



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

*Facultad: Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia-Química*

*Tesis en opción al Título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales*

*Utilización del Nitrógeno para la
producción de aceros FEE 500 en la
Empresa “ACINOX - Las Tunas”.*

Diplomante: Yoisel Osvaldo Fernández Licea.



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

*Utilización del Nitrógeno para la
producción de aceros FEE 500 en la
Empresa “ACINOX - Las Tunas”.*

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

Diplomante: Yoisel Osvaldo Fernández Licea. _____ Firma

Tutor: Ing. Salder Sánchez Echavarría. _____ Firma

Ing. José Antonio Ramírez Torres. _____ Firma

*Moa
2017*

Pensamiento

“La ciencia está en conocer la oportunidad y aprovecharla, en hacer lo que conviene a nuestro pueblo con sacrificio de nuestras personas; y no en hacer lo que conviene a nuestras personas con sacrificio de nuestro pueblo.”

José Martí

Declaración de Autoridad

Yo: Yoisel Osvaldo Fernández Licea, autor de este trabajo de Diploma declaro la propiedad intelectual del mismo a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo cuando estime conveniente.

Para que así conste firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del _____.

Firma del Autor

Firma del Tutor

Agradecimientos

Por haber logrado llegar hasta aquí debo darle las gracias a...

- *Mis padres Noris Licea y Osvaldo Fernández, a mi hermana Yeline y mis sobrinos Melisa, Manuel y Marlon por su amor, confianza y apoyo incondicional durante estos cinco años de trabajo y sacrificio...*
- *A mi tía Nancy Licea que siempre me supo ayudar sin esperar nada a cambio y sin ella no estuviese hoy donde estoy.*
- *A mi futura Esposa Teresa y madre de mis hijos, a mis suegros Iris y Erlin que de una forma u otra me han dado su apoyo en todo momento para que yo pudiera alcanzar mi meta y cumplir este sueño.*
- *A todos los amigos que conocí durante todo el período en especial a Salder quien después de haber sido compañero de cuarto fue mi tutor, a todos esos quienes siempre estuvieron allí para apoyarme aun cuando las cosas me parecían difíciles...*
- *A todo el claustro de profesores que tuvieron la gentileza de formar durante estos cinco años de estudio al profesional que soy...*

- *A todos los trabajadores de la empresa de ACINOX Las Tunas que supieron tirarme un cabo en mi trabajo de diploma en especial a José Ramírez quien fue mi motor de arranque.*
- *A Dios por permitirme haber tenido todos estos momentos buenos a lo largo de mi vida.*
- *En general a todas esas personas que siempre confiaron en mí y de una u otra forma me ayudaron en mi recorrido como estudiante.*

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a...

- *Primeramente a mi padre Osvaldo y a mi tía Nancy que fueron el motor de arranque en esta etapa tan importante en mi vida, de no ser por ellos no hubiese llegado a ser esa persona que soy hoy.*
- *Para mi mamá Noris, mis suegros Iris y Erlin, mi pareja Teresa por el cariño y apoyo que me ofrecieron durante toda la etapa de estudios, no sólo en la universidad sino también durante toda mi etapa de joven...*
- *A mi futuro hijo que viene en camino y mis sobrinos para que un día lleguen a donde yo logré llegar y que sepan que en la vida con un poco de esfuerzo y confianza todo se puede lograr.*
- *A toda mi familia, quienes se preocuparon por cada detalle de mi vida y me dieron la seguridad que necesitaba para lograr esta meta.*

Resumen

Resumen

El propósito de esta investigación fue determinar el tiempo de agitación con nitrógeno del acero FEE 500. Para desempeñar este trabajo se procedió a efectuar pruebas de agitación en el horno de cuchara para 21 coladas, las cuales se realizaron en tres etapas de insuflación. Primero se comenzó con argón durante el vertido hasta comenzar el proceso en horno de cuchara donde la agitación fue con nitrógeno; por último para realizar la desulfuración y terminar el proceso se utilizó argón, lográndose así una gran decantación de gases. Los tiempos de variación del insuflado con nitrógeno fueron 10; 20; 30; 40; 50 y 60 minutos, mientras que las muestras se realizaron luego de cada etapa de insuflación por cada colada. Se determinaron los factores que influyeron en el comportamiento del contenido de nitrógeno en el acero, siendo estos, el tiempo de insuflado con nitrógeno, la atmósfera, la chatarra, el carbón, oxígeno y el argón. Luego de realizadas las experimentaciones se llegó a la conclusión que el tiempo máximo de insuflado con nitrógeno para estos tipos de aceros es de 40 minutos. Se demostró mediante pruebas de composición química, que el acero FEE 500 cumple con la norma exigida por el cliente.

Palabras claves.

Nitrógeno, Argón, Horno de Cuchara, Agitación.

Abstract

Abstract

The purpose of this research was to determine the nitrogen stirring time of the FEE 500 steel. To perform this work, stirring tests were carried out in the ladle furnace for 21 castings, which were carried out in three stages of insufflation. First it was started with argon during the pouring until beginning the process in spoon oven where the agitation was with nitrogen; finally to perform the desulfurization and to finish the process was used argon, achieving thus a great decantation of gases. The times of variation of the inflation with nitrogen were 10; twenty; 30; 40; 50 and 60 minutes, while the samples were made after each inflation step for each cast. The factors that influenced the behavior of the nitrogen content in the steel were determined, these being the insufflation time with nitrogen, atmosphere, scrap, coal, oxygen and argon. After the experiments were carried out, it was concluded that the maximum time of inflating with nitrogen for these types of steels is 40 minutes. It was demonstrated by tests of chemical composition, that the FEE 500 steel meets the norm demanded by the customer.

Key Words.

Nitrogen, Argon, Ladle Furnace, Stirring.

Índice

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	7
1.2 Metalurgia Secundaria.	7
1.3 Proceso de Agitación con Argón en Horno de Cuchara.....	9
1.3.1 Presión de insuflado de gas.....	12
1.3.2 Funciones y propiedades del argón como gas de agitación.	13
1.4 Proceso de Agitación con Nitrógeno en Horno de Cuchara.....	14
1.4.1 Antecedente del Insuflado con Nitrógeno en Hornos de Cuchara.	15
1.4.2 El nitrógeno en los aceros.	17
1.4.2.1 Solubilidad del Nitrógeno en el Acero.	20
1.4.3 Efecto del Nitrógeno en las Propiedades del Acero.....	21
1.4.4 Eliminación del Nitrógeno en el Acero.	22
Conclusiones del Capítulo.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1 Descripción del proceso tecnológico para la elaboración del acero.....	25
2.1.2 Horno de Arco Eléctrico (HAE).	26
2.1.3. Horno de Cuchara.....	28
2.1.4 Ajuste y Afino del acero en el proceso de Horno de Cuchara (HC).	33
2.1.5 Proceso de Vaciado del acero (IVC).....	35
2.2 Diseño de experimento	37
2.2.1 Realización de la toma de muestra y temperatura.....	38
2.2.2 Recepción, preparación e identificación de las muestras.	41
2.2.3 Realización de los análisis al acero.	42

2.3 Materiales utilizados.....	46
Conclusiones del Capítulo.....	49
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	50
3.1 Resultado del insuflado con Nitrógeno en el HC para la producción del acero FEE 500 en la empresa ACINOX Las Tunas.	50
3.1.1 Evaluación del comportamiento del Nitrógeno en el HAE.....	50
3.1.2 Ajuste del acero líquido durante el vertido y en HC.	56
3.1.3 Evaluación del comportamiento del nitrógeno en HC e IVC.	56
3.2 Valoración económica.....	67
Conclusiones del Capítulo.....	71
CONCLUSIONES GENERALES	72
RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFIA	74
ANEXOS	77

INTRODUCCIÓN

A lo largo del transcurrir del tiempo las necesidades del mundo actual exige al hombre la búsqueda del perfeccionamiento de las tecnologías utilizadas para la producción de metales y aleaciones, de tal forma que las mismas sean producidas de la manera más rápida, económica, que mantenga la calidad requerida y que en su mayoría sean procesos continuos.

El desarrollo de todos los países dependen de la producción de sus industrias y estas están ligadas íntimamente a la capacidad de respuesta de la industria metalúrgica con relación al suministro de reposiciones metálicas y a la producción de piezas de acero. El acero constituye el material más importante en el desarrollo industrial actual y futuro del mundo, teniendo enorme significado en la economía de cualquier país. El nivel de desarrollo económico de uno u otro estado se determina por la capacidad de producción de acero, puesto que este tiene gran influencia en el desarrollo de las demás ramas industriales y de construcción (Kudrin, 1981).

Las propiedades del acero más importantes son la conformabilidad y durabilidad, resistencia a la tracción y su buena resistencia a la fluencia, buena conductividad térmica, y para el caso de los aceros inoxidable, la fuerte resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas del acero pueden ser cuidadosamente controladas a través de la composición química y del tratamiento térmico que se le aplique, que conducen a su micro estructura final; siendo necesario realizarle diferentes ensayos para garantizar el cumplimiento de las normas.

Los procesos siderúrgicos pueden partir de mineral o de chatarra. El siglo XIX vio un fuerte desarrollo de la siderurgia integral, que posibilitó la fabricación masiva de objetos y equipos de acero. El envejecimiento y desguace de los mismos generó grandes cantidades de chatarra, cuyo reciclado se convirtió en necesidad apremiante por razones económicas y ecológicas.

La vía más utilizada, consiste en fundir la chatarra en horno de arco eléctrico. Los Hornos de Arco Eléctrico (HAE) como su nombre lo indica, funcionan con el calor que desprende un arco eléctrico.

El acero líquido obtenido se pasa al horno de cuchara a lo que se ha llamado "Metalurgia Secundaria" o "en cuchara" donde además de ajustar su composición y temperatura se mejora extraordinariamente su calidad.

La Metalurgia Secundaria se lleva a cabo en equipos diversos, tales como cucharas, convertidores u hornos especiales. Según el objeto que tratan de conseguir se clasifican en:

1. Tratamiento de desgasificación: El acero contiene elementos perjudiciales que deben eliminarse. Entre éstos están los gases disueltos durante el proceso de fabricación; Hidrógeno; Oxígeno; Nitrógeno. Para reducir el tamaño al máximo del contenido de estos gases, en especial el Hidrógeno, se somete al acero líquido al vacío, según distintos procesos.

2. Tratamiento de afinado de los aceros inoxidables: La chatarra se funde en un HAE, después de colada la cuchara con el acero fundido en la cámara y hecho el vacío, se inyecta oxígeno con una lanza situada en la parte superior, que elimina el carbono con un mínimo de oxidación metálica. Al mismo tiempo, se pasa Argón o Nitrógeno a través de un tapón poroso situado en el fondo de la cuchara, para homogeneizar la masa del acero líquido.

3. Tratamiento de homogeneización por barboteo: Consiste en la agitación del baño mediante la inyección de un gas inerte, generalmente Argón o Nitrógeno, a través del fondo de la cuchara o por una lanza.

4. Tratamientos de desulfuración y desoxidación: Los productos más frecuentes para insuflar son el (SILICIO-CALCIO) "Si-Ca" y diversas escorias sintéticas. La agitación del acero por el paso del gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza.

5. Tratamientos de afino con calentamiento de acero en cuchara: Por este proceso pueden conseguirse aceros con muy bajo contenido de azufre y gases, muy limpios y con control de la morfología de las inclusiones. También se consigue excelente control de la composición y la temperatura. Las cucharas se montan con tampones porosos por los que se inyecta Argón o Nitrógeno. Una vez obtenido el grado de desulfuración deseado se añaden las ferroaleaciones requeridas obteniéndose el acero programado.

En los procesos relacionados con la producción de acero, la inyección de gas inerte (Ar ó N₂) se usa en varias de las etapas de refinamiento para, entre otras cosas, incrementar la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar, remover partículas y eliminar gradientes térmicos.

Según la Asociación Mundial del Acero (AMA), la producción del acero es la segunda más grande a nivel mundial, estimando que para el 2050 su uso aumente 1.5 veces más de lo actual. En 2014, la producción global de acero fue de 1,665 millones de toneladas (Mt) con un crecimiento de 3.8 % durante el período del 2010-2014. En 2014, el mayor productor de acero fue encabezado principalmente China con 46.2 %, seguido de 15.0 % por otros países asiáticos, 9.5 % de la Unión Europea y 9.4 % países NAFTA (México, EE.UU. y Canadá). En un panorama comercial a nivel mundial, los principales exportadores de acero en 2014 por volumen productivo fueron China, Japón, Corea del Sur y Rusia, exportando principalmente lingotes, materiales de acero semiacabados, material de vías de ferrocarril y barras de refuerzo de hormigón; en tanto que los principales importadores fueron EE.UU., Alemania, Corea del Sur e Italia. (Asia Business Consulting)

En nuestro país existen en este momento dos grandes productoras de aceros al carbono como son la Empresa Siderúrgica José Martí y la empresa ACINOX-Las Tunas, estas fueron creadas con el objetivo de obtener aceros tanto para la utilización en las demandas locales como en las ventas a clientes internacionales.

Los destinos de la producción son principalmente abastecer el mercado nacional, siendo vital en las obras del gobierno en la recuperación de viviendas y centros de interés social mientras que, los mercados externos principales son países de la región como Honduras, República Dominicana, entre otros.

ACINOX-Las Tunas es una miniacera que se encuentra en el municipio cabecera de Las Tunas, fundada el 15 de febrero del 1992 con el objetivo de producir aceros inoxidable en forma de planchones con destino a la exportación, mas debido a factores externos como el derrumbe del Campo Socialista, la falta de mercado para las producciones del mismo, la depresión del precio del acero inoxidable, así como de factores internos como el Período Especial, conllevó a la paralización de la planta en el año 1994. A partir del año 1995 la empresa se dio a la tarea de producir aceros de bajo, medio y alto carbono.

La nueva tarea llevo a la empresa a enfrentarse a adaptaciones del equipamiento tecnológico de aceros inoxidable a aceros al carbono, falta de capacitación técnica para la producción de aceros al carbono, falta de mercado y otros. No obstante a estas dificultades, se tomaron unas series de medidas técnico-organizativas que le permitió lograr el aumento de la productividad y disminución del costo de la tonelada de acero producida, aumento de los rendimientos de los elementos de aleación, disminución de los índices de consumos fundamentales, por ejemplo los electrodos de 300 y 500 mm, de refractario y de ferroaleaciones, la disminución del consumo de energía eléctrica. Así se dio respuesta a los planes productivos nacionales y de exportación, con grandes aportes económicos a la economía de la provincia y el país.

La empresa consta de tres eslabones productivos fundamentales: El sector de aseguramiento de la producción, que es el encargado de la recepción de todos los materiales y materias primas, así como el suministro al resto de las áreas productivas; el sector de elaboración de acero, que abarca el horno de arco eléctrico, en el ocurre la fusión de carga metálica y el horno cuchara, donde se

realiza el proceso de ajuste y afino del acero y el sector de vaciado o instalación de vaciado continuo, donde se realiza la transformación del acero líquido a sólido.

La empresa cuenta con las plantas Auxiliares como: Planta de fraccionamiento de aire, planta de tratamiento de agua y planta de cal, todos brindan servicio a la acería. Debido a la obsolescencia de los equipos auxiliares con la que cuenta la Planta de fraccionamiento de aire además de realizar una pequeña disminución económica utilizando sustituciones ha sido necesario insuflar con gases de Argón más Nitrógeno para realizar el proceso de Ajuste y Afino en Hornos de Cuchara. En ACINOX-Las Tunas se producen más de 30 marcas de aceros y entre ella el acero el FEE500 con destino al cliente extranjero Gibraltar, teniendo el mismo las siguientes exigencias de calidad por parte del cliente: (Anexo 1)

Una de las características fundamentales de este acero, es la exigencia en el por parte del cliente en lo que respecta al contenido de nitrógeno hasta los 120 ppm. Por lo que tenemos como **Situación Problemática** que:

La planta de fraccionamiento de aire presenta una limitación en la producción de Argón para la agitación del acero en el proceso de ajuste y afino de Horno Cuchara, por lo que es necesario utilizar el nitrógeno como gas de agitación.

Problema:

Necesidad de una metodología integrada para la sustitución parcial de argón por nitrógeno, para el insuflado del acero FEE500, de bajo contenido de nitrógeno y mantener la calidad del acero.

Hipótesis:

Al determinar la relación del tiempo de agitación con nitrógeno se puede obtener una metodología integrada para la sustitución parcial de argón por nitrógeno, para el insuflado del acero FEE500, de bajo contenido de nitrógeno y mantener la calidad del metal.

Objeto de la Investigación:

Agitación del Acero FEE500.

Campo de Acción:

Relación entre las interacciones físico-químicas ocurridas durante la agitación del acero FEE500 en el Horno Cuchara con el tiempo de dicha operación.

Objetivo General:

Determinar el tiempo útil de insuflado con nitrógeno que permita relacionar los diferentes factores que influyen en la concentración del gas en la aleación durante la agitación del acero FEE500; facilitando la construcción de una metodología integrada para la sustitución parcial de argón por nitrógeno en dicha operación y mantener la calidad de aleación.

Objetivos Específicos:

1. Determinar los factores que podrían ocasionar un alto contenido de nitrógeno en el acero FEE500.
2. Valorar la dependencia del tiempo de insuflado con el contenido de nitrógeno con que se obtiene la aleación.
3. Evaluar la calidad del producto final según la norma exigida por el cliente.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Cuando se hace un estudio es de vital importancia conocer hasta dónde ha llegado la humanidad en la temática analizada, ello permitirá aprovechar de manera eficiente los conocimientos heredados generación tras generación, evitando así arribar a conclusiones erróneas según nuestros puntos de vista y cuestiones analizadas por otros autores.

Este Capítulo tiene como objetivos:

- Definir los aspectos teóricos que permitirán llevar a cabo la investigación propuesta.
- Conocer el estado del arte de la temática analizada, realizando una revisión bibliográfica que permita la orientación de los objetivos del trabajo.

Se realiza una búsqueda de información actualizada con respecto a la producción de aceros por vía eléctrica y en la metalurgia secundaria, en especial el insuflado con gases inertes en el proceso de ajuste y afino en Horno de Cuchara (HC).

La literatura recoge importantes resultados en el campo de la caracterización y la aplicación de métodos y búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización del nitrógeno como gas de agitación en HC; considerado este un mal en la producción de estos tipos de aceros, mediante procesos tecnológicos sin afectar la calidad del producto final.

1.2 Metalurgia Secundaria.

El proceso de metalurgia secundaria no solamente posibilita ampliar la gama de calidades de acero que puede moldearse, sino que mediante el proceso de afino del acero en un horno independiente se consigue aumentar la productividad del horno principal. La razón primordial es porque se acorta el tiempo necesario para el vaciado del acero líquido de las materias primas que se utilizan en la fabricación del acero. (J. Ramírez, 2010)

Según (A. García, 1989) Partiendo de la base que las reacciones metalúrgicas entre las fases acero, escoria, atmósfera de gases, se desarrollan más rápidamente cuanto mayor sea la interface entre las fases, se observa cómo un aumento del tamaño de un horno ejercerá una influencia negativa sobre el curso de las reacciones metalúrgicas. En resumen, el aumento de la capacidad de un horno por razones económicas lleva necesariamente a:

1. Una limitación de la capacidad de reacción debido a la menor superficie específica de reacción entre las fases metal, escoria y gases.
2. Un mayor consumo específico de material refractario con una mayor potencia eléctrica específica instalada.

Cuando el acero líquido se vuelca a la cuchara se somete a una serie de tratamientos hasta alcanzar la composición requerida. Operaciones clave pueden incluir procesos como la desoxidación, desulfuración y desfosforación. (Artículo de la Universidad Tecnológica de Pereira, 2001)

Los objetivos de la metalurgia secundaria (se añaden algunos elementos y es necesario extraer otros) son:

- 1.-Encaje preciso de la composición del acero (Realizar un ajuste de los elementos de aleación: C, Mn, Nb, Ti, etc).
- 2.- El control de gases: Desgasificación (Reducción de las concentraciones de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno disueltas en el hierro líquido a la propia de la calidad del acero que se quiere obtener.)
- 3.-Alcanzar bajos contenido de azufre (Normalmente menores de 0.010 % y a veces menores de 0.002 %. Ajustar las especificaciones de las impurezas no metálicas (fósforo y azufre) disueltas en el hierro líquido a las propias de la calidad del acero que se quiere obtener).

4.- Conseguir aceros más limpios (Eliminación de inclusiones no metálicas, fundamentalmente óxidos (Al_2O_3)).

5.- El control de la morfología de las inclusiones (Dado que no es posible eliminar totalmente los óxidos indeseables en el acero, este proceso permite a los aceristas cambiar la composición y/o la forma de las inclusiones indeseables, residuales en el acero, de manera que sean compatibles con las propiedades mecánicas del acero final).

6.- Calibrar la temperatura, de cuyo nivel depende la estructura de solidificación y las propiedades del acero.

Entre los factores fundamentales que hacen posible el desarrollo de la metalurgia secundaria destacan:

— Desarrollo de los procesos metalúrgicos.

— Evolución de los refractarios de alta calidad para los revestimientos de las cucharas.

— Insuflado de argón en las cucharas.

— Cierres de corredera.

1.3 Proceso de Agitación con Argón en Horno de Cuchara.

La agitación del acero en el proceso de HC se realiza con el objetivo de que exista una mayor homogenización dentro del acero, lográndose que exista una mayor licuación de los materiales que son introducidos en el acero líquido para el afino del mismo y una mayor decantación de gases que son perjudiciales para el producto final, además que la diferencia temperatura entre el acero que está en contacto con el arco eléctrico y el acero que se encuentra en el fondo de la cuchara sea mínimo.

El gas generalmente utilizado para la agitación del acero en el proceso de HC es el argón principalmente debido a sus propiedades. Este es uno de los 4 gases más inertes que se encuentran en la atmósfera, y aunque sea un gas frío, no tiende a formar inclusiones en el baño metálico, además funciona como seno para la extracción de gases (V. Morera, 2006).

Partiendo del hecho admitido de la idoneidad del insuflado de gas por el fondo de la cuchara, habría que preguntarse el lugar concreto de ubicación de la fuente de inyección en el fondo, este estudio fue realizado por Scheubel a base de ensayos con modelos hechos en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Darmstadt. En la figura 1.1 se representan los ciclos realizados por las corrientes de argón en una cuchara de acero, según la posición de la fuente. Scheubel demostró, prácticamente, que la acción técnicamente más favorable de las corrientes se logra cuando el ladrillo se encuentra en la mitad del radio del fondo ($r/R=0$) y además se recomienda que se sitúe a 90° respecto al agujero de colada con el fin de protegerlo del impacto del chorro de colada. (A. García, 1989)

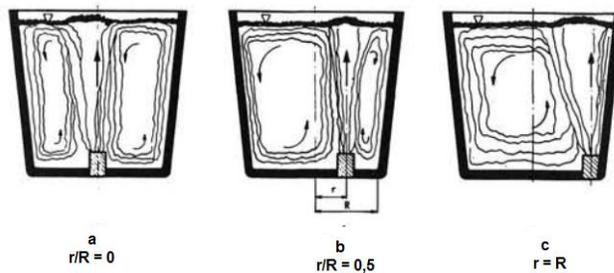


Figura 1.1 Esquema de la circulación del argón en función de la localización del tapón poroso. . Extraído de Técnica de soplado para la metalurgia en cucharas, (A. García, 1989).

La acción positiva del argón al ser inyectado en una cuchara de acero está basada en dos propiedades básicas (A. García, 1989):

— Una actuación puramente física basada en la diferencia de presiones parciales de las burbujas de argón, ascendentes por el metal, y la de los gases perjudiciales disueltos en el mismo, siendo éstos absorbidos y transportados a la superficie por aquél.

— Una acción química: el O_2 se extrae en forma de CO mediante un proceso de oxidación química, desprendiéndose en forma de burbujas. Ahora bien, este proceso se ve claramente favorecido y posibilitado en presencia del argón que actúa como catalizador, aumentando la velocidad de reacción entre el carbono y el O_2 y actuando luego, igual que antes se ha dicho, como absorbente de las burbujas de CO para ascender rápidamente a la superficie de la cuchara.

Estas dos acciones conjuntas son las que actúan en la misión desgasificadora del argón. Una acción análoga al de notación: en las burbujas ascendentes se acumulan las partículas en suspensión de la colada, que serán llevadas hacia arriba a la escoria, originándose una limpieza adicional y automática de la colada.

(J. Berciano, 2007) pudo comprobar experimentalmente que la desgasificación resulta muy favorecida con la disminución del diámetro de las burbujas y el aumento del tiempo de permanencia de éstas en la colada. En la figura 1.2 se expresa la superficie total de las burbujas de 1 l de gas en función del diámetro de las burbujas. En realidad estos dos factores están íntimamente ligados, ya que, según la fórmula de Stokes, para una temperatura constante, la velocidad de las burbujas en la colada es proporcional al cuadrado del radio de la burbuja. Por tanto, burbujas más pequeñas permanecen más tiempo en la colada.

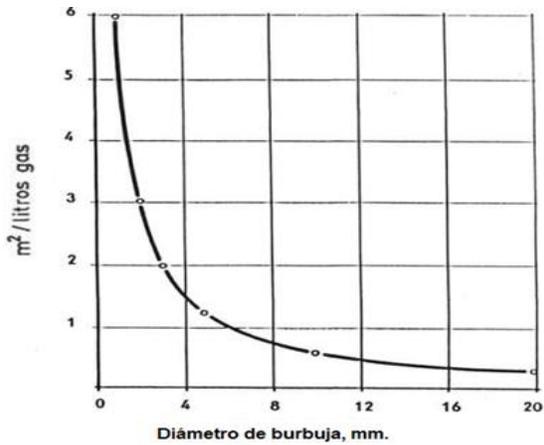


Figura 1.2 Relación entre la superficie total de las burbujas y el diámetro de las mismas.

1.3.1 Presión de insuflado de gas

La presión de insuflado de gas en una cuchara tiene un mínimo obligado que es el de la presión ferrostática que ejerce el metal hacia el fondo de la cuchara, a partir de ésta se regulará según la función a que esté destinada. De una forma generalizada, la norma habitual es una mayor presión inicial, para descender luego a un burbujeo fino que favorezca la eliminación de las inclusiones y partículas de escoria. En la figura 1.3 se indica un ejemplo sobre este asunto. (A. García, 1989)

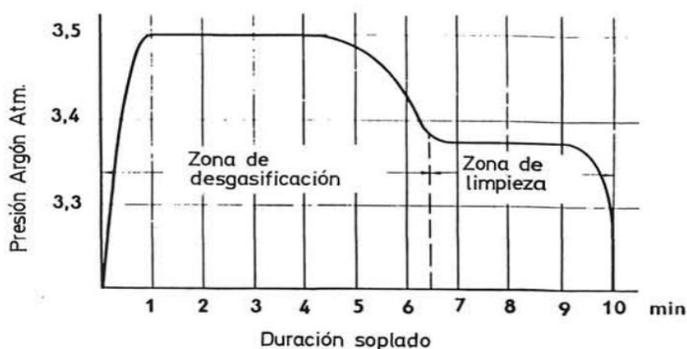


Figura 1.3 Evolución de la presión de insuflado de Ar en función de la duración del soplado. Extraído de (A. García, 1989).

1.3.2 Funciones y propiedades del argón como gas de agitación.

Con los fundamentos antes descritos según (A. García, 1989) pudo estudiar con detalle la acción del argón sobre el contenido de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, sobre la temperatura de la colada, el comportamiento de la fluidez al colar y sobre el grado de limpieza de los aceros. Sin entrar en más análisis, en las figuras 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7 están representadas algunas curvas sobre el comportamiento del argón en la eliminación de gases.

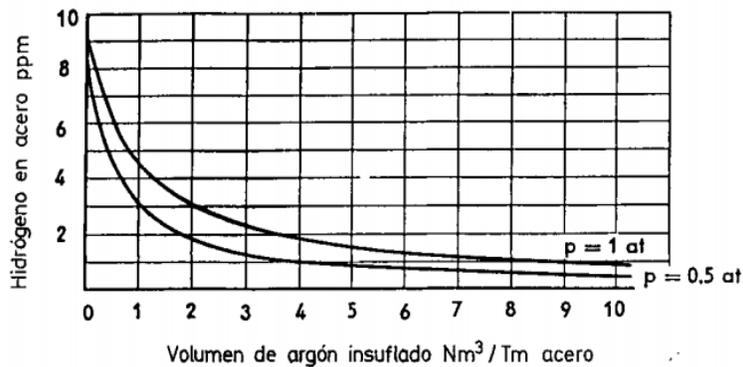


Figura 1.4 Relación entre el volumen de argón insuflado y el contenido de H₂ en el acero. Extraído de Técnica de soplado para la metalurgia en cucharas, (A. García, 1989).

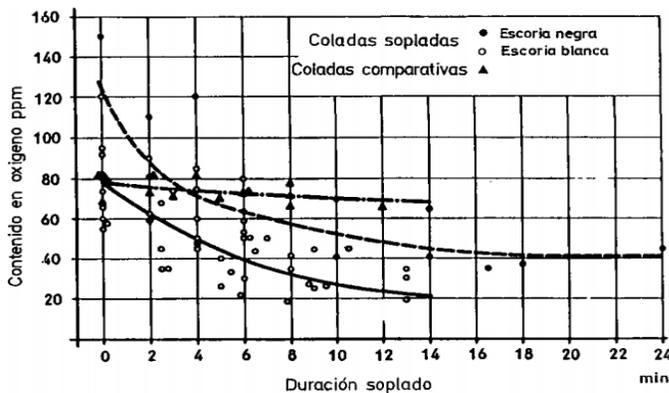


Figura 1.5 Relación entre la duración del soplado y el contenido de O₂ en el acero. Extraído de Técnica de soplado para la metalurgia en cucharas, (A. García, 1989).

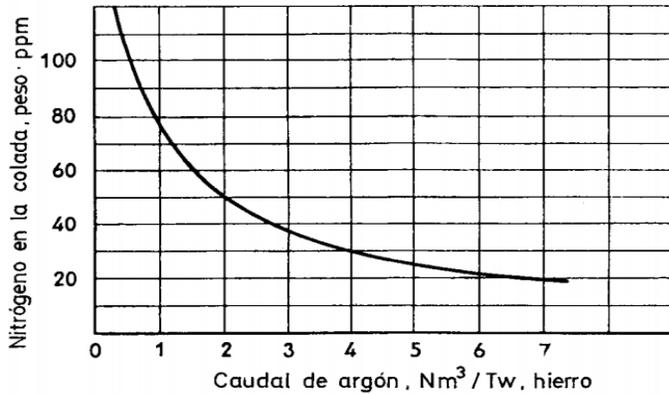


Figura 1.6 Relación entre el caudal de argón y el contenido de N₂ en el acero. Extraído de Técnica de soplado para la metalurgia en cucharas, (A. García, 1989).

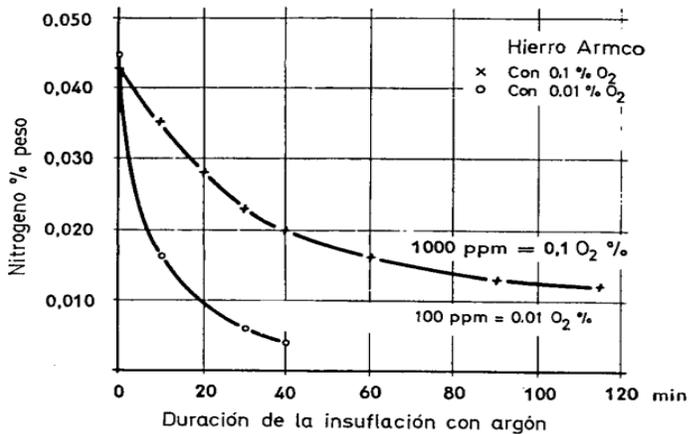


Figura 1.7 Relación entre la duración de insuflación del argón y el contenido de N₂ con el acero. Extraído de Técnica de soplado para la metalurgia en cucharas, (A. García, 1989).

1.4 Proceso de Agitación con Nitrógeno en Horno de Cuchara.

El proceso de agitación con nitrógeno en HC se describe de la misma forma que el utilizado con argón, solo que los dos gases son fríos pero el nitrógeno tiene mayor capacidad para enfriar el metal que el argón, además de tener afinidad a formar inclusiones en el metal con otros elementos. Aunque se tiene conocimiento de que existen industrias que utilizan este gas para realizar la agitación del acero, no fue posible acceder a información de la utilización del mismo para aceros con un

contenido máximo permisible de 120 ppm de nitrógeno. No obstante, debido a la necesidad del empleo de este gas, en ACINOX-Las Tunas se ha venido realizando varias prácticas con el fin de trabajar con el mismo.

Fue (J. Ramírez, 2010) quien llegó a la conclusión mediante la práctica industrial, que se podía insuflar con Nitrógeno en el proceso de Ajuste y Afino de HC en acero de 140 – 150 ppm de N₂ o aceros similares con un tiempo máximo de 40 min., siempre que se realice un análisis minucioso del comportamiento de Nitrógeno al 100% de las coladas además de tener en cuenta todos los parámetros que influyen en dicho proceso.

1.4.1 Antecedente del Insuflado con Nitrógeno en Hornos de Cuchara.

A partir de pedidos de prestigiosos clientes para la construcción principalmente de autos y de barras corrugadas, se dio la tarea de analizar en primer lugar la tecnología actual con la que cuenta la empresa y un estudio de cómo se realizan en el mundo. Las tecnologías que se utilizan en el mundo para la realización eficiente de estos tipos de aceros especiales con contenidos de “Nitrógeno” inferior a los 120 ppm, son las siguientes:

- Utilización de hierro prerreducido o hierro esponja mezclado con chatarra al carbono en función del contenido de nitrógeno que se desee en el acero.
- Utilización del vacío para la extracción del nitrógeno disuelto en el metal líquido.
- La utilización para el proceso de ajuste y afino de Argón como gas de agitación todo el tiempo.

La utilización de otra materia prima de hierro conjuntamente con la chatarra al carbono está en función del contenido de nitrógeno que se desee en el producto final, a continuación se muestra una figura que relaciona el contenido de nitrógeno en el acero líquido del HAE en función del porcentaje de chatarra al carbono que se utilice en la mezcla con otras fuentes de hierro (Artículo de V. Morera, 2006):

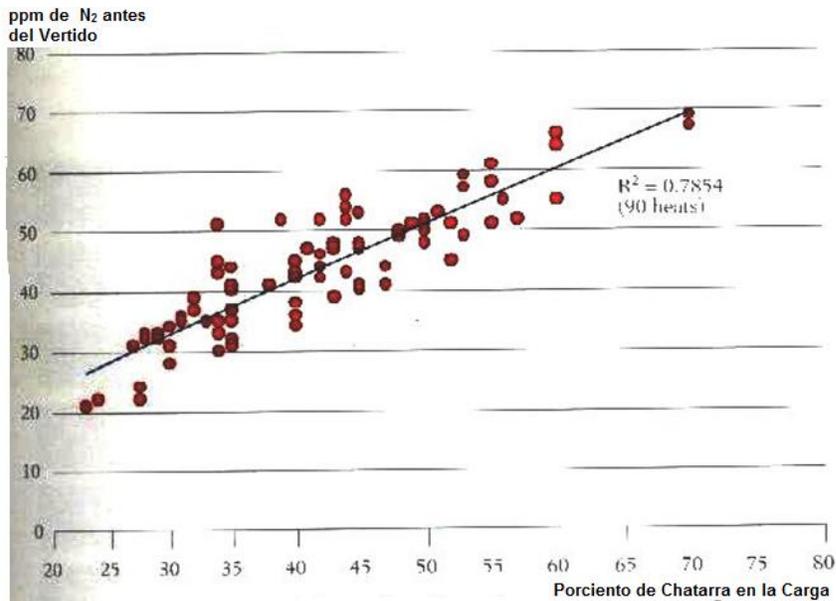


Figura 1.8 Contenido de N₂ en el acero líquido de 90 coladas de HAE en Europa, extraído de (V. Morera, 2006).

Se puede perfectamente observar que con 70% de chatarra al carbono en la carga del Horno de Arco Eléctrico, se obtendría aproximadamente 65 – 70 ppm de nitrógeno en el acero líquido y este valor aumenta linealmente con el incremento del porcentaje de chatarra al carbono de carga al HAE. Los materiales considerados como de hierro de carga al HAE, presentan no solo bajos contenidos de los elementos trampa, sino también de nitrógeno, por tal motivo con el aumento de ellos en la carga metálica del HAE disminuirá el contenido de nitrógeno en el acero líquido del HAE. (V. Morera, 2006)

Otra de las tecnologías que se utilizan para lograr aceros con bajos contenidos de nitrógeno, es el uso de equipos que traten el acero al vacío. La desgasificación completa del metal se realizan principalmente en dos equipos ampliamente difundidos en el mundo en acerías especiales para precisamente aceros especiales como son la Desgasificación del Acero al Vacío (V.D y R.H) (J. Berciano, 2007).

Con estas tecnologías se obtienen aceros muy limpios pero sin dudas son también costosas. Acorde a los requerimientos del acero y el precio del mismo así debe ser la tecnología utilizada. En nuestro caso que la carga es 100% de chatarra al carbono, es preciso hacer un minucioso estudio del comportamiento del Nitrógeno durante el proceso de elaboración del acero con la tecnología tradicional nuestra (J. Ramírez, 2010).

El contenido de nitrógeno en el acero líquido del HAE de Acinox – Tunas antes del vertido del mismo a la cazuela (100% Chatarra al Carbono) no difiere del comportamiento del mismo realizado en los Hornos de Europa teniendo en cuenta que la carga es 100% chatarra al carbono como única fuente de hierro. Posteriormente durante el vertido del acero del HAE a la Cazuela, es adsorbido una importante cantidad de Nitrógeno por parte del acero líquido producto a que el horno de ACINOX - Tunas es de piquera convencional y el chorro de metal está descubierto tal y como se muestra en la figura 1.9 (V. Morera, 2006).



Figura 1.9 Vertido del acero líquido del HAE a la Cazuela. Extraído de V. Morera, 2006.

1.4.2 El nitrógeno en los aceros.

Numerosas fuentes de Nitrógeno existen durante la Fusión, el procesamiento en Cazuela y en las operaciones de Vaciado. Las fuentes de Nitrógeno en las acerías

al Oxígeno que incluyen el metal caliente, la Chatarra, la impureza de Nitrógeno en el Oxígeno y el Nitrógeno usado como gas para la agitación, la tabla 1.1 muestra la cantidad de Nitrógeno presente en cada uno de los materiales típicos de alimentación usados en el HAE (V, Morera, 2006).

Tabla 1.1 Contenido de Nitrógeno de los Materiales que se utilizan en las Acerías Eléctricas (HAE). Extraído del Artículo de V. Morera, 2006.

Material Adicionado	Contenido de Nitrógeno
Chatarra	30-120 ppm
Carbón	5000-10000 ppm
Oxígeno	30-200 ppm
Carbón de insuflado (Aire)	78%
Insuflado de gas (N ₂)	> 99,9%
CaO	400 ppm

El nitrógeno en el acero de bajo y medio carbono es considerado una impureza, incluso una pequeña concentración es considerada indeseable. Este se disuelve intersticialmente en el acero, lo que baja su ductilidad y contribuye a la formación de líneas de estiramiento (bandas de Lüder) en operaciones de conformado profundo. En combinación con el aluminio (AlN), el nitrógeno puede causar fractura intergranular disminuyendo la capacidad del metal a deformarse debido a la precipitación de nitruros en los límites de grano. Durante la solidificación del metal líquido, el nitrógeno puede evolucionar a su forma molecular, produciendo burbujas que pueden generar porosidades (N, Dieter, et al. 2005).

El nitrógeno crea en ocasiones dificultades en los aceros por comunicarles fragilidad y reducir la ductilidad, en el estado líquido el acero puede llegar a contener hasta 0,0450 % de nitrógeno y el contenido de este gas, en equilibrio con el hierro líquido a 1539 °C es de 0,0390 %. Al bajar la temperatura esta solubilidad pasa a ser de sólo 0,0105 % y a 1400 °C es de 0,0080 %. En el hierro gamma la solubilidad es bastante mayor que en el hierro delta y esta varía de 0,0210 a 0,0255 % como se muestra en la siguiente figura de solubilidad del nitrógeno en función de la temperatura.

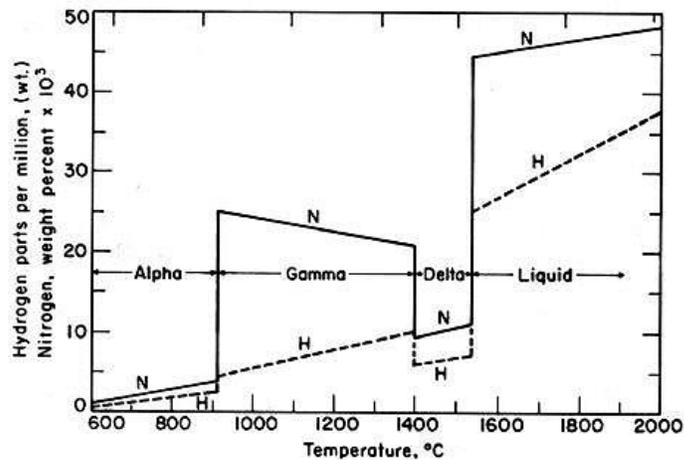


Figura 1.10 Solubilidad del Nitrógeno en el metal líquido en función de la Temperatura. (Diagrama de Shaifelt), Extraído de V. Morera 2006.

Como también ocurre con el oxígeno, el nitrógeno se puede fijar en forma de compuestos complejos por la acción de ciertos elementos como Al, Ti y Zr, que forman nitruros. Mientras el acero está líquido el Nitrógeno se encuentra presente en la solución, sin embargo, la solidificación del acero puede producir tres fenómenos Nitrógeno-relacionados: Formación de poros (burbujas); precipitación de uno o más compuestos de Nitrito y/o la solidificación del Nitrógeno en la solución sólida intersticial. (V. Morera, 2006)

La máxima Solubilidad del Nitrógeno en el metal líquido es de aproximadamente de 450 ppm, y menos de 10 ppm a temperatura ambiente, tal como se muestra en

la figura 1.10. La presencia de cantidades significativas de otros elementos en el Hierro líquido afecta la Solubilidad del Nitrógeno. Más importantemente, la presencia del Azufre y del Oxígeno disuelto limita la Absorción del Nitrógeno porque ellos son elementos de superficie-activos (mayor Tensoactividad que el Nitrógeno). Esto se explota durante la Elaboración del acero para evitar la Adsorción del Nitrógeno de forma excesiva, particularmente durante el Vertido (A, Barrientos, et al. 2005).

1.4.2.1 Solubilidad del Nitrógeno en el Acero.

La Solubilidad del Nitrógeno con respecto a la temperatura transcurre acorde a la Ley de Sieverts y está dada por la siguiente ecuación

$$\log[\%N_2] = -\frac{375}{T} - 1,154 \quad (1)$$

Para la reacción de nitrógeno diatómicas en Nitrógeno monoatómica:



La Constante de Equilibrio para la Absorción del Nitrógeno es por consiguiente:

$$K = \frac{[ppmN]}{(pN_2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Y la Constante de equilibrio de la reacción de esta ecuación se relaciona a la energía libre (energía de Gibbs);

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln K_{N_2} \quad (4)$$

Qué se vuelve cero en caso de equilibrio que lleva a:

$$\ln[N_2] = -\ln f_N^R + \ln \sqrt{P_{N_2}} - \frac{\Delta H_0}{RT} + \frac{\Delta S_0}{R} \quad (5)$$

Si se asume que la Actividad del Nitrógeno disuelto en el acero es aproximadamente igual que la Concentración Química (la ley de Henry), entonces esta Concentración puede calcularse como:

$$[\%N] = KN(pN_2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

1.4.3 Efecto del Nitrógeno en las Propiedades del Acero.

El efecto del Nitrógeno en las propiedades del acero puede ser igualmente perjudicial o beneficioso, dependiendo de los otros elementos de aleación presentes, la forma y cantidad de Nitrógeno presente, y el comportamiento requerido del producto de acero en particular (N. Robert, 1964).

Altos contenidos de Nitrógeno puede provocar Propiedades Mecánicas incoherentes en productos Laminados en Caliente, el llamado "Embrittlement" de la Zona Afectada en Caliente (HAZ) de los aceros soldados, y la pobre Formabilidad en frío. El efecto del Nitrógeno sobre las propiedades Mecánicas es el resultado de la Solución Sólida Intersticial fortalecida por el Nitrógeno libre; el fortalecimiento de la precipitación por el Aluminio y otros Nitritos; y la Refinación del Grano debido a la presencia de Precipitados de Nitritos (A, Barcenas, et al. 2010).

La Dureza es la Resistencia de un Material a la penetración de su superficie (hendidura). La figura 1.11 muestra que la Dureza aumenta linealmente con el aumento del contenido de Nitrógeno. El Nitrógeno absorbido durante la Elaboración del acero resulta en una Solución Sólida Intersticial fortalecida y forma Refinamiento del Grano en el acero, ambos incrementan la Dureza. Más allá, el Diagrama muestra que el Nitrógeno Absorbido durante el Proceso de Elaboración el acero tiene un impacto más significativo que el Adsorbido durante el Templado del mismo en una atmósfera rica en Nitrógeno, aunque los dos tienen un efecto mensurable.

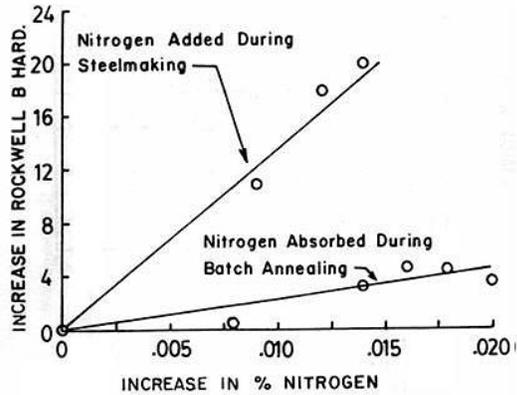


Figura 1.11 Incremento de la Dureza en las Chapas de acero Desoxidadas con Aluminio con respecto al incremento del Contenido de Nitrógeno (V. Morera, 2006).

1.4.4 Eliminación del Nitrógeno en el Acero.

El contenido de nitrógeno viene también regulado por la ley de Sievert, y en el equilibrio es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de este gas en la atmósfera en contacto con el acero líquido. El proceso de desgasificación de aceros en los HC consiste en la inyección de un flujo de gas de arrastre (Argón) por el fondo de la misma hacia el metal fundido, donde dicha inyección debe llevarse a cabo antes de iniciar la colada del metal fundido; el mecanismo de Desgasificación como se muestra en la figura 1.12, consiste en la difusión del Hidrógeno y/o Nitrógeno hacia el interior de las burbujas del gas de arrastre, esto debido a la diferencia de presiones parciales de Hidrógeno entre el gas de arrastre y el acero líquido. En los aceros altos en nitrógeno la eliminación puede llegar al 40 %, pero eso ocurre sólo en pocas ocasiones, esto es probablemente debida a la menor velocidad de difusión del nitrógeno, que es mucho más baja que la del hidrógeno. (J. Berciano, 2007)

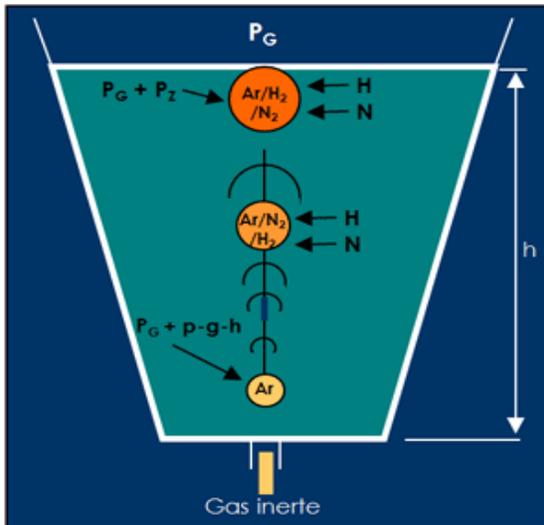


Figura 1.12 Proceso de desgasificación del Nitrógeno e Hidrógeno en el HC con la utilización de Argón.

Teniendo en cuenta todos los problemas planteados anteriormente se hace imprescindible la utilización de una herramienta operacional para la utilización del Nitrógeno para la agitación en el proceso de ajuste y afino en el HC.

Conclusiones del Capítulo

1. No se pudo constatar investigaciones realizadas sobre de la agitación con nitrógeno y a pesar de tener conocimiento sobre empresas que practican esta operación, no fue posible acceder a dicha información.
2. Se expusieron las principales tecnologías para la obtención eficiente de aceros especiales con contenidos de nitrógeno inferior a 120 ppm.
3. Las fuentes de información consultadas permitieron establecer el marco teórico conceptual necesario para el diseño de la experimentación.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen los materiales y las secuencias de operaciones realizadas para la proyección de la tecnología de insuflado de argón combinado con nitrógeno como gas de agitación en la obtención de acero FEE 500.

Características del acero FEE 500

El acero FEE 500 para el cliente Gibraltar, tiene la siguiente característica en su composición química:

Acero FEE500	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%(Cr+Ni+Cu)	N ₂ (ppm)	R. [Mn]/[S]
Min.	0.18	0.60	-	-	0.15	-	-	-
Óptimo	0.20	0.72	-	-	0.18	-	-	-
Máx.	0.22	0.90	0.045	0.029	0.30	0.95	120	>25

Recordar que siempre trabajamos el [%S] y [%P] para garantizar en el acero la calidad interna:

- Relación de [%Mn] / [%S]>25, obteniéndose valores de [%S] ≤ 0.025.
- En cuanto al Fósforo, se elimina en el proceso de Defosforación en el HAE y debe verse el acero con valores de [%P] ≤ 0.020, para garantizar en el proceso de HC [%P] ≤ 0.045.

2.1 Descripción del proceso tecnológico para la elaboración del acero FEE500.

Para la realización del proceso de producción de los aceros FEE 500 con la utilización del nitrógeno como gas de agitación es necesario realizarle un seguimiento o control minucioso del proceso productivo.

2.1.2 Horno de Arco Eléctrico (HAE).

El proceso tecnológico como se muestra en el Anexo 2 comienza por la fusión de la carga metálica, donde la materia prima principal es la chatarra al carbono. El HAE tiene la característica que cuenta con tres electrodos de grafito de 500 mm con una pureza de 99,9 %, además posee ladrillo refractario del tipo básico y su capacidad es de 65 toneladas de acero líquido por colada.

Al verter el acero de la colada precedente, se realiza la revisión profiláctica del horno, donde se valora el estado del refractario, de los paneles enfriados con agua, el largo de los electrodos, etc.

A continuación reflejamos valores promedios de la tecnología de calentamiento y fusión del acero en el HAE:

Carga 1ra. Cesta.....	3 min.
Fusión 1ra. Cesta al 80-90%.....	27 min.
Carga 2da. Cesta.....	3 min.
Fusión 2da. Cesta al 80-90%.....	22 min.
Carga 3ra. Cesta.....	3 min.
Fusión 3ra. Cesta al 100%.....	17 min.
Calentamiento y Afino del metal (acero)	25 min.

Tiempo Total de Fusión de Carga Metálica = 100 min.

Después de cargada de la primera cesta, se cierra la bóveda y se suministra electricidad, descendiendo automáticamente los tres electrodos y antes de hacer contacto con la chatarra, se forma un corte circuito entre los electrodos (ánodo) y la chatarra (cátodo), formándose el arco eléctrico, alcanzando una temperatura 3000 a 5000° C, ocurriendo de ésta forma la fusión de la chatarra. En ésta zona de altas temperaturas es propensa la asimilación e ionizado del nitrógeno, por lo que es necesario cubrir lo más rápido posible el arco y evitar la contaminación con nitrógeno de la atmósfera del horno. A partir de este momento se aumenta la

máxima potencia del horno para acelerar el proceso de fusión de la carga metálica.

En la primera cesta se adiciona el carbón de carga (C-II) para proteger el baño metálico de la sobreoxidación, en la primera y segunda cesta se adiciona Cal para formar la escoria en el acero y que se logre una Basicidad de aproximadamente 2. Luego se adicionara un contenido de “Carbono” entre 0.10 - 0.20 % para la formación de una escoria espumosa óptima. Como el proceso en HAE es de altos tiempos esto provoca una sobreoxidación del acero, provocando mayor cantidad de Carbón Grafito a insuflar para la desoxidación y la formación de la escoria espumosa. Es necesario realizar una reducción con la adición de carbón Antracita o Coque para evitar durante el vertido del acero a la Cuchara el “Over Flow”.

La Inyección del “Carbón” durante la realización de la escoria espumosa se hará dentro del volumen de escoria y no en la interfase metal – escoria tal y como se muestra en la figura del Anexo 3 sobre la formación de la escoria espumosa. Durante la fusión de las cestas se inyecta Oxígeno para acelerar el proceso de fundición. Para la elaboración del acero limitado con Nitrógeno hasta 120 ppm se trabaja con un flujo de oxígeno mínimo de 900 Nm³/h y teniendo en cuenta que el Carbono es un inhibidor del Nitrógeno, debido que la formación del Carburo de Hierro es más estable que los Nitruros de Hierro.

Al inyectar Oxígeno favorece la formación de burbujas de “CO” que se van a formar en el interior del acero líquido, logrando evacuar una parte importante del Nitrógeno disuelto en el metal líquido; basado en el principio de que a las burbujas de “CO” puras se les unen las de “N₂” y de esta forma son arrastradas al exterior del acero líquido (a la atmósfera del HAE).

El afinado del acero en el HAE, ocurre una vez fundida la 3ra. Cesta al 80-90 %, se inyecta por una lanza Oxígeno y por la otra Carbón Grafito en la interfase Metal-Escoria, con la formación de CO (g) a través de la reacción de $[C] + 1/2O_2 = CO (g)$, que espuma la escoria, cubriendo el arco, aprovechándose prácticamente toda la Energía suministrada por el arco eléctrico en calentar el metal líquido hasta

la temperatura de vertido, en un mínimo de tiempo. Se debe mantener un equilibrio estequiométrico entre el Carbón Grafito y el Oxígeno Inyectado como se muestra en la figura 2.1, para evitar sobreoxidación o recarburación del acero, con aportación de nitrógeno al baño metálico.

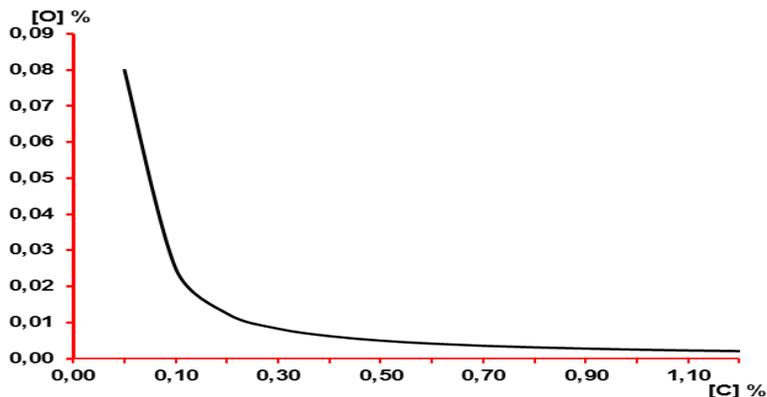


Figura 2.1 Relación entre las concentraciones de Carbono y Oxígeno.

Al espumarse la escoria, la misma sale espontáneamente por la ventana de trabajo del horno, eliminándose el fósforo, que se encuentra en la escoria en forma de (P_2O_5) ya que es en éste momento que están creadas las condiciones para que ocurra la desfosforación.

La primera muestra de metal para realizarle el análisis de composición química se toma a una temperatura de 1540-1550 °C. Se continúa el calentamiento y a una temperatura de 1580-1590 °C, se toma la segunda muestra de metal y si la composición química se encuentra en los rangos exigidos de la Orden de Producción, se alcanza la temperatura de vertido del acero a la Cuchara.

Para nuestra metodología experimental se toma la muestra de acero y la de temperatura momentos antes de que se vierta el acero del HAE a la Cuchara.

2.1.3. Horno de Cuchara

El Horno de Cuchara como se muestra en la figura 2.2, cuenta con unos electrodos de grafito de 300 mm con una pureza de 99,9 %, una cuchara o

cazuela de 60 toneladas de capacidad de acero líquido y el refractario es del tipo básico.



Figura 2.2 Horno de Cuchara.

Situado en el piso de la cazuela, dentro del bloque porta tapón se encuentra el tapón poroso. El mismo, es una pieza especial de forma cónica, construida de material refractario con canales direccionales internos que permite el flujo a través de él de un gas inerte (Ar, N₂) para la agitación del metal líquido.

Antes del vertido se coloca la Cuchara en el carro porta Cuchara, se le conecta la manguera de agitación de argón o nitrógeno como se muestra en la figura 2.3, los gases de agitación salen de la planta de fraccionamiento de aire con una pureza de 99,99 %. La conexión de la manguera de insuflado se realiza cuando el carro porta cuchara se encuentre en posición de reposo.



Figura 2.3 Montaje de la manguera de insuflado (Ar o N₂) para la agitación en el proceso de HC.

Una vez conectada la manguera se procede a suministrar el gas a la cuchara, realizándose una prueba de agitación sin metal dentro de la cuchara de forma tal que se pueda detectar posibles anomalías en la manguera, en el tapón o algún otro lugar del proceso. Para realizar la suministración del gas a la cuchara se debe tener en cuenta la presión y el flujo con que llega a la rampa (figura 2.4) y esta es la encargada de suministrar el gas que se vaya a utilizar y de forma automática regula la presión y flujo de entrada a la cuchara. Todos los datos recogidos durante el proceso de HC se reflejarán en el panel de control (figura 2.5).

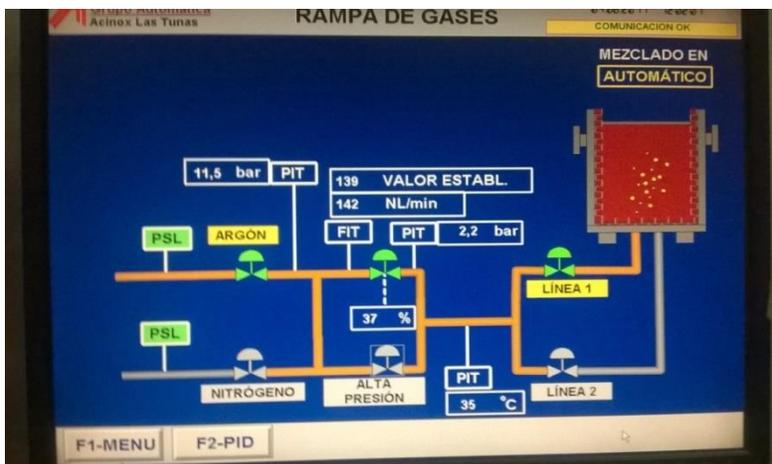


Figura 2.4 Rampa distribuidora de los gases argón y nitrógeno.



Figura 2.5 Programa para el control del proceso en HC.

En este punto se realizó una inspección profiláctica al estado del refractario y el mismo debe contar con una temperatura mayor a 1200 °C, para evitar un choque térmico al recibir el acero del HAE. Como se muestra en la figura 2.6, la cuchara es trasladada a la posición de vertido, mientras que el flujo de entrada del gas para la agitación (Ar) de 120 l/min y la presión de entrada a la rampa debe ser > 10 bar mientras que la presión de salida de la rampa (entrada al tapón poroso) debe encontrarse entre 1,50 a 3 bar, para recibir el acero.

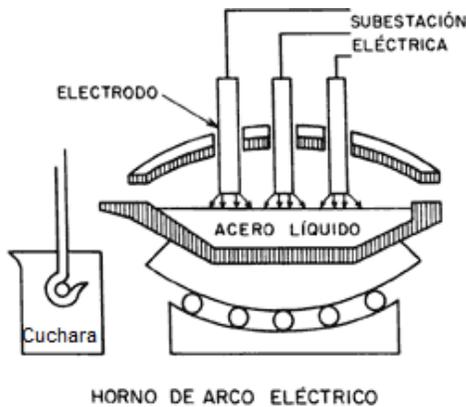


Figura 2.6 Representación del vertido del HAE a la cuchara.

La Temperatura de Vertido del HAE no debe superar el valor de 1635 °C, esta se realizará entre 1615-1630 °C, debido que la caída de temperatura (gradiente de temperatura) durante el vertido oscila entre 45 a 55°C, por lo que se puede cumplir con la temperatura de inicio de HC que debe ser $\geq 1540^{\circ}\text{C}$, favoreciendo el mínimo de saturación de Nitrógeno durante el vertido. El tiempo de vertido del acero del HAE a la Cuchara debe oscilar entre 3 - 4 min, nunca debe superar los 4 min y depende la apertura de la piquera, mientras que la práctica de ajuste del acero al 80% durante el vertido lo realizaremos de la siguiente manera:

a) Agitar siempre el acero con Argón durante el vertido, para evitar un exceso de saturación del Nitrógeno además de una mayor gradiente de temperatura, porque durante el vertido el acero se expone completamente al Nitrógeno de la atmósfera y al de insuflado, y a mayor temperatura mayor va a ser la solubilidad del Nitrógeno en el acero.

b) A las 3-5 t. de acero vertido a la Cuchara se adicionará SIDOX-LFG en sustitución del Aluminio para realizar la desoxidación primaria del acero y acondicionar la escoria. El Aluminio aunque tiene mayor poder desoxidante, forma inclusiones no metálicas y es de gran afinidad a formar compuestos con el nitrógeno en el acero (nitruros) además y puede provocar obstrucciones durante el proceso de vaciado en las boquillas de la Cuchara, Artesa y snorkells.

c) Adición de carbón coque o antracita para continuar la desoxidación primaria del acero y al mismo ajustarlo. A las 75 % del acero vertido a la Cuchara (35-40 t.), se adiciona el FeSiMn, que continua desoxidando el acero con Mn y Si por precipitación y al mismo tiempo lograr el ajuste del acero mayor al 80%. Una vez terminado el vertido se traslada la Cuchara a la posición de HC y se determina de acuerdo a la cantidad de escoria que paso del HAE, si se va a desescoriar o se inicia proceso de ajuste y afino en HC.

2.1.4 Ajuste y Afino del acero en el proceso de Horno de Cuchara (HC).

No se puede realizar ninguna adición en HC antes del vertido en el fondo de la cazuela, solamente se permiten realizar adiciones en la cazuela 5 - 10 segundos después de caer el acero a la misma. La verificación del buen funcionamiento del tapón para el insuflado se hará de forma tal que una vez recepcionada la cazuela, se debe de proceder a comprobar el tapón con insuflado de nitrógeno según las curvas y calidad, o tipo de tapón reflejada en el expediente de la cazuela (Manual de Operaciones de HC) como se muestra en las siguientes figuras.

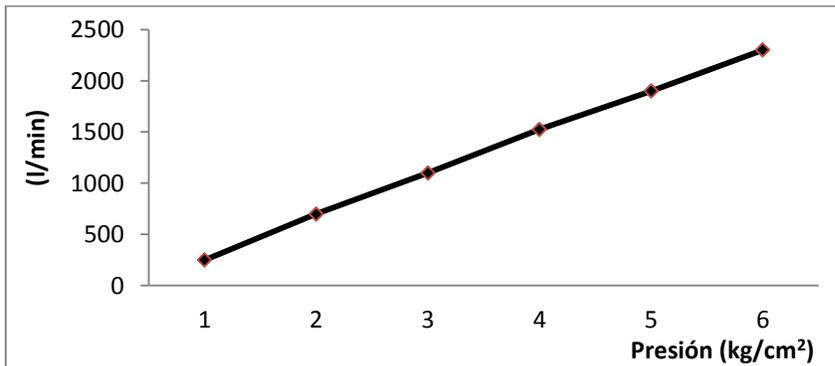


Figura 2.7 Curva de calidad del Tapón D – 360, en dependencia del caudal y la presión.

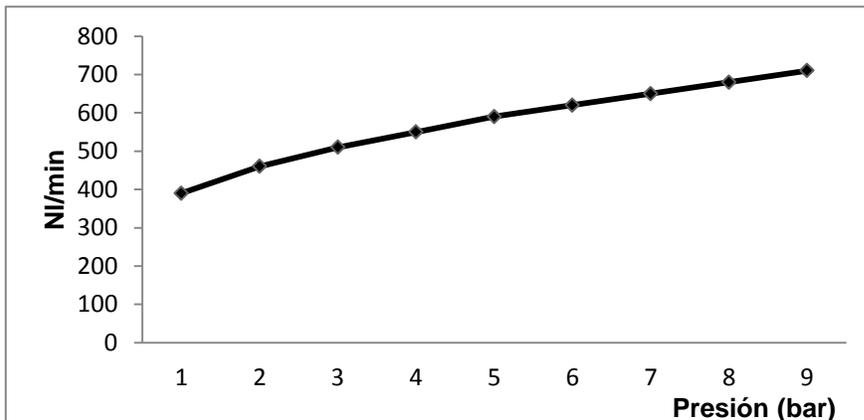


Figura 2.8 Curva de calidad del Tapón Zircal, PH – 03158 y PH - 00345.

Se regula el flujo de gas de forma tal que durante la agitación no exista derrame de acero o escoria por encima del borde de la cazuela. La presión con que debe entrar el gas a la cuchara depende de la presión ferrostática que ejerce el metal líquido al fondo de la cazuela, la misma es ajustada automáticamente solo en caso de que ocurran algunas situaciones en el proceso se procederá a realizar manual, el flujo es ajustado automáticamente pero el operador lo varia manualmente guiándose por el ojo de agitación que se crea en la superficie del metal líquido para realizar una mejor agitación. En caso de que la presión sea muy alta existe la posibilidad de que el tapón esté tupido, si al contrario la presión es muy baja existe la posibilidad de que haya salidero en la línea u otras causas en la misma o en la rampa de Ar – N₂. Para ambos casos aumentar el flujo hasta lograr una agitación que permita realizar el proceso en HC; de lo contrario se retornará el acero vertido al HAE y se enviará la cazuela al área de tapón poroso.

El flujo de agitación se regula visualmente. Debe garantizar una correcta agitación y por consiguiente un correcto calentamiento, homogenización de la temperatura y de la composición química del acero. Luego se adiciona un 86 % de Cal para la formación de la nueva escoria, esto depende del índice de basicidad con que se encuentra el acero y se calcula utilizando la ecuación 5. Luego se adiciona de 30-40 kg de SIDOX-LFG para condicionar la escoria, es decir, desoxidarla y al llegar los resultados de composición química de la muestra de acero, se introduce en el Programa de Cálculo para determinar la cantidad de Carbón (Coque o Antracita), FeSiMn y FeSi-75 a adicionar. Luego de realizar el primer ajuste se adiciona 350 kg Cal y la adición de más Cal dependerá del estado de licuación de la escoria. Se espera un tiempo de calentamiento entre 7-10 min a que los materiales sean asimilados en el acero, seguidamente se toma la segunda muestra de acero y se manda al laboratorio. Se introducen los resultados de composición química en el Programa de Cálculo y se realiza el segundo ajuste. Si al recibir los resultados de composición química el acero se encuentra en las especificaciones exigidas por el Cliente, entonces el ajuste ha terminado, de lo

contrario se realizaran tantos ajustes como sea necesario, luego cuando temperatura sea $\geq 1620^{\circ}\text{C}$, se procede a la Desulfuración, para el cual debe existir altos contenido de $[\text{CaO}]$ y bajo contenido de $[\text{FeO}]$ en la escoria, además de realizarse con altas presiones de agitación para que exista una mayor superficie de contacto entre el metal y la escoria.

La misma comprende la relación existente entre el Óxido de Calcio en la escoria (básico) y el Óxido de Silicio en la escoria (ácido): Ejemplo del cálculo del Índice de Basicidad.

$$\text{Índice de Basicidad } (B) = \frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)} \geq 2.2 \quad (6)$$

Después de la desulfuración y el acero se encuentra en composición química y temperatura, mantener un flujo de agitación de argón constante y lo más bajo posible en un tiempo de 6 minutos mínimo y en caso que el proceso en HC demore se mantendrá hasta el final de la colada en HC a envío a IVC, con el fin de que ocurra una decantación de las inclusiones no metálicas y una buena homogenización de la temperatura y composición química.

Una vez que el acero se encuentre ajustado en composición química y temperatura, se quita el flujo del gas de agitación, se adiciona al espejo metálico de la Cuchara 200 kg de ceniza de paja de arroz para proteger al baño metálico de los gases de la atmósfera. Luego se toma la Cuchara con el puente grúa de 125 t. y se traslada a la IVC.

2.1.5 Proceso de Vaciado del acero (IVC).

La Instalación de Vaciado Continuo cuenta con dos líneas de vaciado tipo "TWIN", resultado de una modificación realizada a la máquina de vaciado de planchones, donde las dos lingoteras oscilan en la misma cuna, figura 2.9.

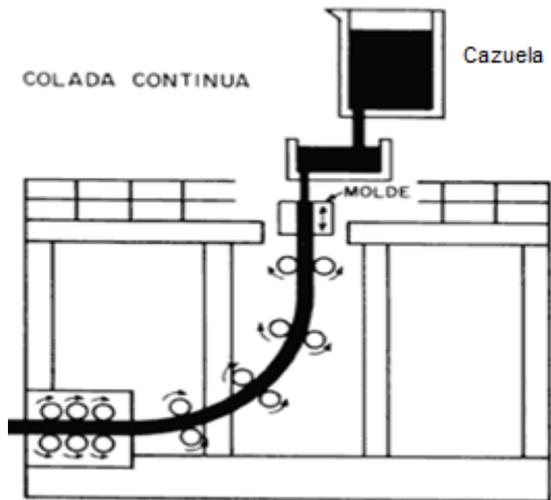


Figura 2.9 Instalación de Vaciado Continuo.

El acero fluye de la Cuchara a la Artesa (Distribuidor) a través de un cubre chorro para protegerlo de la contaminación de los gases de la atmósfera, fundamentalmente el Nitrógeno como se muestra en la figura del Anexo 4, donde durante el vaciado se toman muestras de metal para la certificación del acero en cuanto a composición química y contenido de Nitrógeno. Luego el acero pasa de la Artesa al molde o Cristalizador donde ocurre la transformación de fase de líquido a sólido. Del Cristalizador el acero pasa al Enfriamiento Secundario, donde ocurre la solidificación del acero, que consiste en enfriar el acero en sus cuatro caras, con un flujo de agua controlado. A partir de este momento comienza el Enfriamiento Terciario o Natural (en condiciones ambientales). Luego con ayuda de la Unidad Extractora las palanquillas se trasladan a través del camino de rodillo donde se encuentra el Carro de Corte, cortándose las palanquillas en la longitud exigida por el Cliente. Por último estas se trasladan con ayuda del puente Grúa de 30 t al nivel de producto terminado, para determinar los defectos de forma (diagonalidad, abombamiento, rechupes), porosidades y si fuese necesario se envía una muestra al Laboratorio para su análisis interno, clasificándose en producción aceptada, rechazada o pendiente de inspección. Luego de la solidificación del acero no es necesario realizarle un análisis de composición química ni de

nitrógeno ya que existe una pequeña variación del nitrógeno pero no es muy significativa, no obstante el acero es certificado con la muestra tomada durante el vaciado.

2.2 Diseño de experimento

La metodología experimental para el proceso de HC para el insuflado con nitrógeno y argón se realizó para las 21 coladas del Pedido FEE 500, para las cual solo se varia el tiempo de insuflado con nitrógeno. De esta forma se selecciona el método tradicional de experimentación, como el método para ser utilizado en esta investigación. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuales varía solamente un parámetro y se mantienen constantes todos los demás. De este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor. Salvo que se deben tener en cuenta las perturbaciones propias de los procesos a los cuales se somete la materia prima.

Se procederá a realizar el proceso de la siguiente manera:

Al llegar la Cuchara a posición de HC se determina si se va a desescoriar de acuerdo a la cantidad de escoria que pasa del HAE, se tomará muestra de metal y temperatura a inicio de proceso en HC, la muestra de metal se lleva al Laboratorio de Proceso para realizar el análisis de composición química y de nitrógeno. Inmediatamente haber tomado la muestra de metal y temperatura se comenzará el insuflado con nitrógeno durante los períodos de tiempos planificados. Luego de realizar el insuflado con nitrógeno por el período de tiempo planificado, se toma muestra de metal y temperatura y se realizara el mismo procedimiento anterior, luego se procederá a agitar el acero con argón. Con el insuflado de argón se realizaran los ajustes restantes del acero (C, Mn y Si) y se realizará la desulfuración, durante la desulfuración siempre se agitará con argón. Se ajustará la temperatura de envío a la IVC y se tomará muestra de metal para el análisis de composición química y de nitrógeno. Durante la agitación con ambos gases, se

realizará un control de los principales parámetros como el tiempo, presión, flujo, consumo, entre otros.

Se toma varias coladas para ser evaluadas para lo cual solo se va a variar el tiempo de insuflado con nitrógeno ya que esta se realizará a escala industrial y los demás parámetros no podrán ser modificados, el tiempo será variado para 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos de insuflado con nitrógeno, durante la realización del proceso se va a tomar los valores de los principales parámetros que influyen en el comportamiento del nitrógeno durante todo el proceso los cuales son:

1. La cantidad de cargada metálica en el HAE.
2. El consumo de oxígeno en el HAE
3. El consumo de carbón por etapas y el consumo final.
4. El tiempo y temperatura de vertido
5. El contenido de nitrógeno durante todo el proceso.
6. Las temperaturas durante todo el proceso de producción.
7. El tiempo total para el cada proceso.
8. El flujo, presión y consumo utilizados para el nitrógeno y el argón.
9. Otros valores que sean de relevante importancia, además de realizar las diferentes observaciones que ocurran en cada colada.

2.2.1 Realización de la toma de muestra y temperatura.

Para la realización del trabajo fue necesaria la ayuda de varios equipos tanto del laboratorio de procesos como los que se encuentran en cada una de las áreas de producción.

2.2.1.1 Procedimiento para realizar la toma de Temperatura:

La temperatura que se va a tomar en el proceso de HAE para nuestro experimento va a ser la última antes del vertido, esta se realizara por la ventana del horno dentro del baño metálico para tener un valor de temperatura exacto. Luego del vertido al llegar la cuchara a la posición horno cuchara se tomara la temperatura.

Se observa atentamente la regulación de la agitación para tener seguridad de la homogenización del baño metálico.

Para medir temperatura se introduce la lanza de forma tal que haga contacto con el acero líquido, observará el semáforo como se muestra en la figura 2.10 que se encuentra a su derecha y comprobará el encendido de la luz amarilla, la cual indica que se está efectuando la medición. Al cabo de 2 – 6 segundos el semáforo reflejará la luz roja y al mismo tiempo sonará la sirena indicando que se efectuó la medición de la temperatura. Dicha medición se reflejará en el equipo SIDERMES. Si al final de los 3 – 5 segundos la luz amarilla no cambia y la sirena no suena, entonces se sacará la lanza del baño metálico y se comprobará el contacto de la punta de la lanza con la del termopar, conexión del cable de alimentación además del estado técnico de la lanza y semáforo. En el proceso de IVC la temperatura se tomará luego de que el acero es vertido de la cazuela en la artesa.



Figura 2.10 Izquierda SIDERMES y derecha semáforo ambos para realizar la toma de temperatura.

Se debe tener en cuenta la cantidad de escoria para la introducción correcta de la lanza en el acero líquido, lográndose así el contacto necesario para obtener un valor de temperatura confiable.

2.2.1.2 Procedimiento para realizar la toma de muestra:

La toma de muestra en el HAE se realiza por el mismo lugar que se realiza la temperatura, se introduce un tubo con él toma muestra dentro del baño metálico luego le quita el molde metálico (chambelona) y la entregará al laboratorio de proceso. Esta muestra se realizará minutos antes de realizarse el vertido. En el HC después de comprobado el buen funcionamiento de la agitación, se introduce él toma muestra con la ayuda de un tubo destinado a esta fin, esperará 4 – 7 segundos y entonces extraerá del baño metálico el tubo, al que le quitará la “chambelona” donde se encuentra la muestra de acero. Dicha muestra se enviará al laboratorio para el análisis de la composición química y de nitrógeno final. Si la muestra es para analizar gases se debe tener en cuenta que junto con la “chambelona” salga el pin. Luego se tomara una terminado el tiempo de insuflado con Nitrógeno y por último una antes de enviar a IVC. En IVC la muestra final se le realiza cuando el acero es vertido de la cazuela a la artesa y esta última se enviará al laboratorio de proceso donde será esta la certificación de la composición química del cliente.

El termopar, como se muestra en la figura 2.10 es un dispositivo para la toma de temperatura del acero líquido, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener. El tomamuestra, es un dispositivo para la toma de muestra de composición química del acero líquido, el cual en su interior cuenta con un molde metálico o chambelona como se ve en la figura 2.10.

La chambelona es un molde metálico que se encuentra en la punta del tomamuestra que al ser introducido en el acero líquido, recepciona una muestra del mismo, figura 2.11.



Figura 2.10 Izquierda Termopar y derecha toma muestra, ambos para la realización de la toma de muestra y temperatura.



Figura 2.11 Molde metálico (Chambelona) para la toma de muestra del acero.

Requisitos previos a la toma de muestra y temperatura.

Verificar la existencia en cada proceso de termopares, lanza de medición de temperaturas y tubos para la toma de muestra. Revisar el cable de la lanza de medición de temperatura. Comprobación del buen funcionamiento del semáforo, sirena y del equipo SIDERMES o FERROTRON.

2.2.2 Recepción, preparación e identificación de las muestras.

El analista de turno recibe las muestras y procede a su preparación, teniendo en cuenta el tipo de la misma.

1. Muestras tronco-cónicas (TC): En la cortadora, se corta la muestra aproximadamente a $\frac{1}{3}$ de su longitud total a partir de su parte más fina, de modo que debe tener un diámetro entre 30 y 70 mm. Se rectifica por la parte cortada, en la rectificadora.

2. Muestras disk-pin (DP): Si se requiere, se puede separar la parte circular del pin o manguito, cortando éste con una cizalla u otro medio disponible. A continuación, se rectifica la parte circular por una de sus dos caras planas (para esto se elige, por inspección visual, la que tenga la superficie más lisa o de mejor aspecto), desbastando aproximadamente 1 mm o más a partir de la superficie y dejando ésta prácticamente libre de escoria o cualquier otro tipo de inclusión, de manera que no se contamine la zona a “chispear”.

3. Otras muestras: Se preparan utilizando las máquinas herramientas apropiadas y se acondicionan hasta que estén aptas, tanto por sus dimensiones como por su rectificado, para ser ensayadas. Las mismas deben tener las siguientes dimensiones:

Cuadradas o rectangulares		Cilíndricas	
Largo	15 a 100 mm	Diámetro	15 a 90 mm
Ancho	15 a 100 mm	Espesor	10 a 80 mm
Alto o espesor	10 a 80 mm	-	-

El desbaste de las muestras , para el caso del acero al carbono, se hace usando abrasivos grano 60, aunque para alargar el tiempo de uso de estos abrasivos usamos en primer instancias un abrasivo más grueso, como el grano 36, que elimina la suciedad inicial de las muestras. La muestra preparada, no debe tocarse con los dedos u otro objeto en su superficie limpia, pues debe ser analizada completamente seca y sin restos de grasa, huellas digitales y materias extrañas. Cuando se recibe la muestra caliente, se enfría con aire comprimido y luego se sumerge en agua antes de rectificarla, durante el rectificado la misma se calienta y se enfría de igual forma. Luego, se seca bien (con aire comprimido o paño limpio) y finalmente se rectifica ligeramente.

2.2.3 Realización de los análisis de composición química y de nitrógeno para el acero.

Para realizar el análisis de composición química y de nitrógeno el laboratorio

cuenta con varios equipos, de los cuales están en pleno funcionamiento dos como son el OBLF QSG 750-II y LECO TC-136.

El OBLF QSG 750-II como se muestra en la figura 2.12 es un instrumento para la determinación simultánea y multicanal de la composición química de una amplia gama de muestras metálicas. Para esto utiliza una chispa de alta energía producida bajo atmósfera de Argón inerte entre un electrodo y la muestra del material sometido al análisis. La chispa provoca en la superficie de la muestra la emisión de una radiación con las longitudes de onda características de cada elemento constituyente de la muestra. La radiación emitida pasa a través de una rendija primaria y experimenta, a través de una red de difracción, la separación de las distintas longitudes de onda correspondientes a los diferentes elementos que la componen, está pasa a través de la rendija secundaria 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. Además tiene la posibilidad de determinar a pesar de la composición química el contenido de Nitrógeno.



Figura 2.12 Equipo para realizarle al acero la medición de Composición Química OBLF QSG 750-II.

Este está constituido por cuatro partes fundamentales:

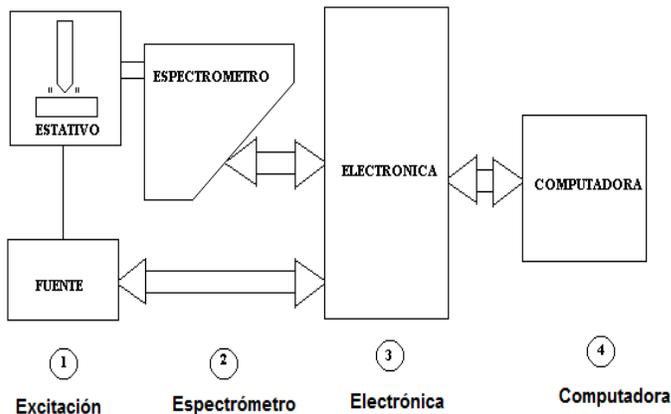


Figura 2.13 Esquema General de la Configuración del OBLF QSG 750-II.

1.- La excitación, compuesta por:

- Sistema de suministro de Argón.
- Sistema de enfriamiento mesa de análisis.
- Fuente HIREP II.
- Pulsador de aire a gap fijo.
- Estativo.

2.- El espectrómetro, compuesto por:

- Sistema de vacío.
- Sistema de calentamiento, homogenización y control de temperatura.
- Sistema óptico.
- Fotomultiplicadores y tarjetas de atenuadores.

3.- La electrónica, compuesta por:

- Fuentes de alimentación auxiliares.
- Rack electrónico y unidad central.
- Panel eléctrico distribuidor.
- Estabilizador de voltaje.

4.- La computadora, compuesta por:

- Unidad central.
- Monitor.
- Teclado.
- Impresora.
- Mouse.
- Software de sistema y software de aplicación IMPLUS.

Por otra parte tenemos el LECO TC 136 figura 2.14, este es un instrumento controlado por un microprocesador, determina simultáneamente Nitrógeno y Oxígeno (total en ambos casos) y posee un Horno de Electrodo EF-100.



Figura 2.14 Equipo para la medición de Nitrógeno y Oxígeno contenido dentro del acero LECO TC 136.

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

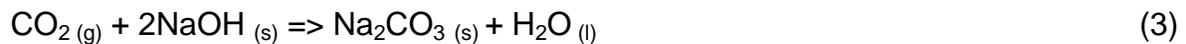
presentes en la misma. A temperatura muy alta (> 2000 °C) y en atmósfera inerte (He) el Oxígeno que se desprende de la muestra se combina con el Carbono del grafito del crisol para formar Monóxido de Carbono:



Los gases liberados de la muestra, son arrastrados por el gas portador y pasan a través del catalizador (CuO y Tierras Raras calientes), que convierte al Monóxido de Carbono (CO) en Dióxido de Carbono (CO₂):



Los gases pasan luego a través de la Celda IR, donde se detecta el CO₂. A continuación, el CO₂ es atrapado en el filtro con Ascarita (NaOH sobre base inerte) lo que genera vapor de agua que, a su vez, es retenida en el filtro con anhídrona (Mg(ClO₄)₂):



Tanto el CO₂ como el vapor de agua deben ser retenidos pues ambos serían detectados por la Celda de Termoconductividad (TC) y afectarían la medición de Nitrógeno. Finalmente, los gases remanentes pasan a través de la Celda TC que determina cualquier Nitrógeno presente. El Nitrógeno no es afectado (absorbido o retenido) por ninguno de los filtros o trampas (Catalizador, Ascarita o Anhídrona).

2.3 Materiales utilizados

Chatarra.

Durante la realización de los experimentos la empresa se encontraba con un déficit de chatarra para la producción por lo que trabajamos con fosos bajos o mínimo de contenido de chatarra en el foso de almacenamiento. La mayor parte de la chatarra que utiliza ACINOX- Las Tunas es de procedencia nacional y no cumple con la calidad requerida en cuanto al contenido de materiales contaminantes. El proceso comienza con la fusión de la chatarra donde la carga metálica debe ser de 67 t para obtener un rendimiento metálico en el orden de 88-89 % calculado por la siguiente ecuación:

$$R.M_{\text{chatarra}} = \frac{A_{c_l}}{C.M} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Dónde:

R.M. Chat.: Rendimiento metálico de la Chatarra, (%).

A_{c_l} : Acero líquido obtenido, t.

C.M.: Carga Metálica, t.

100%: Para la conversión de t - %.

Exigencias de Calidad de la Chatarra.

Para lograr producir un acero de alta calidad es importante que la chatarra cumpla con las siguientes exigencias:

1. Debe estar libre de elementos contaminantes (Cobre, Níquel, Cromo, Estaño, Plomo, Cobalto, etc.).
2. Deben estar limpias y libre de óxidos, tierra, pinturas, aceites, plásticos, madera, goma, hormigón, etc.
3. Debe tener el mínimo de impurezas como Fósforo y Azufre.
4. Debe estar libre de botellones con Oxígeno, para evitar explosiones.
5. Debe tener las dimensiones requeridas de 500*500*500mm, para facilitar el llenado de las cestas y la fusión en el Horno de Arco Eléctrico.

El cumplimiento de la clasificación y exigencias de calidad de la chatarra favorece el mínimo de aporte de Nitrógeno a la Carga y por consiguiente en el acero.

La Chatarra de Acero al Carbono Externa se clasifica en:

De acuerdo al Tipo:

- Chatarra de acero al Carbono Externa, que constituye aproximadamente el 88-90% de la carga total.

- Chatarra al Carbono Interna (generada internamente en la planta como por ejemplo el fondo de la artesa, metal derramado, pedazos de palanquillas y cabillas procedente del Laminador-200T, etc.

De acuerdo a su Densidad:

- Chatarra al Carbono Externa Ligera.
- Chatarra al Carbono Externa Mediana.
- Chatarra al Carbono Externa Pesada.

La chatarra al Carbono Interna se clasifica en:

- Chatarra al Carbono Interna Ligera.
- Chatarra al Carbono Interna Mediana.
- Chatarra al Carbono Interna Pesada.

Conclusiones del Capítulo

1. Se determinó un procedimiento experimental para el proceso de agitación con argón y nitrógeno, donde se prevé los parámetros y perturbaciones a tener en cuenta para la realización de este proceso.
2. La chatarra utilizada fue de baja calidad ya que se contaba durante el proceso con fosos bajos.
3. Se utiliza SIDOX-LFG como sustituto del aluminio y del carbono para la desoxidación y acondicionar la escoria.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos. Mediante la utilización del programa de cálculo Excel se representaran en forma de gráficos los principales resultados para validar nuestro trabajo.

3.1 Resultado del insuflado con Nitrógeno en el HC para la producción del acero FEE 500 en la empresa ACINOX Las Tunas.

Para la obtención de los resultados en base a la utilización del nitrógeno en HC como gas de agitación es necesario conocer cómo va a ser el comportamiento del Nitrógeno durante el proceso productivo.

3.1.1 Evaluación del comportamiento del Nitrógeno en el HAE.

Para la realización de la producción del acero en el HAE se siguieron los pasos demostrados en el Capítulo 2, donde se tomaron los parámetros que tienden a aumentar el contenido de nitrógeno en el baño metálico y que son de gran importancia para el proceso estos se representan en la siguiente figura.

Tabla 3.1 Principales parámetros tecnológicos en el HAE.

Parámetros Tecnológicos Horno de Arco Eléctrico.												
No.	No. Col.	Carga	Cons. Oxígeno	C-Carga (II)	C-Insuf. (IV)	C-Red. (IV)	Aporte "C" HAE	C-Vert. (III)	HAE	Tpo. Vert.	Tpo. T. HAE	Temp. Vert.
		(t.)	(Nm ³ O ₂)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	% N ₂ F.	(min.)	(min.)
1	8381	75,100	1100	300	346	0	535,23	60	0,0078	4	175	1629
2	8382	75,035	1052	300	361	150	667,02	80	0,0060	4	105	1607
3	8383	75,345	1293	300	332	0	523,77	60	0,0071	4	129	1618
4	8384	75,004	822	300	445	100	695,93	100	0,0078	4	111	1616
5	8385	75,722	1222	246	260	0	419,47	60	0,0069	5	131	1604
6	8387	76,029	1489	319	360	0	562,65	40	0,0078	4	110	1641
7	8388	75,338	1301	360	149	0	424,41	40	0,0067	4	121	1627
8	8389	75,312	1583	369	288	0	545,73	40	0,0065	4	110	1615
9	8374	75,196	874	202	449	120	632,80	100	0,0061	4	115	1617
10	8391	75,178	1277	349	569	0	758,90	40	0,0075	4	119	1640
11	8393	72,749	1270	300	348	0	536,86	60	0,0047	4	139	1649
12	8394	75,265	1510	352	459	100	751,08	60	0,0067	4	293	1635
13	8367	75,315	1355	307	213	0	432,26	0	0,0065	4	112	1617
14	8373	85,186	924	250	230	0	398,28	80	0,0059	5	100	1635
15	8376	75,055	1329	370	76	0	373,07	40	0,0067	4	106	1615
16	8392	75,025	1578	300	283	0	483,67	40	0,0062	4	274	1655
17	8396	75,200	1724	370	512	200	889,25	60	0,0063	4	177	1615
18	8397	75,784	1489	400	630	200	1011,03	60	0,0058	4	196	1635
19	8398	75,174	849	300	340	0	530,32	60	0,0068	4	123	1653
20	8372	75,650	1080	260	300	0	463,97	20	0,0056	5	81	1610
21	8377	75,206	1621	302	298	0	497,62	60	0,0068	4	142	1610

El contenido del Nitrógeno en el HAE depende en gran medida de la de la calidad de la carga metálica, la cual fue 100% de chatarra al carbono como única fuente de hierro. Para el proceso de ACINOX-Las Tunas la carga metálica debe ser de 67 t para obtener un rendimiento metálico en el orden de 88-89%. Durante la realización de las pruebas la carga metálica fue de 76 t/col, para un exceso de chatarra en la carga de 9 t/col, debido a la baja disponibilidad y la mala calidad en cuanto a la contaminación de la chatarra almacenada en los fosos. Por tal razón se hizo necesario subir la carga de 67 t a 75 t, esto se demuestra que para la realización de la carga metálica fue necesario añadir otra cesta como se

representa en el Anexo 5, utilizando la tabla del Anexo 6 sobre acero líquido obtenido y la ecuación 7 se puede calcular el rendimiento metálico de la chatarra:

$$R.M.chatarra = \frac{Ac_{Liquido(t)}}{C.M} \cdot 100 \% = \frac{1321,172}{1588,868} \cdot 100 = 83,15 \%$$

El rendimiento metálico de la chatarra es de 83.15%, esto nos evidencia en las condiciones en cuanto a la mala calidad de la chatarra con la que contábamos, por lo que fue necesario añadir más chatarra para compensar las pérdidas metálicas por tener bajo rendimiento de la chatarra.

El contenido de nitrógeno en el acero líquido en el proceso del HAE oscila entre 50-70 ppm, aunque durante las pruebas realizadas a las 21 coladas, el promedio fue de 70 ppm, (figura 3.1), superando la media el máximo de asimilación permisible. Este aumento es proporcional a la baja calidad de la chatarra con la que se contaba además del aumento del porcentaje de carga al HAE.

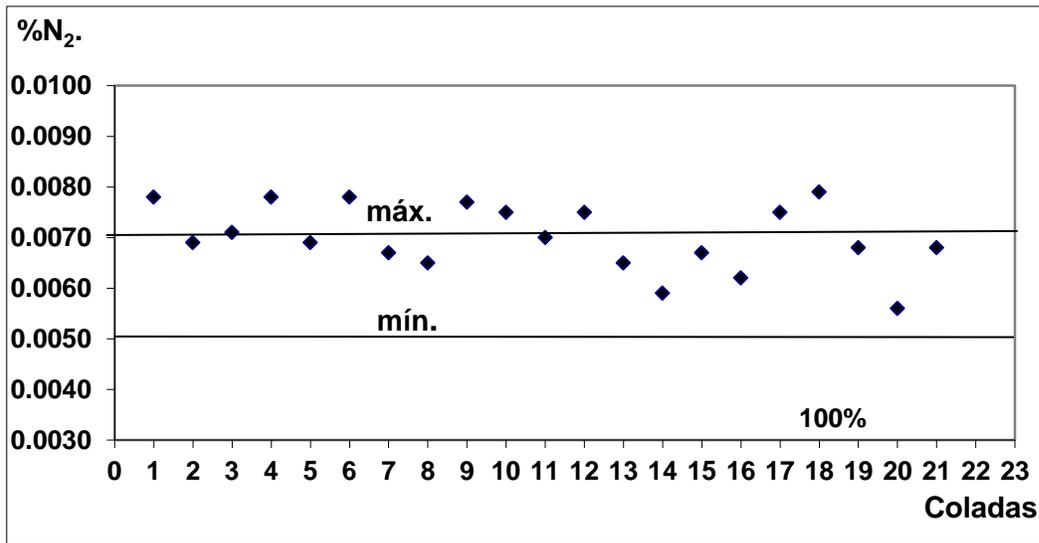


Figura 3.1 Variación del contenido de N₂ en el acero en HAE

Según la metodología expresada el porcentaje de carbono en el acero dentro del HAE está en dependencia de la cantidad de carbono insuflado para la creación de la escoria espumosa. Otro aporte de carbono es el utilizado para la desoxidación

del acero, en la figura 3.2 se demuestra el comportamiento del nitrógeno con respecto a la cantidad de carbono introducido dentro del HAE.

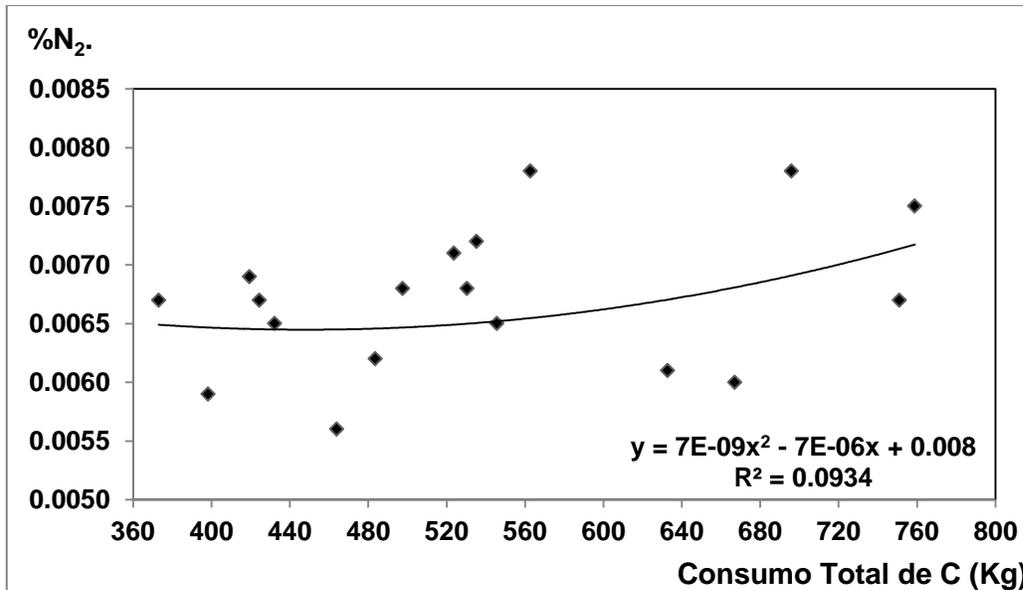


Figura 3.2 Comportamiento del [%N₂] al final del proceso HAE con relación al consumo de carbón total consumido en HAE.

Es apreciable la tendencia al aumento del contenido de nitrógeno en el Acero Líquido según el consumo de carbón en HAE aumenta. Aunque de todos los materiales utilizados en el proceso de elaboración de aceros en hornos eléctricos el carbono es el que tiene mayor contenido de nitrógeno, no siempre aportará nitrógeno según su uso. Esto se debe a que el consumo de carbono insuflado es proporcional al consumo de oxígeno para la realización de una buena escoria espumosa, por lo que el comportamiento del contenido de nitrógeno tiende a variar como se muestra en la figura 3.3.

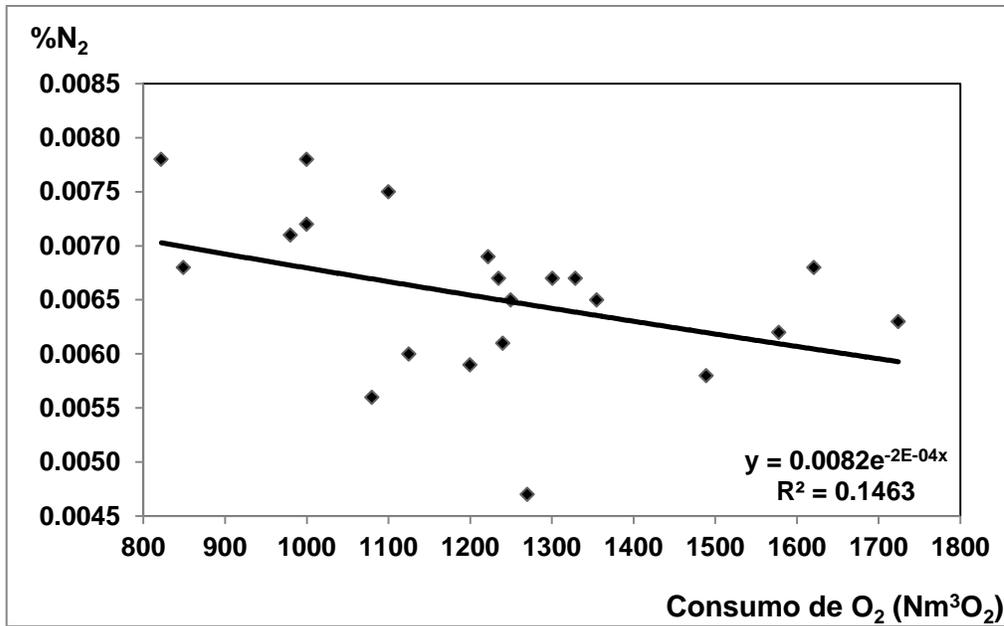


Figura 3.3 Comportamiento del [%N₂] antes del vertido en relación al Consumo de Oxígeno en HAE.

Como expresa en la figura anterior, a medida que se aumenta el contenido de oxígeno insuflado dentro del metal líquido el contenido de nitrógeno disminuye. Esto se explica por el carácter del carbono como inhibidor de nitrógeno al reaccionar con el oxígeno y formar las burbujas de “CO”.

El tiempo total de proceso planificado para el HAE es de 100 minutos, pero debido al envejecimiento del equipamiento del mismo este tiempo de proceso tiende a ser mayor. Esto pudiera traer consigo mayor presencia de nitrógeno en el acero, aunque depende en mayor medida de la eficiencia con que se haya realizado el proceso. En la figura 3.4 se refleja la tendencia del nitrógeno con respecto al tiempo de proceso de fusión, ajuste y calentamiento del acero.

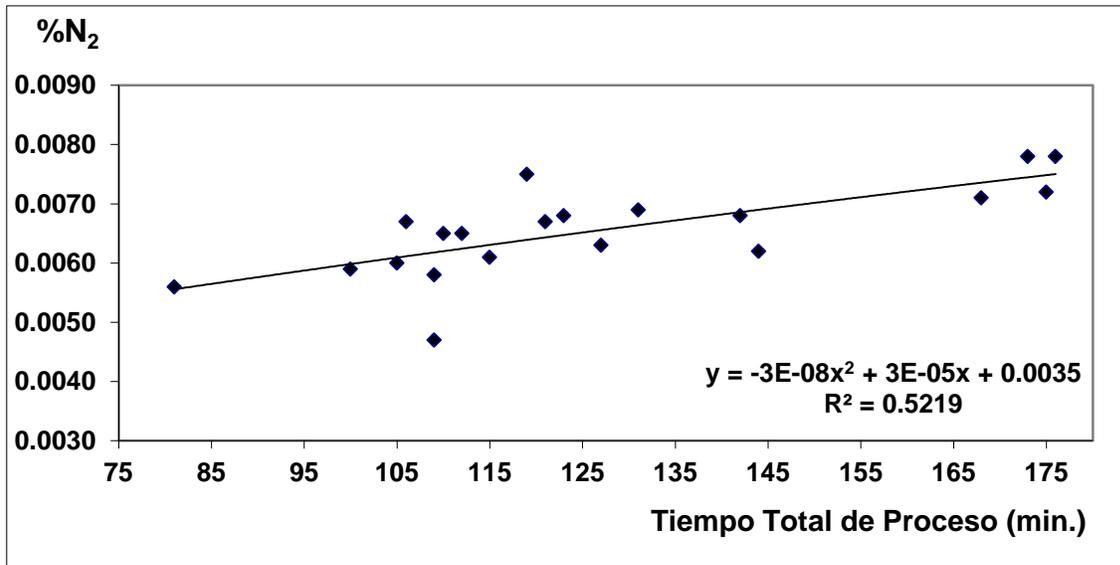


Figura 3.4: Variación del contenido de N₂ en el acero respecto al tiempo de proceso.

El contenido de nitrógeno dentro del baño metálico no solo depende del tiempo de proceso ya que tiene íntima relación con la temperatura del baño metálico como se muestra en la siguiente figura.

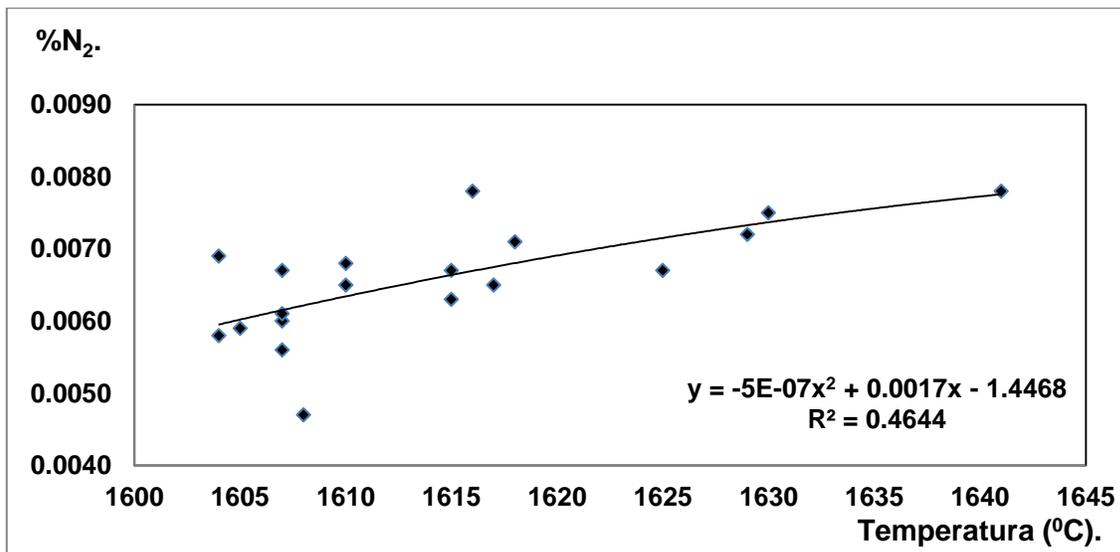


Figura 3.5 Variación del contenido de nitrógeno respecto la temperatura

Como se muestra en la figura anterior para las altas temperatura el contenido de nitrógeno en el baño metálico aumenta, ya que el nitrógeno a temperaturas mayores de 1600 °C es tiene mayor solubilidad en el acero lo que tiende a aumentar su contenido dentro del mismo, por lo que a mayor temperatura y mayor tiempo de proceso mayor va a ser el contenido de nitrógeno en el metal líquido.

3.1.2 Ajuste del acero líquido durante el vertido y en HC.

Durante el vertido del acero a la Cuchara se realiza un ajuste al 80 % mediante la adición de ferroaleaciones. El rendimiento del Mn siempre en HC va a ser mayor de 100% por la reducción de %Mn de la escoria procedente del HAE y oscila entre 105 -110 %; por las medidas tomadas en HAE se benefició la reducción del %Mn más la adición en vertido de SIDOX-LFG que comienza a acondicionar la escoria. El rendimiento del silicio para el FEE500 oscila entre 50-53%, el carbono entre 50-55%; por lo tanto existe una mejor rendimiento de los materiales y elementos adicionados con relación a los que se estaba obteniendo, así como la Tasa de Desulfuración estaba entre 50 - 55% lo cual existe un aumento.

3.1.3 Evaluación del comportamiento del nitrógeno en HC e IVC.

Para la utilización del nitrógeno como gas de agitación fue necesario controlar todos los parámetros que tienden a aumentar el contenido de nitrógeno en el baño metálico y que son de gran importancia para el proceso, los pasos a seguir para la utilización del nitrógeno como gas de agitación fueron los descritos en el capítulo 2 para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.2 Comportamiento del contenido de nitrógeno durante el proceso de producción.

No.	Col.	HAE	% N ₂			Tpo. Insuf. (min.)		Aporte. "C" en HC	T. máx.	% N ₂ IVC
		% N ₂ Final.	Inic. Insuf.	Final Insf.	Final HC.	N ₂	Ar	(kg)	(°C)	
1	8381	0,0078	0,0093	0,0102	0,0099	10	74	79,68	1633	0,0105
2	8382	0,0055	0,0091	0,0095	0,0091	11	67	111,552	1634	0,0101
3	8383	0,0066	0,0078	0,0081	0,0083	10	37	135,456	1620	0,0092
4	8384	0,0070	0,0081	0,0088	0,0090	11	85	175,296	1636	0,0103
5	8385	0,0063	0,0075	0,0084	0,0085	10	68	143,424	1636	0,0091
6	8387	0,0085	0,0082	0,0101	0,0103	20	80	91,632	1632	0,0103
7	8388	0,0065	0,0070	0,0087	0,0094	20	49	131,472	1630	0,0096
8	8389	0,0064	0,0079	0,0094	0,0096	22	37	119,52	1631	0,0099
9	8374	0,0052	0,0072	0,0101	0,0105	31	18	95,616	1626	0,0116
10	8391	0,0063	0,0075	0,0089	0,0099	30	30	71,712	1628	0,0101
11	8393	0,0047	0,0072	0,0088	0,0101	30	50	167,328	1635	0,0104
12	8394	0,0065	0,0073	0,009	0,0103	30	57	152,9856	1640	0,0109
13	8367	0,0065	0,0074	0,0096	0,0113	40	20	15,936	1636	0,0121
14	8373	0,0059	0,0076	0,0098	0,0114	40	25	127,488	1627	0,0123
15	8376	0,0067	0,0073	0,0098	0,0104	44	63	103,584	1625	0,0100
16	8392	0,0062	0,0078	0,0110	0,0116	41	30	191,232	1630	0,0122
17	8396	0,0063	0,0078	0,0108	0,0118	40	35	207,168	1630	0,0118
18	8397	0,0058	0,0075	0,0102	0,0112	42	16	103,584	1618	0,0117
19	8398	0,0057	0,0072	0,0105	0,0111	40	46	127,488	1629	0,0115
20	8372	0,0056	0,0073	0,0128	0,0133	52	24	63,744	1634	0,0143
21	8377	0,0068	0,0087	0,0136	0,014	66	20	97,2096	1622	0,0152

Durante el vertido del acero del HAE a la cuchara siguiendo los pasos establecidos se obtuvo un tiempo promedio de 4 minutos y una temperatura promedio de 1620 °C, con el fin de que la asimilación del nitrógeno en el acero fuera la menor posible y que el metal líquido tuviese el menor tiempo de contacto posible con los gases presentes en la atmósfera. A pesar de que se trabajó minuciosamente el vertido, siempre va aumentar el contenido de nitrógeno porque la piquera con la que cuenta el HAE es convencional y el chorro de metal líquido queda descubierto a los gases de la atmósfera.

Proceso de agitación del acero con nitrógeno en HC.

Para la agitación del acero en HC se realizó según los pasos planteados en la metodología experimental, estos fueron realizar la agitación del acero durante un tiempo de 10; 20; 30; 40; 50 y 60 minutos con nitrógeno y el resto del tiempo se realizaría con argón. Las muestras del contenido de nitrógeno se tomaron a inicio del proceso de HC luego de realizar la agitación durante cada tiempo planificado y antes de realizar él envió de la cuchara a la IVC. Todos los valores que fueron tomados se muestran en la tabla 3.2 para los cuales se tomó un valor promedio para cada tiempo como se ve en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Contenido promedio de nitrógeno para los diferentes tiempos planificados.

Para 10 min	tiempo	11,6	21,6	58,6
	ppm	0,00842	0,009	0,0090
Para 20 min	tiempo	21	41	81
	ppm	0,0077	0,0094	0,0097
Para 30 min	tiempo	5,25	35,25	73,25
	ppm	0,0073	0,0092	0,0102
Para 40 min	tiempo	4	44	75
	ppm	0,0076	0,0102	0,0113
Para 50 min	tiempo	3	55	85
	ppm	0,0073	0,0128	0,0133
Para 60 min	tiempo	2	68	86
	ppm	0,0087	0,0136	0,014

Luego se graficaron para conocer cómo va a ser el comportamiento de nitrógeno durante el proceso de agitación en HC para los diferentes tiempos planificados.

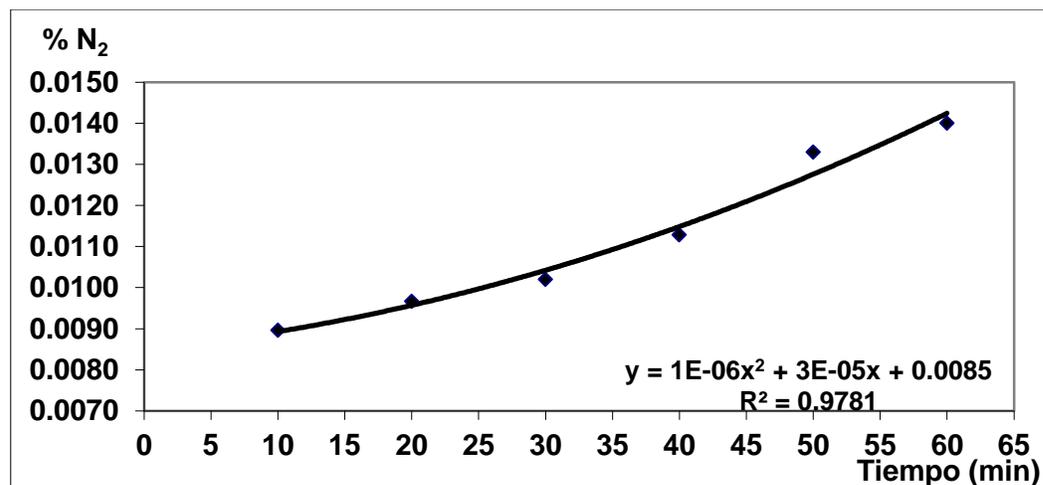


Figura 3.6 Comportamiento del [%N₂] promedio durante los tiempos planificados.

En la figura se muestra cómo va a ser la tendencia del contenido de nitrógeno en el acero para los diferentes tiempos planificado, en este se observa que a medida que se aumenta el tiempo de insuflado con nitrógeno va a aumentar el contenido del mismo en el acero, teniendo una relación entre tiempo y contenido, como se representan en las siguientes gráficas el contenido de nitrógeno depende principalmente del tiempo de insuflado con nitrógeno.

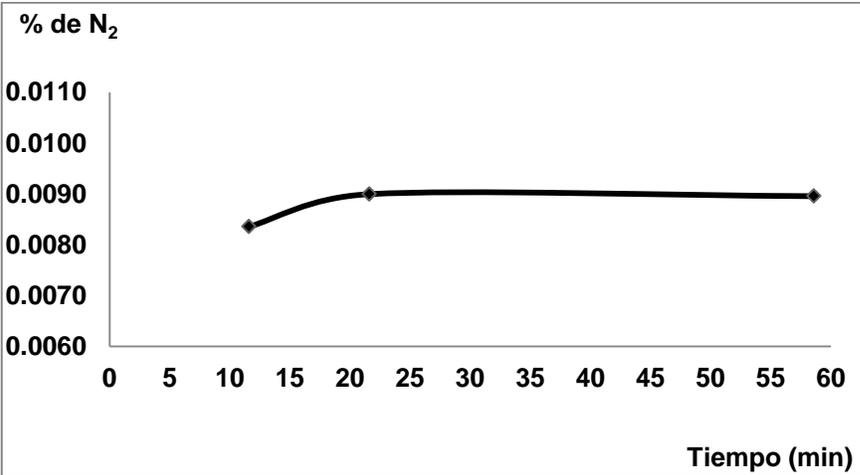


Figura 3.7 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 10 m.

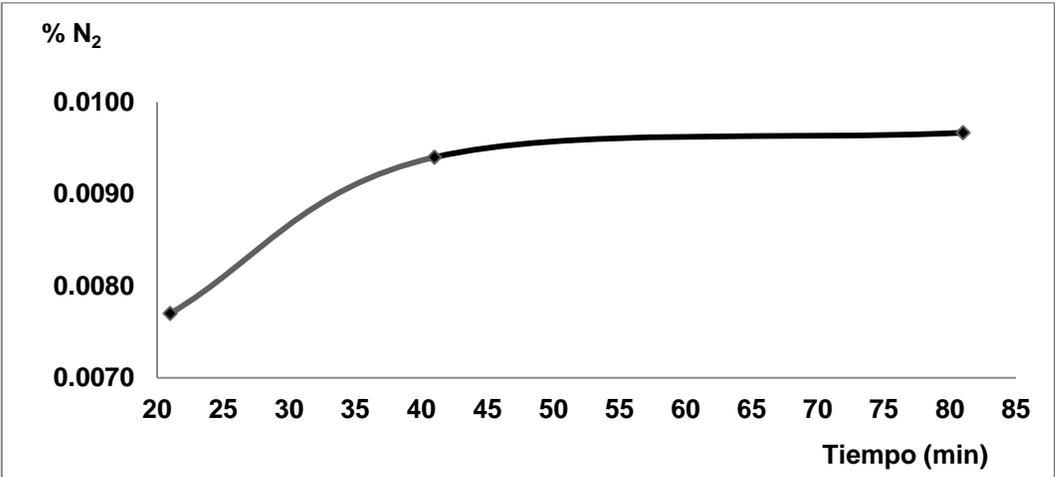


Figura 3.8 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 20 m.

En las figuras 3.7 y 3.8 se observa que el contenido de nitrógeno tiende a aumentar durante el tiempo de insuflado con nitrógeno pero luego de transcurrir el tiempo la tendencia que tiene es a ir disminuyendo. Esto ocurre ya que los gases que se encuentran en el acero líquido pasan al seno de las burbujas de argón y a su vez estas son arrastradas fuera del baño metálico a esto se le llama decantación de gases, por lo que a mayor tiempo de agitación con argón la tendencia que va a tomar el contenido de nitrógeno dentro del acero es a disminuir. Esto se puede observar en la siguiente gráfica.

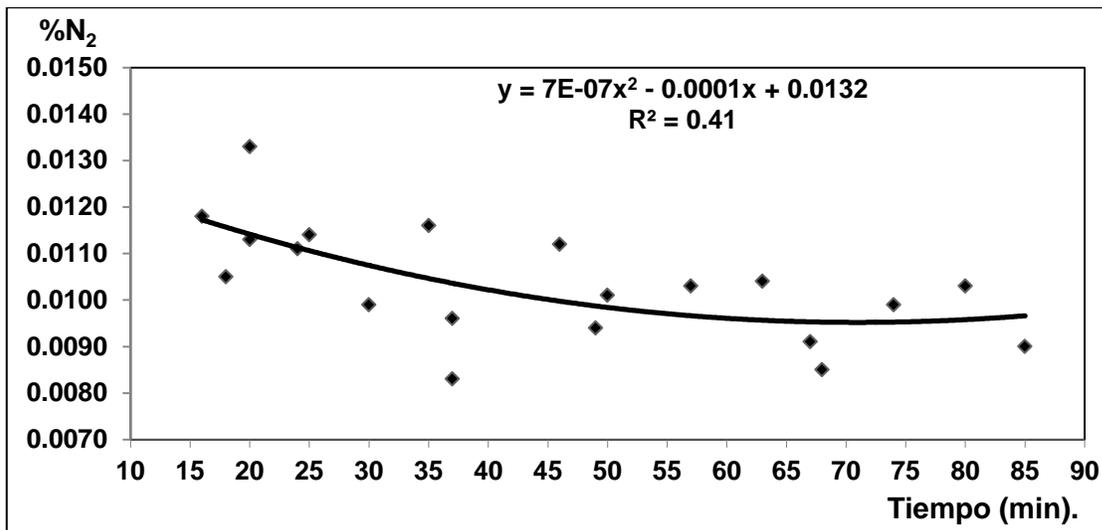


Figura 3.9 Comportamiento del [%N₂] final en HC en relación al tiempo total de insuflado con Ar.

En esta figura se demuestra lo anterior ya que a mayor tiempo de insuflado con argón menor va a ser el contenido final de nitrógeno en el acero líquido.

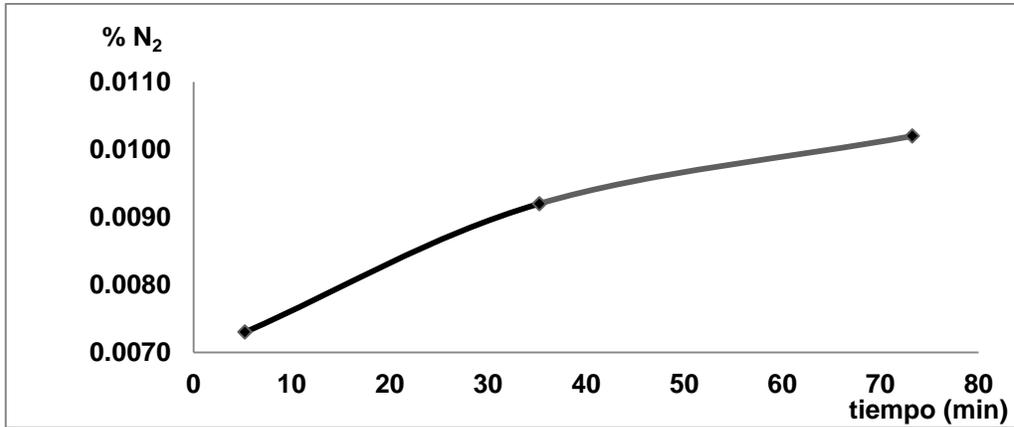


Figura 3.10 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 30 m.

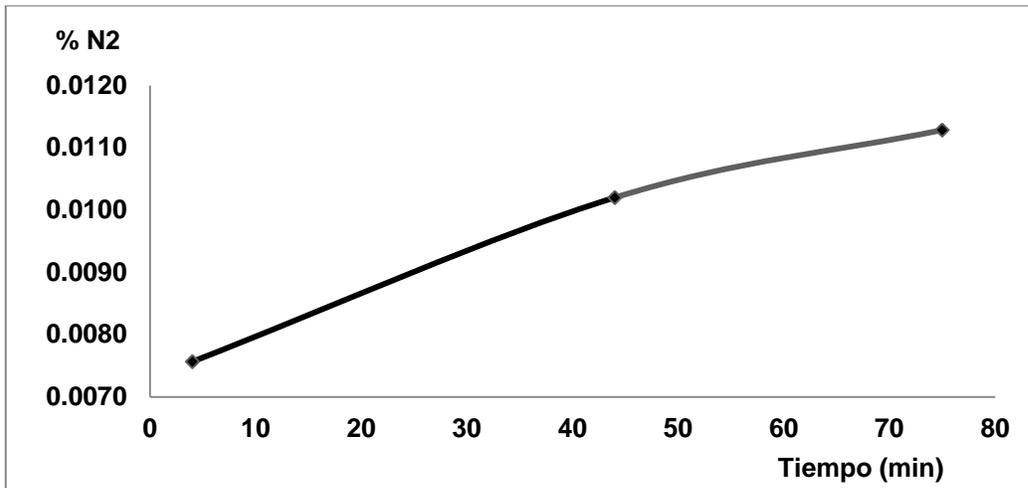


Figura 3.11 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 40 m.

En las figuras anteriores se muestra como el contenido promedio de nitrógeno tiende a aumentar ya que el tiempo de agitación con argón es menor y no existe una gran cantidad de arrastre de gases por lo que para este tiempo el contenido de nitrógeno es mayor pero no supera los 120 ppm.

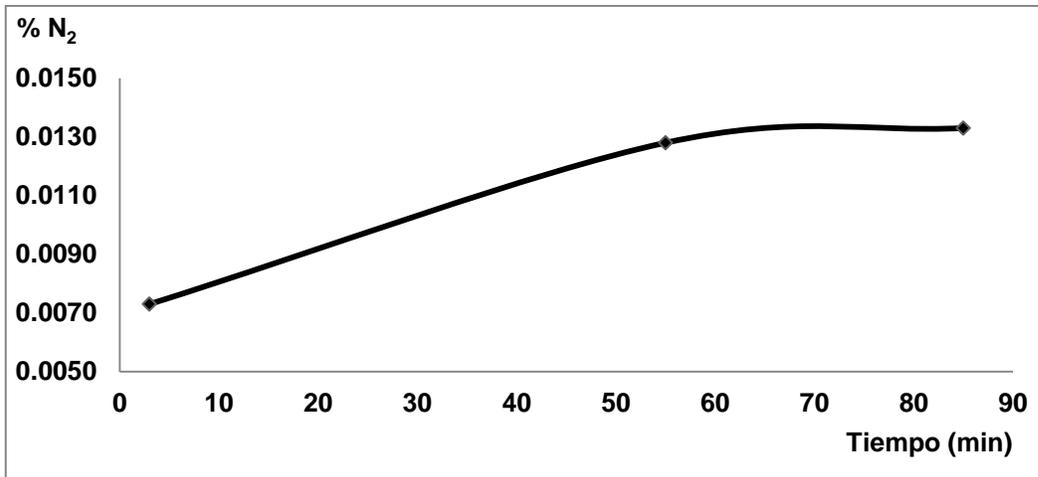


Figura 3.12 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 50 m.

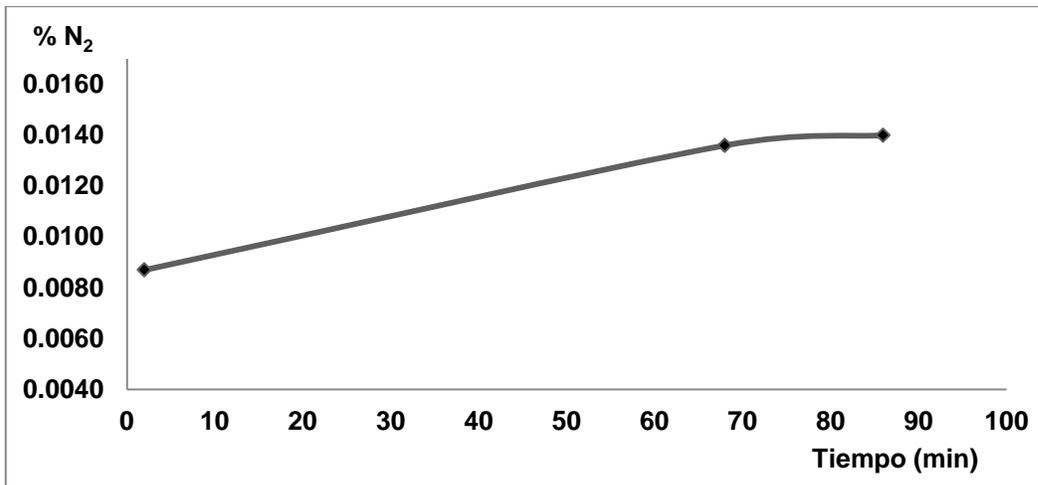


Figura 3.13 Comportamiento del contenido de nitrógeno promedio para el insuflado de 60 m.

En estas gráficas se puede observar que el contenido de nitrógeno dentro del acero va a ser mayor a los 120 ppm superando el límite exigido por el cliente, además el contenido de nitrógeno es mayor ya que es menor el tiempo de insuflado con argón pero la tendencia no es de aumentar rápidamente ya que para cada tiempo se realizaron de 1 a 3 ajustes además de la desulfuración los cuales

se realizaron a altas presiones de insuflado provocando una mayor cantidad de arrastre de gases hacia el exterior del baño metálico.

La solubilidad del nitrógeno en el acero no depende solamente de la utilización del nitrógeno como gas de agitación pero en el proceso de HC es el que mayor contenido aporta en el acero. En la siguiente figura se mostrara como fue el comportamiento del nitrógeno durante todas las coladas.

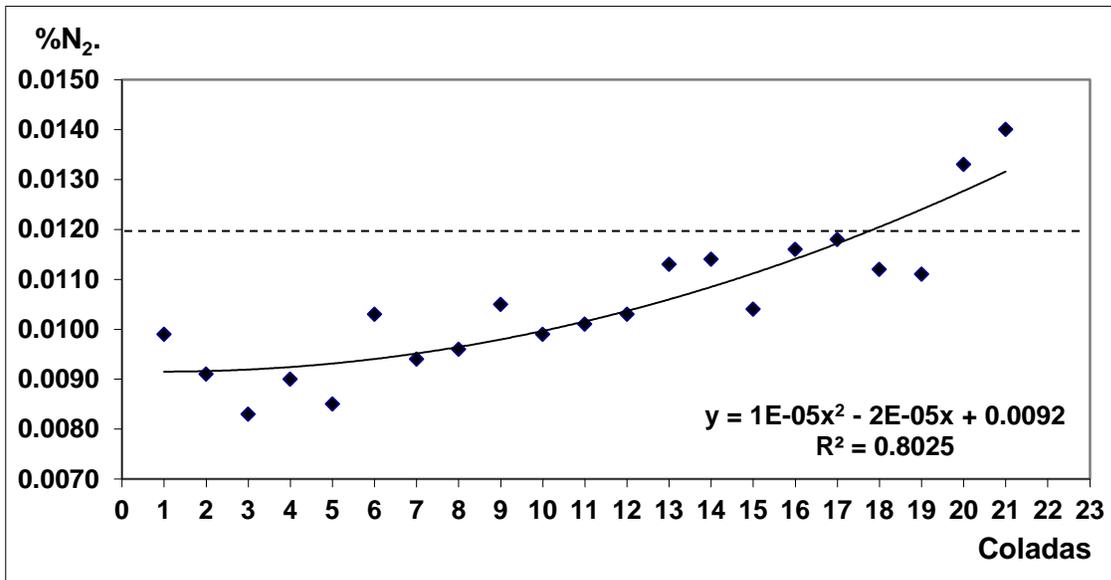


Figura 3.14 Comportamiento del [%N₂] final en HC para las diferentes coladas.

En la figura se muestra cómo es que existe una correlación entre el contenido de nitrógeno con el tiempo de insuflado en HC, a mientras mayor sea el tiempo de insuflado mayor va a ser la asimilación en el acero líquido. El consumo de argón y nitrógeno son de gran importancia ya que ambos están en constante relación como se muestra a continuación.

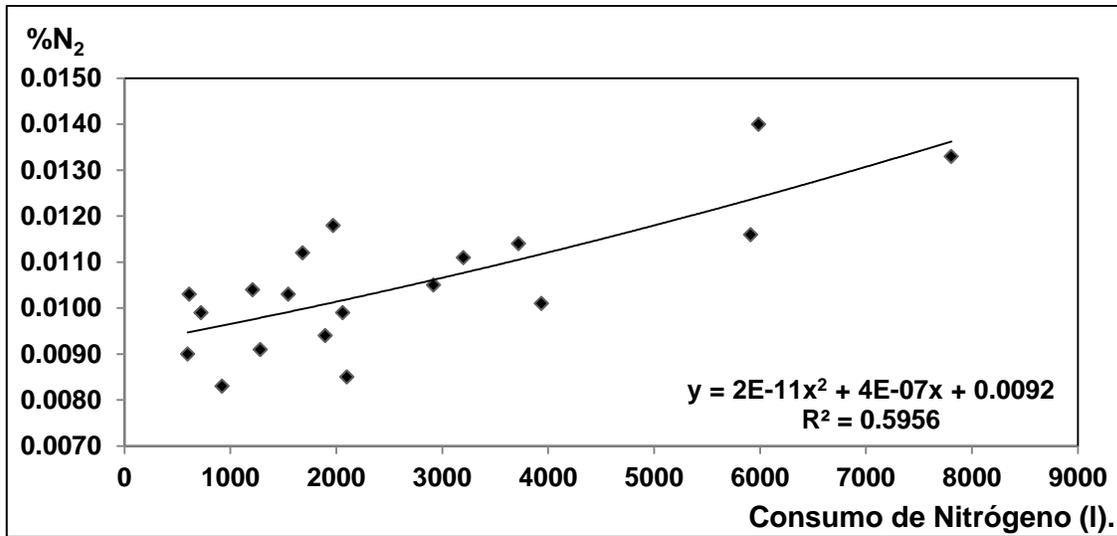


Figura 3.15 Comportamiento del [%N₂] final en HC en relación al consumo total de nitrógeno durante el proceso.

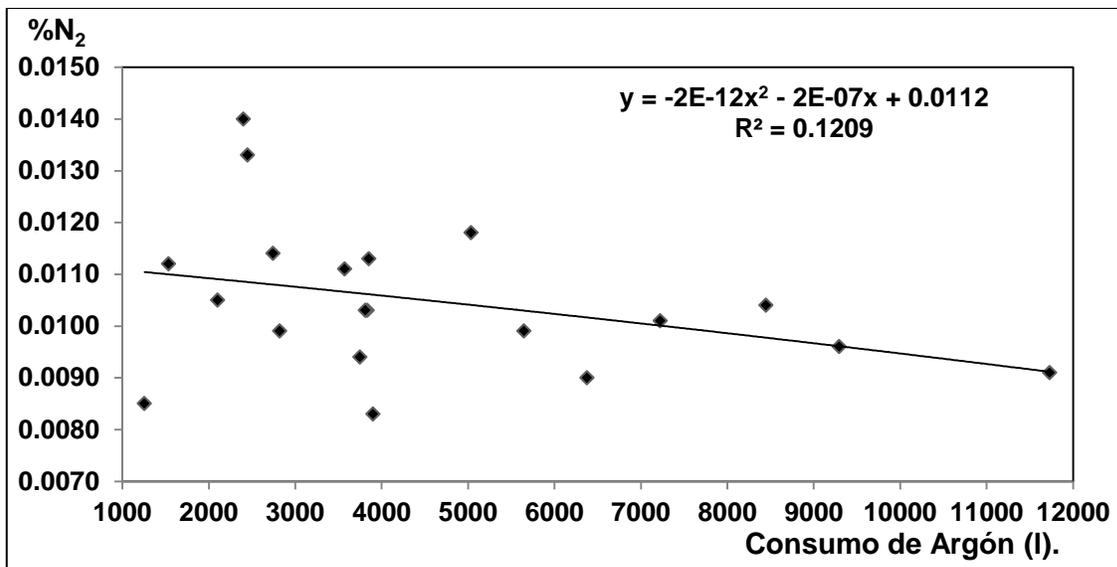


Figura 3.16 Comportamiento del [%N₂] final en HC en relación al consumo total de argón durante el proceso.

Mediante esta gráfica se demuestra que a medida que aumenta el consumo de nitrógeno gran parte de este se queda atrapada en el acero líquido pero en relación a este, a medida esta gráficas va aumentando el contenido de nitrógeno

va disminuyendo ya que gran cantidad de argón arrastra las burbujas de nitrógeno hacia la atmósfera exterior.

Luego de que el acero es ajustado en cuanto a composición química y se realiza la desulfuración entonces se aumenta la temperatura para enviar el acero a la IVC y obtener el producto final. Cuando la cazuela llega a la instalación esta vierte a la artesa y se tomó la muestra final del contenido de nitrógeno para obtener la certificación del producto final, durante el traslado hay una pequeña pero notable variación entre los contenidos de nitrógeno, está dado ya que antes de enviar la cuchara a la IVC se le adiciona al espejo metálico una cierta cantidad de ceniza de paja de arroz con el objetivo de acondicionar la escoria provocando junto al traslado y el vertido a la artesa que exista un aumento del contenido de nitrógeno en la estructura del acero. Obteniéndose un resultado del contenido de nitrógeno para los diferentes tiempos de insuflado como se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.3 Contenido promedio de nitrógeno final IVC

Tiempo Total de Proceso.	
Tiempo (min)	% de N₂
10	0,0098
20	0,0099
30	0,0107
40	0,0116
50	0,0143
60	0,0152

Como bien se demuestra en la tabla anterior se puede apreciar cual es el contenido final de nitrógeno en el acero, siendo los tiempos de 10 a 40 minutos los que están por debajo del contenido de nitrógeno final permisible, por lo que se puede insuflar en los aceros FEE 500 hasta los 40 minutos.

3.2 Valoración económica.

Costos de las pruebas realizadas:

El costo promedio de una tonelada de acero de estas marcas esta por los 198 cuc/t, como contamos con una cantidad de 5 coladas fuera del parámetro exigido por el cliente lo cual nos da una pérdidas por rechazos de acero fuera de especificaciones de 24% por lo que

$$P_{Rechazos} = \frac{C_{Promedio}}{100} \cdot P_{Fuera Especificaciones}$$

$$P_{Rechazos} = \frac{198}{100} \cdot 24$$

$$P_{Rechazos} = 47,52 \text{ cuc/t}$$

Para producir estas marcas de acero con la tecnología de la empresa de ACINOX Las Tunas, para la cantidad de 21 coladas el 30% estarían fuera de las especificaciones de exigencia del cliente y constituirían por tanto rechazos de la producción con una pérdida de 47,52 cuc/t. Como vemos, es sencillamente imposible aceptar estas pérdidas por concepto de rechazos productivos por aceros fuera de especificaciones del cliente.

Costo de producción del Ar y N₂:

Como se muestra en la tabla del Anexo 9 sobre el costo de la producción de Ar y N₂, se puede calcular cuánto va a ser el ahorro por tonelada de acero producido, para la realización de los cálculos nos basamos en que:

1. Para hallar el consumo de Argón se tuvo en cuenta los siguientes consumos:

- Consumo de Argón durante el tiempo insuflado (Vertido y HC).
- Consumo de Argón durante la Desulfuración.

- Consumo de Argón durante los ajustes. Se dan pequeños toques de alta presión.
2. Cada vez que se realiza un ajuste, se da una pequeña alta presión de agitación
 3. El valor de conversión fue de: 1 litro líquido = 0.841 Nm³ litros gaseoso.

Los valores obtenidos son reflejados en la tabla del anexo 10.

Utilizando la siguiente tabla se puede calcular el precio del consumo de argón y Nitrógeno para las 21 coladas y por tonelada de acero producido, utilizando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Consumo } \frac{N_2}{t} = \frac{\text{Consumo total de } N_2}{\text{Acero líquido obtenido}} = \frac{Nm^3}{t} \cdot \text{precio } N_2(\text{cuc})$$

$$\text{Consumo Ar/tonelada} = \frac{\text{Consumo total de Ar}}{\text{Acero líquido obtenido}} = \frac{Nm^3}{t} \cdot \text{precio } N_2(\text{cuc})$$

Tabla 3.8 Consumos de Argón y Nitrógeno por coladas y por toneladas producidas.

CONSUMO DE Ar y N ₂					Precio del N ₂ (cuc / t)	Precio del Ar (cuc / t)	Ac. Liq. Final (t.)
Col.	N ₂ (Nm ³)	Argón (Nm ³)	Consumo de N ₂ (Nm ³) / t.	Consumo de Ar (Nm ³) / t.			
1	1,54	9,21	0,02	0,15	0,01	0,69	61,7
2	2,34	16,44	0,04	0,27	0,01	1,26	60,89
3	1,82	4,64	0,03	0,08	0,01	0,37	58,67
4	1,61	7,58	0,03	0,13	0,01	0,60	59,11
5	3,51	3,16	0,06	0,05	0,02	0,23	62,83
6	1,38	7,89	0,02	0,12	0,01	0,56	65,59
7	3,47	7,79	0,06	0,13	0,02	0,59	60,89
8	13,01	14,59	0,21	0,23	0,06	1,08	62,57
9	4,69	5,00	0,07	0,08	0,02	0,36	64,62
10	3,46	5,85	0,06	0,09	0,02	0,44	62,18
11	6,40	11,92	0,11	0,20	0,03	0,94	58,68
12	2,72	7,03	0,04	0,10	0,01	0,48	68,67
13	14,40	7,08	0,20	0,10	0,06	0,47	70,35
14	5,84	4,93	0,09	0,07	0,02	0,34	66,46
15	2,49	12,54	0,03	0,17	0,01	0,77	75,59
16	9,24	40,95	0,16	0,69	0,04	3,20	59,58
17	3,58	5,99	0,06	0,11	0,02	0,50	55,73
18	2,92	3,49	0,04	0,05	0,01	0,25	65,16
19	5,34	8,41	0,09	0,13	0,02	0,62	62,83
20	11,70	6,24	0,21	0,11	0,06	0,53	54,49
21	9,09	5,35	0,21	0,12	0,06	0,58	43,13
Total	110,58	196,08			0,50	14,86	1300

Por lo que el precio por el consumo de Ar y N₂ se puede calcular por las siguientes ecuaciones:

Para determinar el consumo total del Ar para las 21 coladas se calcula por la siguiente ecuación:

$$C.T_{cons.Ar} = Consumo\ total\ de\ Ar \cdot Precio\ de\ Ar$$

$$C.T_{cons.Ar} = 912\ cuc$$

Para determinar el consumo total del N₂ para las 21 coladas se calcula por la siguiente ecuación:

$$C.T_{cons.N_2} = Consumo\ total\ de\ N_2 \cdot Precio\ de\ N_2$$

$$C.T_{cons.N_2} = 30\ cuc$$

Si se utilizara para la agitación del acero todo el tiempo Ar el precio por el consumo obtenido fuese sido de 1426 cuc. Como el proceso de obtención de nitrógeno es menos costoso que el de producción de Ar, y nuestro proceso se realizó para la utilización una mezcla de insuflado con Ar combinado con N₂, el proceso es más económico que la utilización de Ar como gas de agitación, lo que provoca que haya un ahorro de 514 cuc durante la producción del acero

Conclusiones del Capítulo

1. Se constató el aumento del contenido de nitrógeno en el acero líquido según el consumo de carbón en HAE aumenta, el cual es contrarrestado con el soplado estequiométrico de oxígeno para la formación de la escoria espumosa.
2. Se determinó que para la elaboración de los aceros limitado con nitrógeno hasta 120 ppm es importante que la chatarra sea clasificada y cumpla con las exigencias requeridas. Durante las pruebas realizadas a las 21 coladas el contenido de nitrógeno en el acero líquido en el proceso del HAE mantuvo un promedio fue de 70 ppm.
3. Se demostró que existe una pérdida de 48 cuc provocado por haber un 5% de coladas fuera de marca, pero hay un ahorro de 514 cuc en la sustitución del argón por nitrógeno durante el proceso.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se determinó que el tiempo útil de insuflado con nitrógeno para la agitación del acero es de 40 minutos máximo. Este tiempo representa el mayor consumo de nitrógeno manteniendo la presencia de este gas en el acero por debajo de 120 ppm.
2. Se demostró que los factores que más afectaron la concentración de nitrógeno en el acero fueron: el tiempo de insuflado con nitrógeno, la atmósfera, la chatarra, el carbón, oxígeno y el argón.
3. Se constató mediante pruebas de composición química, que el acero FEE 500 cumple con la norma exigida por el cliente.

RECOMENDACIONES

1. Lograr tiempos de proceso en HC < 90 min, para lo cual es necesario planificar bien los Ciclos Productivos, además de contar con mayor disponibilidad de Oxígeno y mayor Potencia en el HAE para disminuir los tiempos de proceso.
2. Disponer con mayor cantidad de chatarra, de forma tal que los fosos se encuentren con alto nivel de chatarra y crear una instalación para la limpieza de la carga metálica.
3. Trabajar con temperaturas de vertidos y temperaturas de proceso de HC (temperatura de Desulfuración) más bajas posibles, además del uso de Carbonato (CaCO_3) en el HAE mezclado con Cal (CaO) metalúrgica para aumentar la producción de burbujas de "CO".

BIBLIOGRAFIA

1. Barcenas, A. C. (2010). Fabricación de acero. Universidad de Santiago de Chile.
2. Berciano, J. L. E. (2000). Monografías sobre Tecnología del acero, Parte II.
3. Berciano, J. L. E. (2007). Fabricación de acero. Metalurgia Secundaria. Universidad Politécnica de Madrid.
4. Botella, R. S. y. (1998). Efecto del contenido de azufre y del grado de desoxidación sobre la ductilidad en caliente de aceros inoxidable austeníticos resulfurados en estado de solidificación. *Revista de Metalurgia*.
5. D. L. Schroeder. (1991). Use of Energies in Electric Steelmaking Shops, Electric Furnace Conference Proceedings 49 (Warrendale: Iron and Steel Society, .
6. Dieter N., A. Barrientos, T. Moreno, M. Peredo, R. Saavedra; “Disminución de las pérdidas metálicas en la acería de Gerdau AZA – Planta Colina”; 14 to Seminario de Acería y 4 to Seminario de Reducción del IAS – 2003; pp. 527-536.
7. E. Inagaki, I. K., and M. Ichikawa. (1988). “Integrated Oxygen Enrichment Control to Attain. Maximum Overall Economy in Steelmaking Arc Furnaces,” (Malaga, Spain: 11th International Electric Melting Conference).
8. Fruehan R.; “Refining Strategies of Optimization for Phosphorus and Nitrogen control”; Department of Material Science and Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
9. Garcia, A., (1989). Técnicas de soplado para la metalurgia en cucharas. (DIDIER, S.A., Lugones Asturias)
10. García, C., Lisca, L. H. S., Martínez, A. A., Aguila, Y. B., Escobar, I. M. L., & Rosa, S. d. I. ((2005)). Tecnología para la elaboración de crisoles de hierro gris resistentes a las altas temperaturas para la fusión de aleaciones de aluminio. from <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/tecnologia-elaboracion-crisoles-hierro/tecnologia-elaboracion-crisoles-hierro.shtml>

11. IAS Steelmaking Conference, 2005, San Nicolas, Argentina
12. J.M, F., J.; IASHERAS. (1991). Ciencia de los materiales: Editorial Donostiarra, S.A.
13. K. Bergman and R. Gottardi. (1990). "Design Criteria for the Modern UHP Electric Arc Furnace With Auxiliaries," Ironmaking and Steelmaking
14. Kundrin. (1981). Metalurgia del hierro y los aceros.
15. Lifka L., Q. Skrabec; "Nitrogen Control in Electric Furnace Steelmaking"; I&SM, November 1984; pp. 32-36.
16. Medina, E. N., J. Arzola Ruiz, y A. Batista Cabrera. (2007). Producción de aceros al carbono en Hornos de Arco Eléctrico. Ingeniería Mecánica.
17. Misra S., R. Fruehan; "Nitrogen Pickup during Tapping of Liquid Steel"; AISTech 2004 Proceedings – Volume I; pp. 1057-1069.
18. Morera, V. (2005). Ponencia Metánica, Argentina.
19. Morera, V. (2006). Capacitación en Horno de Arco Eléctrico, ACINOX-Tunas.
20. ONDE, M. (2005). Efecto de la desoxidación sobre la obturación de buzas de cuchara.
21. P., S. M. (2008). Control para la formación de escoria espumosa en Hornos de Arco Eléctrico. Universidad Simon Bolivar, Venezuela.
22. Ramirez, J. M. (2003). El acero. Universidad de Pamplona, Colombia.
23. Ramirez, J. (2010). Ponencia metánica, La Habana.
24. Rangel, E. (2009). Aceración.
25. Robles, E. C., J.E. Berciano, y Enrique Tremps Guerra. (2014). Fabricación de acero inoxidable.
26. SMIRNOV, N. y F., A. (1984). Producción de acero. Pueblo y Educación, La Habana.
27. Teoh, L. L. (1989). "Electric Arc Furnace Technology: Recent Developments and Future Trends," Ironmaking and Steelmaking
28. Thomas, C. Scheid, G. Geiger; "Nitrogen Control During Electric Furnace Steelmaking"; 1992 Electric Furnace Conference Proceeding; pp. 263-285.

29. Urquiza, J. A. (1999). Hornos de arco para la fusión de acero. MacGraw Hill.
30. Vera, C. (2009). La didáctica sobre la obtención de la fundición y el acero.
31. W. N. Robert, "Deformation Twinning in Hadfield Steels", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Volumen 230, 372-377, Abril 1964.

ANEXOS

Anexo 1 Orden de producción del acero FEE 500.

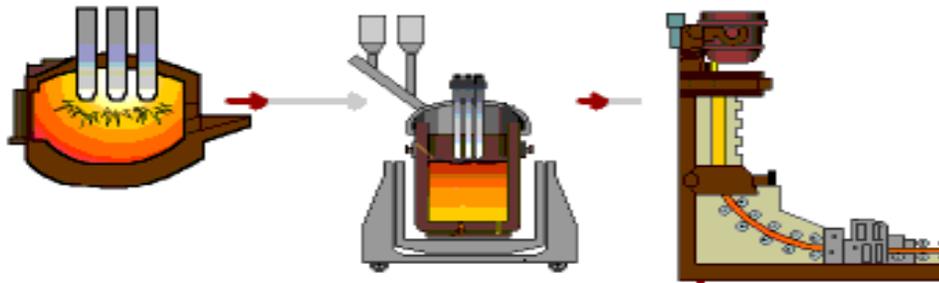
NUMERO DEL PEDIDO 02	FECHA DE EMISIÓN 23.01.2017	No. ORDEN DE PRODUCCIÓN 04-A	REVISIÓN 01
CLIENTE ACINOX COMERCIAL (GIBRALTAR)	DESTINO Exportación		CANTIDAD (TM) 10000
PRODUCTO	Palanquilla 130x130 mm FEE 500 Código: 903180113		LARGO (mm) 12000

ESPECIFICACIONES DEL CLIENTE.

- Palanquilla: 130x130 mm +/- 3 mm
- Largo: 12000 mm Tolerancia: -100 /+ 100 mm. No se aceptan cortos
- **Calidad de Forma:**
- **Flexión (Rectitud):** 10 mm/m máx, 60 mm máx. en la longitud total de la palanquilla, garantizando que el 80% de la producción sea menor o igual a los 50 mm en la longitud total (en los 12 m).
- **Calidad Interna:** Libre de grietas, sopladuras y defectos que afecten la calidad del producto final, se aceptan hasta Grado 3.
- **Calidad Superficial:** No se admiten defectos superficiales, doble piel, sangrado, poros, daños mecánicos: 5mm Máx. profundidad
- **Calidad:** Los parámetros de Calidad no especificados se trabajarán según ECA-0201 "Especificaciones Técnicas de los Productos Finales de ACINOX Las Tunas.
- Las palanquillas deben ser identificadas físicamente por grado y colada.
- En una de las puntas de la palanquilla se pintará un número (**con marcador permanente**) a todas las palanquillas de cada colada para poder identificarlas por coladas.
Ej.: Si comenzamos el pedido por la colada 100 las palanquillas pertenecientes a la misma tendrán el No. 1. Para la colada 101 el No. 2, y así sucesivamente.
- Atados: 2 unidades. Adecuadamente atadas para transporte marítimo y terrestre.
- Se debe pintar la cara final de las palanquillas de color: **BLANCO**

	COMPOSICION QUIMICA (%) COMPOSICION QUIMICA OPTIMA. (*)																				
NORMA	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><u>C</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Mn</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Si</u></td> <td style="text-align: center;"><u>P máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>S máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>N máx (ppm)</u></td> <td style="text-align: center;"><u>(Cr+Ni+Cu+Mo+Sn) Máx</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.20</td> <td style="text-align: center;">0.72</td> <td style="text-align: center;">0.18</td> <td style="text-align: center;">0.045</td> <td style="text-align: center;">0.029</td> <td style="text-align: center;">120</td> <td style="text-align: center;">0.95</td> </tr> </table>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P máx</u>	<u>S máx</u>	<u>N máx (ppm)</u>	<u>(Cr+Ni+Cu+Mo+Sn) Máx</u>	0.20	0.72	0.18	0.045	0.029	120	0.95						
<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P máx</u>	<u>S máx</u>	<u>N máx (ppm)</u>	<u>(Cr+Ni+Cu+Mo+Sn) Máx</u>															
0.20	0.72	0.18	0.045	0.029	120	0.95															
FEE 500	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><u>Sn máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Mo máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>V máx</u></td> <td colspan="4" style="text-align: center;">R Mn/S > 25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;">0.08</td> <td style="text-align: center;">0.08</td> <td colspan="4"></td> </tr> </table>	<u>Sn máx</u>	<u>Mo máx</u>	<u>V máx</u>	R Mn/S > 25				0.05	0.08	0.08										
<u>Sn máx</u>	<u>Mo máx</u>	<u>V máx</u>	R Mn/S > 25																		
0.05	0.08	0.08																			
Clasificación Interna:-	<p style="text-align: center;">COMPOSICION QUIMICA CLIENTE.</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><u>C</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Mn</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Si</u></td> <td style="text-align: center;"><u>P máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>S máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Sn máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Mo máx</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.18-0.22</td> <td style="text-align: center;">0.60-0.90</td> <td style="text-align: center;">0.15-0.30</td> <td style="text-align: center;">0.045</td> <td style="text-align: center;">0.045</td> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;">0.08</td> </tr> </table> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="text-align: center;"><u>V máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Cr+Ni+Cu+Mo+Sn máx</u></td> <td style="text-align: center;"><u>N máx (ppm)</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.08</td> <td style="text-align: center;">0.95</td> <td style="text-align: center;">120</td> </tr> </table> <p>Carbono Equivalente = 0.34 - 0.50 máx $C_{E_{equiv}} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15$. (*) Estos son los valores que se debieran lograr para mejorar la eficiencia del proceso.</p>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P máx</u>	<u>S máx</u>	<u>Sn máx</u>	<u>Mo máx</u>	0.18-0.22	0.60-0.90	0.15-0.30	0.045	0.045	0.05	0.08	<u>V máx</u>	<u>Cr+Ni+Cu+Mo+Sn máx</u>	<u>N máx (ppm)</u>	0.08	0.95	120
<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P máx</u>	<u>S máx</u>	<u>Sn máx</u>	<u>Mo máx</u>															
0.18-0.22	0.60-0.90	0.15-0.30	0.045	0.045	0.05	0.08															
<u>V máx</u>	<u>Cr+Ni+Cu+Mo+Sn máx</u>	<u>N máx (ppm)</u>																			
0.08	0.95	120																			

Anexo 2. Flujo tecnológico de ACINOX Las Tunas.

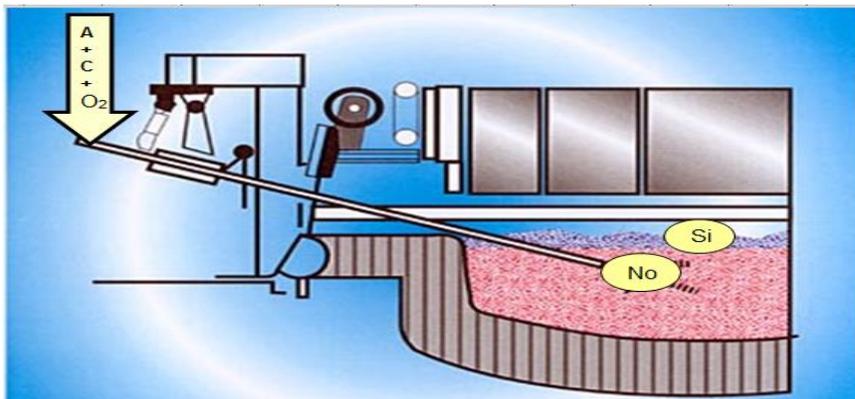


H.A.E

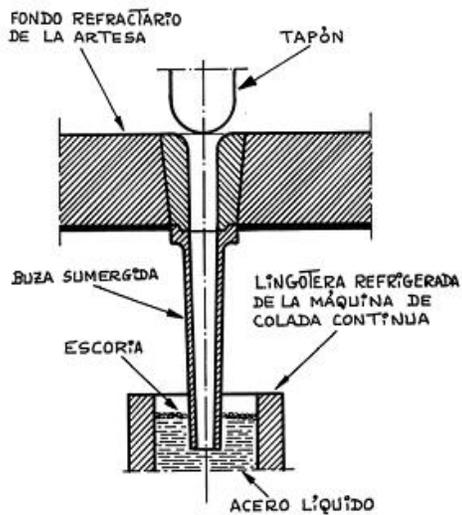
H.C

I.V.C

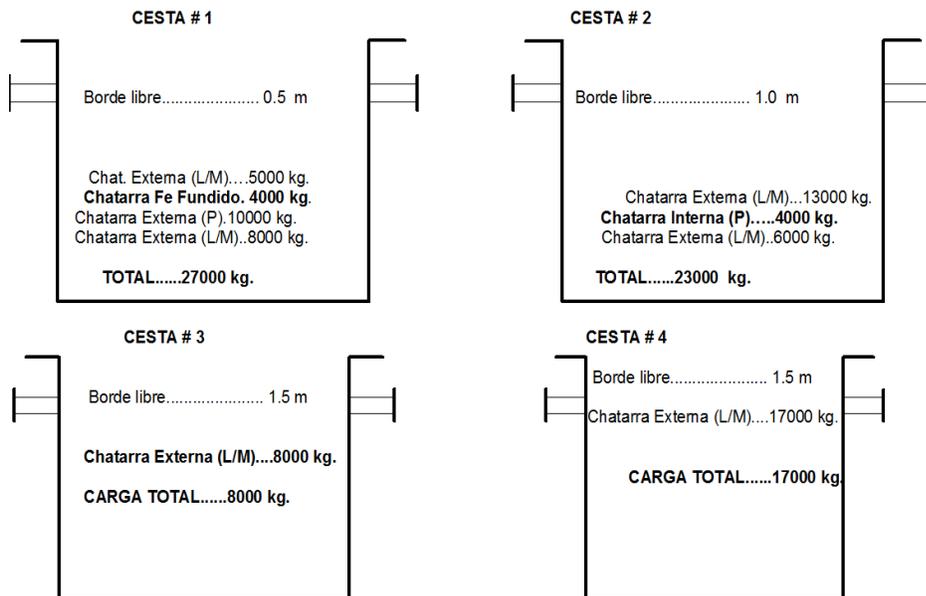
Anexo 3. Disposición de la Lanza de Inyección de Carbón para la Realización de Escoria Espumosa.



Anexo 4. Regulación del flujo de acero artesa-molde.



Anexo 5. Tecnología de Carga de la Chatarra en las Cestas para 75 t.



Anexo 8. Tabla general de los parámetros durante el proceso.

No.	No. Col.	Carga (t.)	Cons. Oxígeno (Nm ³ O ₂)	Aporte "C" HAE (kg)	Tpo. T. HAE (min.)	Temp. Vert. (°C)	T. inic. Ins. (°C)	Muestra de N ₂ en HC.			T. máx. (°C)	Tpo. T. HC (min.)	Muest. N ₂ IVC (%)	Tpo. Traslado IVC (min.)	Tpo. Vaciado IVC (min.)	Argón				Nitrógeno				
								%N ₂ inic.	%N ₂ F ins.	%N ₂ F HC.						Tpo. Insuf. (min.)	Flujo (L/min.)	P (bar)	Cons. (L)	Tpo. Insuf. (min.)	Flujo (L/min.)	P (bar)	Cons. (L)	
Prueba de agitación con Nitrógeno para 10 minutos.																								
1	8381	75,100	1000	535,23	0,0072	175	1629	1544	0,0093	0,0102	0,0099	1633	86	0,0105	11	103	74	69	2,70	5648	10	69	2,20	724
2	8382	75,035	1125	667,02	0,0060	105	1607	1538	0,0091	0,0095	0,0091	1634	80	0,0101	15	102	67	69	2,00	11730	11	109	2,00	1283
3	8383	75,345	980	523,77	0,0071	168	1618	1568	0,0078	0,0081	0,0083	1620	48	0,0092	20	109	37	89	1,50	3901	10	89	1,60	922
4	8384	75,004	822	635,93	0,0078	176	1616	1527	0,0081	0,0088	0,0090	1636	116	0,0103	10	111	85	60	2,00	6377	11	60	2,10	596
5	8385	75,722	1222	419,47	0,0069	131	1604	1550	0,0075	0,0084	0,0085	1636	80	0,0091	26	100	68	240	1,90	1256	10	240	2,00	2099
Prueba de agitación con Nitrógeno para 20 minutos.																								
6	8387	76,029	1000	562,65	0,0078	173	1641	1532	0,0082	0,0101	0,0103	1632	100	0,0103	9	109	80	40	2,20	3835	20	40	2,20	613
7	8388	75,338	1301	424,41	0,0067	121	1607	1573	0,0070	0,0087	0,0094	1630	69	0,0096	28	110	49	60	1,50	3749	20	60	1,50	1896
8	8389	75,312	1260	545,73	0,0065	110	1610	1565	0,0079	0,0094	0,0096	1631	59	0,0099	31	99	37	380	1,90	9296	22	380	2,30	8896
Prueba de agitación con Nitrógeno para 30 minutos.																								
9	8374	75,196	1240	632,80	0,0061	115	1607	1563	0,0072	0,0101	0,0105	1626	49	0,0116	16	100	18	70	2,20	2102	31	70	2,30	2918
10	8391	75,178	1100	758,90	0,0075	119	1630	1591	0,0075	0,0089	0,0099	1628	83	0,0101	6	121	30	59	1,80	2820	30	59	2,10	2061
11	8393	72,749	1270	536,86	0,0047	109	1608	1577	0,0072	0,0088	0,0101	1635	83	0,0104	15	89	50	120	2,10	7225	30	120	2,10	3937
12	8394	75,265	1235	751,08	0,0067	193	1625	1584	0,0073	0,0090	0,0103	1640	87	0,0109	11	111	57	60	1,90	3811	30	40	1,90	1548
Prueba de agitación con Nitrógeno para 40 minutos.																								
13	8367	75,315	1355	432,26	0,0065	112	1617	1547	0,0074	0,0096	0,0113	1636	60	0,0121	31	101	20	280	2,40	3853	40	280	2,40	9513
14	8373	85,186	1200	398,28	0,0059	100	1605	1546	0,0076	0,0098	0,0114	1627	68	0,0123	18	96	25	130	2,20	2744	40	130	2,40	3720
15	8376	75,055	1329	373,07	0,0067	106	1615	1556	0,0073	0,0098	0,0104	1625	109	0,0100	32	109	63	50	1,90	8447	44	40	1,90	1211
16	8392	75,025	1578	483,67	0,0062	144	1655	1606	0,0078	0,0110	0,0116	1630	167	0,0122	13	124	130	509	2,80	33664	41	500	3,00	5912
17	8396	75,200	1724	889,25	0,0063	127	1615	1559	0,0078	0,0108	0,0118	1630	95	0,0118	15	82	35	160	5,60	5037	40	40	4,80	1971
18	8397	75,784	1489	1011,03	0,0058	109	1604	1562	0,0075	0,0102	0,0112	1618	60	0,0117	28	59	16	80	1,70	1535	42	80	1,80	1682
19	8398	75,174	849	530,32	0,0068	123	1653	1608	0,0072	0,0105	0,0111	1629	87	0,0115	8	131	46	80	1,80	3572	40	80	2,20	3200
Prueba de agitación con Nitrógeno para tiempos mayores de 40 minutos.																								
20	8372	75,650	1080	463,97	0,0056	81	1607	1552	0,0073	0,0128	0,0133	1634	85	0,0143	8	93	24	80	2,10	2450	52	200	2,20	7807
21	8377	75,206	1621	497,62	0,0068	142	1610	1552	0,0087	0,0136	0,0140	1622	86	0,0152	28	96	20	120	2,10	2400	66	120	2,10	5987

Anexo 9. Ficha de costo de la producción de gases.

FICHA DE COSTO: PLANTA DE FRACCIONAMIENTO DE AIRE.									
CONCEPTO	UM	I.C.S.P (UM/m ³)	I.C.S.R (UM/m ³)	COSTO PLAN			COSTO REAL		
				CUC	MN	TOTAL	CUC	MN	TOTAL
COSTO TOTAL (O₂+N₂):				0,23	0,00	0,23	0,232	0,00	0,232
99,95 % O ₂	m ³	0,00003	0,0001	0,00002	0,000001	0,00002	0,0001		
76,05 % O ₂ en Ar	m ³	0,000003	0,00001	0,00004		0,00004	0,0002		
98,50 % O ₂ en Ar	m ³	0,000004	0,00002	0,00005		0,0001	0,0003		
FLUJO (N ₂ +O ₂ +Ar)	m ³	20,00	20,00	4,57	0,03	4,6	4,57	0,03	4,6
Electricidad	kWh	1,837	1,837	0,213		0,21	0,213		
COSTO TOTAL (O₂,N₂):	Nm ³			0,28	0,51	0,8	0,25	0,02	0,27
COSTO MATERIAL ARGÓN:	Nm ³			4,62	0,03	4,65	4,62	0,03	4,65

Anexo 10. Balance de los gases de agitación en el proceso de HC.

No.	Col.	Argón							Nitrógeno.				
		Cons. Ar (L)	Tpo. Desulf.	Cons. Ar. Desulf. (L)	Tpo. A.P. Ajuste	Cons. Ar. Ajuste	Cons. Total. Ar (g) (L)	Argón Liq.(Nm ³).	Cons. N ₂ (L)	Tpo. A.P. Ajuste	Cons. N ₂ Ajuste	Cons. Total. Ar (g) (L)	N ₂ Liq.(Nm ³)
1	8381	5648	3	2100	0	0	7748	9,213	724	2	350	1074	1,541
2	8382	11730	3	2100	0	0	13830	16,445	1283	2	350	1633	2,343
3	8383	3901	0	0	0	0	3901	4,639	922	2	350	1272	1,825
4	8384	6377	0	0	0	0	6377	7,583	596	3	525	1121	1,608
5	8385	1256	2	1400	0	0	2656	3,158	2099	2	350	2449	3,514
6	8387	3835	4	2800	0	0	6635	7,889	613	2	350	963	1,382
7	8388	3749	4	2800	0	0	6549	7,787	1896	3	525	2421	3,473
8	8389	9296	4	2800	1	175	12271	14,591	8896	1	175	9071	13,014
9	8374	2102	3	2100	0	0	4202	4,996	2918	2	350	3268	4,689
10	8391	2820	3	2100	0	0	4920	5,850	2061	2	350	2411	3,459
11	8393	7225	4	2800	0	0	10025	11,920	3937	3	525	4462	6,402
12	8394	3811	3	2100	0	0	5911	7,029	1548	2	350	1898	2,723
13	8367	3853	3	2100	0	0	5953	7,078	9513	3	525	10038	14,402
14	8373	2744	2	1400	0	0	4144	4,927	3720	2	350	4070	5,839
15	8376	8447	3	2100	0	0	10547	12,541	1211	3	525	1736	2,491
16	8392	33564	1	700	1	175	34439	40,950	5912	3	525	6437	9,235
17	8396	5037	0	0	0	0	5037	5,989	1971	3	525	2496	3,581
18	8397	1535	2	1400	0	0	2935	3,490	1682	2	350	2032	2,915
19	8398	3572	5	3500	0	0	7072	8,409	3200	3	525	3725	5,344
20	8372	2450	4	2800	0	0	5250	6,243	7807	2	350	8157	11,703
21	8377	2400	3	2100	0	0	4500	5,351	5987	2	350	6337	9,092
	Total	125352	56	39200	2	350	164902	196,08	68496	49	8575	77071	110,58
	Prom.	5969	3	1867	0,10	16,67		17,83	3262	2	408	3670	5,27

