100	120	130	140	700
42	68160	520	0	40	124	8	700
43	66220	444	80	40	115	110	800
44	68410	420	120	90	190	50	700
45	64950	511	120	90	150	160	701
46	61990	510	80	36	105	112	700
47	70030	418	0	260	150	0	800
48	58800	465	0	0	105	0	700
49	55520	418	40	20	154	100	600
50	64050	406	60	90	130	140	700
Promedio	62618	471,1	54,8	129,46	142,8	114,76	725