

REPÚBLICA DE CUBA
Ministerio de Educación Superior
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
FACULTAD DE METALURGIA

Trabajo de diploma

TÍTULO: Tecnología para la elaboración de AISI 304 utilizando chatarra de Acero Ferrítico.

DIPLOMANTES: Ramón Cabreja Ogabán

TUTOR: Ing. Joaquín Palacio García

Curso 1994
Año 36 de la Revolución

PENSAMIENTO

Y siempre, mediremos por encima de todo a un técnico, a un médico, a un científico, no por sus conocimientos, sino por el grado de humanidad y modestia con que sea capaz de donar al género humano esos conocimientos.....

Fidel.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas que con su ejemplo y amor hicieron posible la culminación de mis estudios. A ellos especialmente dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero y eterno agradecimiento a todos aquellos que con su ayuda desinteresada facilitaron la realización de este trabajo, en especial, a mi tutor, Ing. Joaquín Palacio García de quien recibí las orientaciones necesarias para lograr la tarea propuesta.

RESUMEN

El trabajo consiste en la realización del cálculo de carga y el cálculo económico, con el objetivo de desarrollar una tecnología para la elaboración de aceros inoxidable de la marca AISI 304, mediante la utilización de la chatarra de acero ferrítico AISI 430 en la carga del horno de arco eléctrico de la empresa ACINOX.

Para ello se creó una metodología de cálculo, tomando como base la refusión de chatarra inoxidable y el completamiento de la carga con pequeñas cantidades de ferroaleaciones.

Con los resultados obtenidos se logra demostrar la factibilidad económica de la utilización de esta tecnología y la alta calidad del acero producido.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. ACEROS INOXIDABLES. GENERALIDADES.	
1.1. Características generales de los aceros inoxidables	3
1.2. Materiales y materias primas utilizados en la elaboración de los aceros inoxidables	4
1.3. Breve descripción del proceso productivo	6
CAPITULO II. PARTE ESPECIAL.	
2.1. Fundamento del cálculo	10
2.2. Cálculo de la carga fría	10
2.3. Periodo de fusión	16
2.4. Periodo de desfosforación	17
2.5. Periodo de oxidación	17
2.6. Cálculo de la escoria antes de la reducción	17
2.7. Periodo de reducción de la escoria en el H.A.E	18
2.8. Periodo de vertido del metal en la cuchara	21
2.9. Periodo de ajuste	22
2.10. Tratamiento del metal al vacío	25
2.11. Periodo de reducción de la escoria en el V.O.H.S.D	29
2.12. Ajuste final	30
2.13. Cálculo del número ferrítico	33
CALCULO ECONOMICO	34
ANALISIS DE LOS RESULTADOS	35
CONCLUSIONES	37
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFIA	39
ANEXOS.	

INTRODUCCION

INTRODUCCION

Las tecnologías o métodos de elaboración de aceros inoxidable desarrollados son muy variados y dependen de las condiciones específicas y avance tecnológico de cada país, del equipamiento y materias primas disponibles, especialmente de los desechos aleados u otras fuentes económicas de hierro, cromo y níquel, así como del volumen y calidad final del acero producido.

El desarrollo de la producción de aceros inoxidable en Cuba, país rico en unos de sus principales elementos de elaboración, el níquel, representa unos de los lineamientos económicos perspectivas más importantes. Al efecto, se pone en marcha la empresa productora ACINOX, ubicada en la zona industrial de la provincia Las Tunas y dotada de un moderno equipamiento y una tecnología de avanzada para la obtención de diversas marcas.

La fábrica cuenta con dos áreas fundamentales:

- Acería.
- Plantas auxiliares.

Las plantas auxiliares tienen como objetivo el aseguramiento de la producción. Se dispone de:

- Planta de tratamiento de agua.
- Planta de tratamiento y depuración de humos.
- Planta de fraccionamiento de aire.
- Planta de cal.
- Estación de LPG.
- Sub-estación eléctrica de 220 KV.
- Compresores.
- Caldera para la producción de vapor.

En el área de acería (ver fig.4) tiene lugar la producción del acero, contando para ello con los siguientes sectores:

- Sector de aseguramiento y reverbería.
- Sector de elaboración y afino.
- Sector de vaciado continuo.
- Sector de acondicionamiento de planchones y palanquillas.

El sector de aseguramiento y reverbería tiene como objetivo el mantenimiento refractario de todos los agregados de la empresa y además la preparación de la carga.

El sector de elaboración y afino juega el papel principal en la obtención del acero en el horno de arco eléctrico y su posterior tratamiento y ajuste.

En el sector de vaciado continuo se persigue la obtención del planchón o palanquilla y su enfriamiento.

El sector de acondicionamiento realiza el defectado y tratamiento de esmerilado de las palanquillas y planchones para

su posterior almacenaje.

La producción de estos aceros reclama un alto nivel de inversiones en equipos fundamentales debido a la complejidad de los métodos actuales utilizados a este fin, derivada del alto grado de exigencia por parte de los sectores industriales consumidores. Es por ello que la planta cuenta con un moderno horno de ultra-alta potencia, dotado de un novedoso sistema automático de regulación de la fusión, paneles, bóveda y conductores eléctricos enfriados. Además para el tratamiento y desgasificación del acero, presenta la fórmula LF-VOHSD.

Actualmente la empresa ACINOX, ejecuta el montaje de una miniacera para la producción de palanquillas de aceros especiales y aleados, así como aceros al carbono destinados al consumo nacional. Esta miniacera se utilizará además como centro de pruebas de la metalurgia cubana.

Como planes futuros de la fábrica, está previsto el desarrollo de un sector de laminación y la modernización del existente.

El presente trabajo persigue el desarrollo de una tecnología para la obtención del acero inoxidable AISI 304, mediante la utilización de chatarra de acero ferrítico AISI 430 en la carga del horno de arco eléctrico.

El objetivo trazado basa su fundamento en la realización del cálculo de carga y el cálculo económico, con los cuales se demostrará la factibilidad de esta tecnología.

CAPITULO I

CAPITULO I. ACEROS INOXIDABLES. GENERALIDADES.

1.1 Características generales de los aceros inoxidables.

La familia de los aceros inoxidables está constituida por un gran grupo de aleaciones de base hierro que contienen más de 12 % de cromo, necesario para producir la pasivación, resistentes a los agentes corrosivos por vía húmeda o seca a temperatura ordinaria o moderada. Cuando el contenido de cromo en el acero es mayor de 30 % se considera que se entra en el campo de las aleaciones termorresistentes.

La característica fundamental de los aceros inoxidables es la formación de una película de óxido de cromo en toda su superficie (muy fina), la cual evita la penetración e interacción de otras sustancias que pueden reaccionar con los elementos químicos que lo componen. El grueso de la capa de óxido depende de la cantidad de cromo que posea el acero.

Los aceros inoxidables pueden estar aleados con níquel, molibdeno, cobre, manganeso, silicio, titanio, niobio, nitrógeno y otros elementos, cuyos contenidos vienen determinados, fundamentalmente, por el grado de agresividad del medio y las exigencias en propiedades mecánicas. La suma de todos los elementos de aleación, incluyendo el cromo, debe ser menor que 50 %, pues de lo contrario, se clasifican como aleaciones especiales.

Es enorme el significado que tienen en la economía nacional los aceros inoxidables. Estos satisfacen una variedad de condiciones de explotación mayor que la de cualquier otro grupo de aleaciones ferrosas comerciales debido a su resistencia a la corrosión atmosférica y en una amplia gama de soluciones ácidas y básicas, su resistencia a la oxidación, propiedades mecánicas a diferentes temperaturas, conformabilidad, soldabilidad, estética, higiene y facilidad de mantenimiento. En la actualidad su uso está tan difundido que no existe rama económica en que no se utilicen.

De acuerdo a las transformaciones estructurales que pueden ocurrir durante el calentamiento y enfriamiento de los aceros inoxidables estos se agrupan en tres grupos:

a) Aceros inoxidables martensíticos: presentan una transformación de fase total alfa-gamma. Durante el enfriamiento al aire, desde temperaturas algo superiores a A_{c3} , presentan estructura martensítica.

b) Aceros inoxidables austeníticos: carecen de transformación de fase alfa-gamma. En estos aceros, gracias a la presencia de determinadas cantidades de elementos formadores de austenita, se crea una estructura 100 % austenítica completamente estable. Con un contenido de carbono mayor de 0.02 %, estos aceros después del revenido, tienen una estructura austenítica más carburo de cromo no estabilizados o carburos estabilizados de titanio o niobio. A

temperaturas bajo 0 °C mantienen o disminuyen muy poco la ductibilidad y tenacidad.

c) Aceros inoxidables ferríticos: al igual que los aceros austeníticos, carecen de transformaciones de fase alfa-gama. Su estructura es ferrítica aunque en tal estructura puede encontrarse carburos precipitados. La ausencia de punto de transformación provoca la imposibilidad práctica de mejorar las características mecánicas mediante el tratamiento térmico.

En la empresa ACINOX la elaboración del acero se basa en el sistema normalizado AISI, el cual divide los aceros inoxidables en tres series que a continuación relacionamos:

- Aceros austeníticos al Cr-Ni-Mn, designados por un número de tres cifras, que comienza con la cifra 2.

Marca típica: AISI 201.

- Aceros austeníticos al Cr-Ni, designados por un número de tres cifras, que comienza con la cifra 3.

Marcas típicas: AISI 301, 302, 304, 304L, 305, 308, 316, etc.

- Aceros ferríticos y martensíticos al Cr, que se designan por un número de tres cifras que comienza con la cifra 4.

Marcas típicas: AISI 405, 494, 430, 430F, 430Fe, 434, etc.

Los aceros inoxidables que actualmente se producen en ACINOX son del tipo austeníticos al Cr-Ni.

1.2 Materiales y materias primas utilizados en la elaboración de los aceros inoxidables.

En la producción de los aceros inoxidables se emplean diferentes materias primas las cuales deben cumplir requisitos indispensables como:

- a) No deben tener impurezas ferrosas (Cu, Pb, Zn, etc).
- b) El contenido de fósforo y azufre no debe superar el 0.05 %.
- c) No deben contener esmalte, pinturas, gomas, plástico, grasa y aceites.
- d) El contenido de impurezas (madera, papel, etc) no debe ser mayor del 1 % del peso total.
- e) La granulometría de las ferroaleaciones debe oscilar entre 10-50 mm.

Las características físicas y químicas de las materias primas influyen directamente en la producción del acero y por lo tanto su selección correcta es esencial para producir un acero de calidad y bajos costos.

- Chatarras.

Existen más de 100 tipos y grados de chatarras, pero de forma general estas se pueden clasificar en dos categorías:

- a) Chatarra de recirculación.
- b) Chatarra externa.

La chatarra de recirculación son desechos de retorno, generados internamente en las acerías durante los procesos de vaciado y laminación.

La chatarra externa es generada por las fábricas de construcción de maquinarias durante la producción de equipos, partes, piezas, etc. y además, cuando los productos de acero o estructura de ingeniería llegan al final de su vida útil.

En dependencia de su densidad aparente las chatarras se clasifican en:

- Chatarra ligera: pedazos de hasta 2 kg de peso y densidad de 300-800 kg/m³.
- Chatarra mediana: de 2-300 kg de peso y densidad de 1600-2500 kg/m³.
- Chatarra pesada: mayor de 300 kg de peso y densidad de 4300 a 4800 kg/m³.

Para la disminución de las pérdidas y de los contenidos indeseables de gases e inclusiones no metálicas las chatarras deben estar secas, sin grasa, no muy oxidadas y libres de polvo y otras impurezas.

- Ferroaleaciones.

Ferrocromo (FeCr): Es la principal adición de aleación. En dependencia de la tecnología de elaboración y de la etapa del proceso donde se cargue, tenemos:

a) FeCrHC (alto carbono): Se utiliza en el horno de arco eléctrico (H.A.E) como carga ó adición. Aporta el cromo y tiene alto contenido de carbono el cual desempeña una función protectora. En ocasiones se utiliza para el ajuste de cromo y carbono en el horno de cuchara (L.F) y en la instalación de desgasificación al vacío con oxígeno (V.O.H.S.D).

b) FeCrLC (bajo carbono): Se utiliza como material aleante de ajuste del cromo en el LF y en el VOHSD. Además permite el ajuste de aceros de bajo contenido de carbono (AISI 304L).

Ferrosilicio (FeSi): Se utiliza como agente reductor durante todo el proceso y como elemento de aleación.

Ferrosilicomanganeso (FeSiMn): Se emplea como elemento de aleación y a la vez como desoxidante o reductor. Su uso brinda ahorros debido a la disminución del consumo de ferrosilicio y ferromanganeso.

Ferromanganeso (FeMn): Se emplea como material aleante y como agente reductor. En ACINOX se utiliza el FeMnHC en el HAE como

material de carga y en el LF como material de ajuste de manganeso y carbono, y el FeMnLC, por su pureza, en ajustes finales en el VOHSD.

Ferromolibdeno (FeMo): Se comporta como elemento de aleación de la carga metálica. Puede ser añadido en cualquier parte del proceso.

Ferrosilicocromo (FeSiCr): Se emplea como elemento de aleación y a la vez como desoxidante. Representa una fuente barata adicional de aleación al cromo.

Ferroboro (FeB): Se utiliza para afinar el grano y mejorar las propiedades tecnológicas del acero. Es añadido al finalizar el proceso en el VOHSD.

Ferrotitanio (FeTi): Se emplea como elemento de aleación y como reductor. Debe añadirse al finalizar el proceso del VOHSD.

Niquel (Ni): Prácticamente no se oxida en el baño metálico por lo que se usa como material de carga. Su utilización en los ajustes se limita por su contenido de impurezas (C, S, P, O). En el HAE se ha utilizado sinter de níquel (NiO-Ni) y óxido de níquel (NiO), este último con desventajas por su baja granulometría y alto contenido de oxígeno. Ambos materiales presentan contenidos de cobalto significativos lo que constituye un impedimento para el caso de aceros inoxidable utilizados en plantas y equipos nucleares. El níquel metálico posee pocas impurezas y se utiliza en ajustes eventuales en el VOHSD.

Aluminio (Al): Es un elemento aleante, pero generalmente se emplea como reductor.

Silicocalcio (SiCa): Se emplea como agente reductor, aportando el calcio que influye positivamente sobre la desulfuración.

- Fundentes.

Cal (CaO): La cal calcinada fresca debe contener 85 % de CaO como mínimo. Su prolongado almacenamiento provoca que esta tienda a convertirse en polvo y perder sus propiedades. Es un formador de escoria y mantiene la basicidad en una relación favorable con la sílice (SiO₂). Se utiliza durante todo el proceso. Además se usa como desulfurante.

Espatoflúor (CaF₂): Se emplea para aumentar la fluidez de la escoria sin reducir la basicidad. Contiene 85-95 % de CaF₂.

1.3 Breve descripción del proceso productivo.

El proceso productivo de elaboración de aceros inoxidable está compuesto por las siguientes etapas:

- Preparación de la carga.

- Fusión de la carga.
- Descarburación y afinado.
- Vaciado.
- Acondicionamiento del planchón (o palanquilla).

Preparación de la carga.

El objetivo de esta etapa es garantizar una carga homogénea y la cantidad requerida de cada materia prima para la obtención de un acero con calidad, así como un buen funcionamiento del horno. Para garantizar que la carga sea homogénea, la cesta se cargará de la siguiente forma: en el fondo de la cesta se cargará parte de la chatarra ligera que servirá como colchón protector del refractario de la solera del horno, después la chatarra pesada y mediana. Se desea que la chatarra pesada se encuentre hacia el fondo para proteger la solera, así como para evitar que caiga contra los electrodos y los rompa. El resto de la chatarra ligera se carga en la parte superior con el objetivo de favorecer el impacto del arco con la chatarra, facilitar la introducción de los electrodos en la carga y proteger las paredes y la bóveda de la radiación del arco.

La carga se realiza en dos cestas pero en caso de que la densidad sea muy baja es necesario cargar una tercera cesta.

Fusión de la carga.

Se plantea como objetivo principal, fundir la carga, así como eliminar el fósforo hasta el contenido permisible para las distintas marcas de acero.

El HAK está diseñado tanto para la producción de aceros inoxidables, como para la producción de aceros al carbono de calidad. A su vez, está dotado con un moderno sistema automático de regulación de la fusión (ver fig.1).

- Capacidad total del horno: 60 t.
- Índice de utilización: 0.93
- Tiempo tap-top-tap para el acero inoxidable: 255 min

Las operaciones tecnológicas de esta etapa son:

- Carga de chatarra mediante la cesta.
- Fusión de la carga.

La fusión completa de la primera cesta, antes de añadir la segunda, es innecesaria e inclusive indeseable. Esto aumentaría el tiempo y consumo energético, elevaría el desgaste del revestimiento refractario y aumentaría la posibilidad de ocurrir salpicaduras cuando se añada la segunda cesta. Generalmente la segunda carga se realiza cuando un 80-90 % de la primera se encuentre fundida.

- Desfosforación y escorificación.

En dependencia de la tecnología que se esté aplicando se

realiza la desfosforación con el objetivo de eliminar el fósforo hasta el nivel requerido. Para realizar esta operación se necesitan tres condiciones fundamentales:

- a) Atmosfera oxidante.
- b) Bajas temperaturas (1570-1590 °C).
- c) Alta basicidad de la escoria (2.2-2.8).

- Adición de las ferroaleaciones.
- Análisis de la composición química y control de la temperatura.
- Oxidación.

En esta etapa, una vez conocida la composición química de fusión, se insufla oxígeno en el baño para realizar una eliminación parcial del carbono ($C < 0.7$). La temperatura al inicio del soplado oscila entre 1580-1600 °C.

- Reducción de la escoria.

Persigue el objetivo de reducir el cromo, hierro y manganeso oxidados durante la etapa anterior. Para ello se utiliza la combinación de Al y FeSi. En este periodo debe garantizarse una buena basicidad (2.0) y fluidez.

- Análisis de la composición química y control de la temperatura.

Una vez reducida la escoria se realiza la toma de muestra y se analiza en el laboratorio. Si el análisis arroja que los elementos han sido reducidos el acero se encuentra listo para ser vertido.

- Vertido del metal en la cuchara.

Se realiza a una temperatura de 1690-1730 °C.

- Reparación del refractario y alargamiento de los electrodos.

Descarburación y afinado.

Concluidas las operaciones tecnológicas en el HAF, el metal es vertido en una cazuela y es transportado a la estación para desescoriado. El desescoriado se produce mediante la inclinación de la cazuela a través de cilindros hidráulicos. Posteriormente el metal es trasladado hacia el LF (ver fig.2). El tratamiento en el horno de cuchara permite la homogenización de la composición química y temperatura, la formación de una nueva escoria y el ajuste.

- Capacidad de la cuchara: 60t
- Índice de utilización: 0.27
- Ciclo de trabajo para el acero inoxidable: 90 min

Al finalizar el ajuste del acero se realiza otro desescoriado en el horno de cuchara. Luego la cazuela es transportada hacia el VOHSD (ver fig.3) para ser sometida al ciclo de

descarburación—puesta a punto. Este proceso cuenta de varias etapas:

- Descarburación u oxidación.

Se procede al insuflado de oxígeno con el objetivo de descarburar el baño metálico. Este insuflado es superficial y se realiza partiendo de una temperatura de 1600-1630 °C y presión de 33 330.5 Pa. La agitación del baño es mantenida introduciendo argón.

- Desgasificación.

Esta etapa, conocida como "boiling off", consiste en hacer vacío hasta 66.661 Pa para eliminar del acero la mayor cantidad de gases: O₂, H₂, N₂ y CO. Después de efectuado el boiling off la temperatura del metal es de 1680-1700 °C.

- Análisis de la composición química y control de la temperatura.

- Reducción de la escoria.

El soplado con oxígeno conduce a la oxidación de determinadas cantidades de cromo y otros elementos. Con el objetivo de recuperar estas pérdidas, se adiciona FeSi y Al con adiciones complementarias de cal, la cual garantiza la basicidad necesaria.

- Desulfuración.

Persigue la eliminación del azufre hasta el nivel requerido por las normas.

- Ajuste final.

Mediante la adición de ferroaleaciones de bajo carbono y otros materiales aleantes se obtiene la composición química del acero deseado y se garantiza la temperatura óptima para la posterior etapa de vaciado.

Vaciado

Tiene como objetivo la obtención del planchón o palanquilla mediante la colada continua.

Acondicionamiento del planchón o palanquilla

Se procede a detectar los posibles defectos del producto. Además en esta área se pesa, se mide y se certifica la calidad de producción terminada.

CAPITULO II. PARTE ESPECIAL.

2.1 Fundamento del cálculo.

El cálculo está basado en el balance material del proceso de elaboración de aceros inoxidable en el horno de arco eléctrico, con el empleo de la metalurgia secundaria en el horno de cuchara y la instalación de desgasificación al vacío con oxígeno.

El proceso en el horno de arco eléctrico se divide en las siguientes etapas:

- Carga del horno.
- Fusión de la carga.
- Reducción de la escoria.
- Vertido del metal en la cuchara.

El horno de cuchara se utilizará con el objetivo de ajustar la composición química y obtener la temperatura óptima para pasar al VOHSD.

El proceso de tratamiento del metal en el VOHSD está dividido en las siguientes etapas:

- Oxidación al vacío.
- Boilling off.
- Reducción de la escoria.
- Ajuste final.

Datos iniciales para el cálculo:

- Capacidad del horno de arco eléctrico: 60t
- Oxidación de los elementos con el aire de la atmósfera:
C-35% Cr-10% Mn-20% Fe-1%
- Composición química del acero a producir, según la norma internacional AISI 304 (ver tabla N°1).
- Composición química del metal, al salir del horno de arco eléctrico (ver tabla N°2).
- Composición química de los materiales de carga que se utilizan durante el proceso (ver tabla N°3).

2.2 Cálculo de la carga fría.

El cálculo y composición de la carga fría varía en dependencia de muchos factores, entre los cuales están la composición química deseada, los materiales disponibles y su costo, así como las limitaciones del proceso o de la fábrica.

La carga consiste en:

- Chatarra de acero inoxidable AISI 430.
- Ferrocromo alto carbono.
- Ferromanganeso alto carbono.
- Sinter de níquel.
- Trozos de electrodos de grafito.
- Fundente.

Los cálculos serán realizados sobre la base de la capacidad del horno y teniendo en cuenta el rendimiento de los materiales y elementos.

1. Masa de chatarra de acero inoxidable.

En la refusión de 100 % de chatarra de acero inoxidable se debe obtener la cantidad de óptima de chatarra que permita, en el proceso de fusión, disminuir la utilización de ferroaleaciones. Esto posibilitará un aumento del rendimiento del cromo y del manganeso, así como una disminución del tiempo tap-top-tap del HAE y del costo de producción.

Se asumen 54.270 toneladas de chatarra de acero inoxidable AISI 430 en la carga del horno de arco eléctrico.

$$m_{\text{Chinox}} = \frac{54\,270 \cdot 94}{100} = 51\,013.8 \text{ kg}$$

Donde:

- m_{Chinox} : Masa de chatarra de acero inoxidable neta.
- 94: Rendimiento de la chatarra de acero inoxidable.

2. Cálculo de la cantidad de ferrocromo necesario en la carga.

a) Masa de cromo necesario en la carga para obtener la composición química deseada al salir del horno.

$$m_{\text{Cr}_c} = \frac{60\,000 \cdot 17}{100 \cdot 0.9} = 11\,333.33 \text{ kg}$$

Donde:

- 60 000: Capacidad del horno.
- 17: Ley de cromo a la salida del horno.
- 0.9: Rendimiento del cromo en el ferrocromo.

b) Masa de cromo en la chatarra de acero inoxidable neta.

$$\text{Cr}_{\text{chinox}} = \frac{m_{\text{Chinox}} \cdot 17}{100} = 8\,672.35 \text{ kg}$$

Donde:

- 17: Ley de cromo en la chatarra de acero inoxidable.

c) Masa de cromo necesario en el ferrocromo.

$$m_{\text{Cr}_n} = m_{\text{Cr}_c} - \text{Cr}_{\text{chinox}} = 2\,660.98 \text{ kg}$$

d) En forma de ferroaleación se necesita:

$$m_{FeCr} = \frac{m_{Cr_n}}{0.7002 \cdot 0.98} = 3\,877.87 \text{ kg}$$

$$m_{FeCr'} = m_{FeCr} \cdot 0.98 \cdot 0.9 = 3\,420.28 \text{ kg}$$

Donde:

m_{FeCr} : Masa de ferrocromo neto.

0.7002: Ley de cromo en el ferrocromo.

0.98: Rendimiento del ferrocromo.

3. Cálculo de la cantidad de ferromanganeso necesario en la carga.

a) Masa de manganeso necesario en la carga para obtener la composición química deseada al salir del horno.

$$m_{Mn_c} = \frac{60\,000 \cdot 0.9}{100 \cdot 0.8} = 675 \text{ kg}$$

Donde:

0.9: Ley de manganeso a la salida del horno.

0.8: Rendimiento del manganeso en el ferromanganeso.

b) Masa de manganeso en la chatarra de acero inoxidable neta.

$$Mn_{chinox} = \frac{m_{Chinox} \cdot 1.0}{100} = 510.14 \text{ kg}$$

Donde:

1.0: Ley de manganeso en la chatarra de acero inoxidable.

c) Masa de manganeso necesario en el ferromanganeso.

$$m_{Mn_n} = m_{Mn_c} - Mn_{chinox} = 164.86 \text{ kg}$$

d) En forma de ferroaleación se necesita:

$$m_{FeMn} = \frac{m_{Mn_n}}{0.7910 \cdot 0.98} = 212.67 \text{ kg}$$

$$m_{FeMn'} = m_{FeMn} \cdot 0.98 \cdot 0.8 = 166.73 \text{ kg}$$

Donde:

m_{FeMn} : Masa de ferromanganeso neto.

0.7910: Ley de manganeso en el ferromanganeso.

0.98: Rendimiento del ferromanganeso.

4. Cálculo de la cantidad de sinter de níquel necesario en la carga.

a) Masa de níquel necesario en la carga para obtener la

composición química deseada al salir del horno.

$$mNi_c = \frac{60\,000 \cdot 9}{100 \cdot 1.0} = 5\,400 \text{ kg}$$

Donde:

9: Ley de níquel a la salida del horno.

1.0: Rendimiento del níquel en el sinter de níquel.

b) En forma de sinter de níquel se necesita:

$$mNiO \cdot Ni = \frac{mNi_c}{0.8907 \cdot 0.96} = 6\,315.26 \text{ kg}$$

Donde:

0.8907: Ley de níquel en el sinter de níquel.

0.96: Rendimiento del sinter de níquel.

Nota: Se considera que todo el níquel contenido pasa al baño metálico.

5. Cálculo de la masa de cada uno de los elementos que aporta cada material de carga.

De forma general se calcula de la siguiente forma:

$$\text{element mat} = \frac{M_{\text{mat}} \cdot l_{\text{element}}}{100}$$

Donde:

element mat: Masa del elemento en el material de carga bruto.

Mmat: Masa del material de carga bruto.

lelement: Ley del elemento en el material de carga bruto.

a) Masa de carbono que aporta la chatarra de acero inoxidable.

$$C_{\text{chinox}} = \frac{mChinox \cdot 0.12}{100} = 65.12 \text{ kg}$$

b) Masa de carbono que aporta el ferrocromo.

$$C_{\text{FeCr}} = \frac{mFeCr \cdot 6.9}{100} = 267.57 \text{ kg}$$

c) Masa de carbono que aporta el ferromanganeso.

$$C_{\text{FeMn}} = \frac{mFeMn \cdot 6.71}{100} = 14.27 \text{ kg}$$

d) Masa de carbono que aporta el sinter de níquel.

$$C_{\text{NiO}\cdot\text{Ni}} = \frac{m_{\text{NiO}\cdot\text{Ni}} \cdot 0.12}{100} = 7.58 \text{ kg}$$

e) Masa de carbono total.

$$m_{C_t} = C_{\text{chinox}} + C_{\text{FeCr}} + C_{\text{FeMn}} + C_{\text{NiO}\cdot\text{Ni}} = 354.54 \text{ kg}$$

Los materiales de carga suman 354.54 kg de carbono, los cuales no son suficientes para concluir el periodo de fusión. Teniendo en consideración que durante dicho periodo ocurre la oxidación del carbono de carga con el aire de la atmósfera (35%) y el oxígeno del sinter de níquel, se añaden 400 kg de trozos de electrodos de grafito para compensar las pérdidas y disminuir el efecto de oxidación de los elementos cromo, manganeso e hierro.

En la tabla N°4 aparece representada la composición de la carga bruta.

7. Cálculo de la cantidad de cal en carga.

Añadir en la carga la cantidad de cal necesaria es de suma importancia para lograr la basicidad óptima y proteger el refractario del ataque de la sílice fundamentalmente.

En el periodo de fusión de cada cesta se desea tener determinada basicidad: $B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$. En dependencia de la cantidad de sílice que aporta cada cesta y de la basicidad a obtener se determina la masa de CaO necesario en la escoria: $m_{\text{CaO}} = B \cdot \text{SiO}_2$. Como la cal contiene un 90 % de óxido de calcio se deberá cargar: $m_{\text{cal}} = m_{\text{CaO}}/0.9$.

Análisis de la basicidad.

Rtapa	SiO ₂ (kg)	CaO (kg)	B	Cal en cesta (kg)
Fusión 1 ^{ra} Cesta	736.50	1 782.33	2.42	1 980
Fusión 2 ^{da} Cesta	1 231.39	2 955.34	2.40	1 303
Masa total de cal en carga				3 283

6. Tecnología de carga en cestas.

Para la obtención de un acero con calidad se debe garantizar la cantidad requerida de cada materia prima. La carga del H.A.B se realiza en dos cestas con la cantidad de fundente correspondiente. En la primera cesta se cargará el 59 % de la carga bruta. El resto se cargará en la segunda cesta.

A continuación una representación esquemática de la tecnología de carga de la dos cestas:

CESTA Nº1

Chatarra Ligera	3 511 kg
Chatarra Mediana	6 800 kg
Cal	1 980 kg
Chatarra Pesada	12 000 kg
Sinter de Niquel	3 789 kg
Chatarra Mediana	8 000 kg
Chatarra Ligera	4 059 kg
Total:	40 139 kg

CESTA Nº2

Chatarra Ligera	3 062 kg
FeMnHC	213 kg
FeCrHC	3 878 kg
Cal	1 303 kg
Sinter de Niquel	2 526 kg
Chatarra Pesada	9 000 kg
Chatarra Mediana	7 838 kg
Total:	27 820 kg

8. Tiempo de fusión de cada cesta.

El cálculo del tiempo de fusión de cada cesta permite cuantificar el posible número de coladas diarias (sin paradas prolongadas) y con ello conocer la productividad de la empresa. Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Tf_{cesta} = \frac{430 \cdot (m_{Cal} + m_{Chat}) + [(m_{FeCrHC} + m_{FeCrLC}) \cdot 570] + [(m_{NiO} \cdot Ni \cdot 0.89 \cdot 950) + (FeSi + FeMn) \cdot 350]}{26\,000} \quad [h]$$

a) Tiempo de fusión de la primera cesta.

$$Tf_{1c} = 0.72 \text{ h} \approx 43 \text{ min}$$



b) Tiempo de fusión de la segunda cesta.

$$Tf_{2c} = 0.52 \text{ h} \approx 31 \text{ min}$$

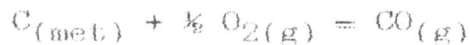
2.3 Período de fusión.

Durante el período de fusión ocurren las siguientes pérdidas:

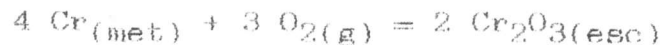
C-35% Cr-10% Mn-20% Fe-1%

Estas pérdidas son producto de la utilización del sistema de aspiración de humos y la ventana de trabajo del horno que provoca la oxidación de estos elementos con el aire de la atmósfera.

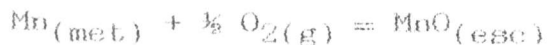
La masa de cada elemento que se oxida con el aire de la atmósfera se calcula como: la masa total del elemento en la carga por el porcentaje de oxidación entre 100 %.



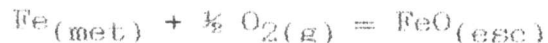
$$mC_{ox-at} = \frac{746.54 \cdot 35}{100} = 261.29 \text{ kg}$$



$$mCr_{ox-at} = \frac{11\,941.18 \cdot 10}{100} = 1\,194.12 \text{ kg}$$



$$mMn_{ox-at} = \frac{710.92 \cdot 20}{100} = 142.18 \text{ kg}$$



$$mFe_{ox-at} = \frac{44\,622.14 \cdot 1}{100} = 446.22 \text{ kg}$$

Durante el período de fusión el 30 % del oxígeno del sinter de níquel reacciona con el carbono oxidando parte de este.

a) Masa de oxígeno en el sinter de níquel.

$$mO_2NiO \cdot Ni = \frac{mNiO \cdot Ni \cdot 8.73}{100} = 551.32 \text{ kg}$$

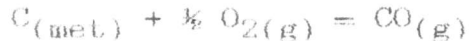
Donde:

8.73: Ley de oxígeno en el sinter de níquel.

b) Masa de oxígeno del sinter de níquel que reacciona con el carbono.

$$m_{O_2NiO \cdot Ni \rightarrow C} = \frac{m_{O_2NiO \cdot Ni} \cdot 30}{100} = 165.40 \text{ kg}$$

e) Masa de carbono oxidado por el oxígeno del sinter de níquel.



$$m_{C_{ox-sin}} = \frac{165.40 \cdot MMC}{MMO} = 124.05 \text{ kg}$$

Donde:

MMx: Masa molar del elemento o combinación x.

2.4 Periodo de desfosforación.

El contenido de fósforo presente en la carga se encuentra en el nivel requerido para el acero AISI 304 por lo que no es necesario realizar de esta operación tecnológica en el H.A.E.

2.5 Periodo de oxidación.

El insuflado de oxígeno al baño metálico persigue el objetivo de realizar una eliminación parcial del carbono. Es por ello que es necesario determinar que masa de este elemento queda en el baño metálico y que porcentaje esta representa en las 60 toneladas de metal líquido a vertir.

a) Masa de carbono que queda en el baño metálico.

$$m_{C_b} = m_{C_t} - m_{C_{ox-at}} - m_{C_{ox-sin}} = 361.2 \text{ kg}$$

en porcentaje esta representa:

$$\%C = \frac{361.2 \cdot 100}{60\ 000} = 0.6 \%$$

El carbono que queda en el baño metálico representa el porcentaje deseado a la salida del horno, por lo que no debe realizarse el insuflado de oxígeno.

2.6 Cálculo de la escoria antes de la reducción.

En la empresa ACINOX la cantidad de escoria precedente de cada colada se estima en 1000 kg pero los análisis de la composición química de esta no se realizan debido a que no se cuenta con los medios necesarios. Esto imposibilita hacer una valoración certera del contenido de los diferentes óxidos en la escoria.

La masa de escoria antes de la reducción se determina teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

ASPECTOS	Kg
. Cal en carga	3 283
. Escoria precedente	1 000
. Oxidación del cromo	1 194
. Oxidación del hierro	446
. Oxidación del silicio	287
. Oxidación del manganeso	114
. Consumo de refractario	152
. Adiciones complementarias (FeSi)	75
. Merma en la chatarra inoxidable	1 212
MASA TOTAL DE ESCORIA	7 763

Se estima que en la escoria, antes de la reducción, el contenido de óxidos de hierro, cromo y manganeso es el siguiente:

FeO - 8% Cr₂O₃ - 20% MnO - 6%

La masa de los óxidos en la escoria se calcula mediante la masa total de esta antes de la reducción.

$$m_{\text{FeO}_{\text{esc}}} = \frac{7\,763 \cdot 8}{100} = 621.04 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Cr}_2\text{O}_3_{\text{esc}}} = \frac{7\,763 \cdot 20}{100} = 1\,552.6 \text{ kg}$$

$$m_{\text{MnO}_{\text{esc}}} = \frac{7\,763 \cdot 6}{100} = 465.78 \text{ kg}$$

2.7 Periodo de reducción de la escoria en el H.A.R.

Para mantener una escoria básica y reducida se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

a) Ataque químico: mantener un balance de las cantidades de sílice que se forman con proporción o basicidad de 2.0-2.5.

b) Erosión por acción mecánica: evitar grandes cantidades de escoria y mantener un insuflado normal y estable de gases inertes.

De la masa de óxidos presentes en la escoria se logra la siguiente recuperación:

FeO - 7% Cr₂O₃ - 13% MnO - 2%

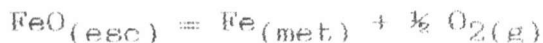
1. Cálculo de la masa de óxidos que es posible reducir.

$$m_{\text{FeO}_{\text{red}}} = \frac{m_{\text{FeO}_{\text{esc}}} \cdot 7}{8} = 534.41 \text{ kg}$$

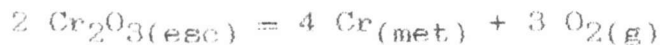
$$m_{\text{Cr}_2\text{O}_3\text{red}} = \frac{m_{\text{Cr}_2\text{O}_3\text{esc}} \cdot 13}{20} = 1\,009.19 \text{ kg}$$

$$m_{\text{MnO}_{\text{red}}} = \frac{m_{\text{MnO}_{\text{esc}}} \cdot 2}{6} = 155.26 \text{ kg}$$

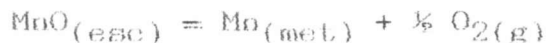
2. Masa de hierro, cromo, y manganeso que se reduce.



$$m_{\text{Fe}_{\text{red}}} = \frac{m_{\text{FeO}_{\text{red}}} \cdot \text{MMFe}}{\text{MMFeO}} = 422.65 \text{ kg}$$



$$m_{\text{Cr}_{\text{red}}} = \frac{m_{\text{Cr}_2\text{O}_3\text{red}} \cdot 4\text{MMCr}}{2\text{MMCr}_2\text{O}_3} = 690.50 \text{ kg}$$



$$m_{\text{Mn}_{\text{red}}} = \frac{m_{\text{MnO}_{\text{red}}} \cdot \text{MMMn}}{\text{MMMnO}} = 120.27 \text{ kg}$$

La reducción de la escoria se realiza añadiendo como materiales reductores FeSi 75 y Al 95. La cantidad de reductor a añadir está en dependencia de la masa de oxígeno que es necesario reducir.

3. Cálculo de la masa total de oxígeno a reducir.

$$m_{\text{O}_2\text{red}} = \frac{m_{\text{FeO}_{\text{red}}} \cdot \text{MMO}}{\text{MMFeO}} = 119 \text{ kg}$$

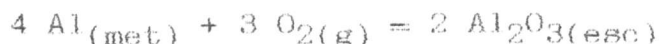
$$m_{2O_2red} = \frac{m_{Cr_2O_3red} \cdot 3MMO_2}{2MMCr_2O_3} = 319 \text{ kg}$$

$$m_{3O_2red} = \frac{m_{MnO_{red}} \cdot MMO}{MMMnO} = 35 \text{ kg}$$

$$m_{tO_2red} = m_{1O_2red} + m_{2O_2red} + m_{3O_2red} = 473 \text{ kg}$$

4. Cálculo de la masa de FeSi 75 y Al necesario para la reducción de la escoria.

La reducción se realizará desoxidando el 85 % del oxígeno con Al y el 15 % con FeSi 75.



a) Masa de oxígeno a reducir con Al 95.

$$m_{O_2Al} = \frac{m_{tO_2red} \cdot 85}{100} = 402 \text{ kg}$$

b) Masa de aluminio que reacciona con el oxígeno a reducir.

$$m_{Al} = \frac{m_{O_2Al} \cdot 4MMAI}{3MMO_2} = 452.25 \text{ kg}$$

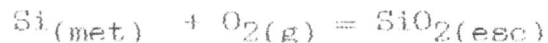
c) Masa de Al 95 ha añadir en la reducción .

$$m_{Al95} = \frac{m_{Al}}{0.95 \cdot 0.8} = 595 \text{ kg}$$

Donde:

0.95: Ley de aluminio en el reductor.

0.8: Rendimiento del aluminio.



a) Masa de oxígeno a reducir con FeSi 75.

$$m_{O_2FeSi} = \frac{m_{tO_2red} \cdot 15}{100} = 71 \text{ kg}$$

b) Masa de silicio que reacciona con el oxígeno a reducir.

$$m_{Si} = \frac{m_{O_2FeSi} \cdot MMSi}{MMO_2} = 62.12 \text{ kg}$$

c) Masa de FeSi 75 ha añadir en la reducción .

Se desea que a la salida del HAR el contenido de silicio en el baño metálico sea de 0.10 %. La masa de silicio necesario en el baño para obtener el porcentaje deseado será:

$$mSi_n = \frac{60\ 000 \cdot 0.10}{100} = 60\ \text{kg}$$

d) En forma de ferroaleación se necesita:

$$mFeSi75 = \frac{mSi_n + 62.12}{0.98 \cdot 0.75 \cdot 0.5} = 332\ \text{kg}$$

Donde:

0.75: Ley de silicio en el ferrosilicio.

0.5: Rendimiento del silicio.

0.98: Rendimiento del ferrosilicio.

Con esta masa de FeSi 75 se garantiza la desoxidación y el porcentaje deseado de silicio en el baño.

e) Masa de sílice que se forma durante la reducción.

$$mSiO_2 = \frac{mSi \cdot MMSiO_2}{MMSi} = 133\ \text{kg}$$

Análisis de la basicidad.

Etapa	SiO ₂ (kg)	CaO (kg)	B
Reducción	1 364.25	2 955.34	2.16

La reducción concluye en el vertido del acero en la cuchara. Este se lleva a cabo inmediatamente después de haberse realizado la reducción de la escoria con FeSi y Al.

2.8 Período de vertido del metal en la cuchara.

Composición química del metal a la salida del horno:

C-0.60% Si-0.10% Mn-0.91% P-0.035% S-0.02% Cr-17.07% Ni-9.0%

Durante el vertido del metal en la cuchara ocurre la oxidación de determinados elementos con el aire de la atmósfera, por lo que es necesario el ajuste de los mismos en el horno de cuchara.

Composición química del metal después del vertido:

C-0.58% Si-0.083% Mn-0.80% P-0.032% S-0.018% Cr-16.77% Ni-9.0%

Tiempo tap-top-tap del H.A.E.

OPERACION	TIEMPO (min.)
. Carga de la 1 ^{era} cesta	3
. Fusión de la 1 ^{era} cesta	43
. Carga de la 2 ^{da} cesta	3
. Fusión de la 2 ^{da} cesta	31
. Muestra y temperatura (T≈1680°C)	10
. Reducción	20
. Muestra y temperatura	3
. Vertido (T= 1710-1725°C)	6
. Reparación y alargamiento elect.	20
. Otros	10
TOTAL	149

En la fig.5 aparece representada la práctica operativa del H.A.E.

2.9 Periodo de ajuste.

Una vez que el metal se encuentre en la cazuela se realiza el desescochado hasta dejar aproximadamente 500 kg de escoria. La temperatura de arribo al horno de cuchara es de 1590 °C. Luego se añaden 243 kg de cal más 20 kg de fluorita y se funden con el arco. Cuando se ha alcanzado una temperatura de 1650-1670 °C se comienza a adicionar los materiales, previamente calculados, para lograr un ajuste de la composición química. En ACINOX esto se realiza mediante un programa que tiene en cuenta la composición química de todas las materias primas utilizadas, sus rendimientos, el rendimiento de los elementos, el balance de masa, las temperaturas óptimas del proceso, la composición química y basicidad de la escoria, las pérdidas de temperatura al adicionar cualquier material y los costos de producción.

Al realizar el ajuste, con el peso neto de las diferentes adiciones se realiza un cómputo para obtener una composición química que se corresponda con la masa final.

1. Ajuste del cromo.

Al horno de cuchara entraron 10 063 kg de cromo que en porcentaje representan 16.77 %. El ajuste se realizará hasta 18 %.

a) Masa de cromo necesario para realizar el ajuste.

$$mCr_j = \frac{61\,500 \cdot 18}{100} = 11\,070 \text{ kg}$$

Donde:

61 500: Masa final.

b) Masa de cromo necesario en el ferrocromo.

$$mCr_n = mCr_j - 10\,063 = 1\,008 \text{ kg}$$

c) En forma de ferroaleación se necesita:

$$mFeCr = \frac{mCr_n}{0.7002 \cdot 0.98 \cdot 0.98} = 1\,500 \text{ kg}$$

Donde:

0.98: Rendimiento del cromo en el horno de cuchara.

d) Masa de silicio que aporta el ferrocromo.

$$mSi_{FeCr} = \frac{mFeCr \cdot 0.82}{100} = 12.3 \text{ kg}$$

e) Masa de carbono que aporta el ferrocromo.

$$mC_{FeCr} = \frac{mFeCr \cdot 6.90}{100} = 103.5 \text{ kg}$$

2. Ajuste del manganeso.

Al horno de cuchara entraron 481 kg de manganeso que en porcentaje representan 0.8 %. El ajuste se realizará hasta 1.0 %.

a) Masa de manganeso necesario para realizar el ajuste.

$$mMn_j = \frac{61\,500 \cdot 1.0}{100} = 615 \text{ kg}$$

b) Masa de manganeso necesario en el ferromanganeso.

$$mMn_n = mMn_j - 481 = 134 \text{ kg}$$

c) En forma de ferroaleación se necesita:

$$mFeMn = \frac{mMn_n}{0.7910 \cdot 0.98 \cdot 0.90} = 192 \text{ kg}$$

Donde:

0.90: Rendimiento del manganeso en el horno de cuchara.

d) Masa de silicio que aporta el ferromanganeso.

$$m_{Si_{FeMn}} = \frac{m_{FeMn} \cdot 0.07}{100} = 0.13 \text{ kg}$$

e) Masa de carbono que aporta el ferromanganeso.

$$m_{C_{FeMn}} = \frac{m_{FeMn} \cdot 6.71}{100} = 12.88 \text{ kg}$$

3. Ajuste del niquel.

Al horno de cuchara entraron 5 400 kg de niquel que en porcentaje representan 9.0 %. El ajuste se realizará hasta 9.32 %.

a) Masa de niquel necesario para realizar el ajuste.

$$m_{Ni_j} = \frac{61\,500 \cdot 9.32}{100} = 5\,731.8 \text{ kg}$$

b) Masa de niquel necesario en el sinter de niquel.

$$m_{Ni_o} = m_{Ni_j} - 5\,400 = 331.8 \text{ kg}$$

c) En forma de sinter de niquel se necesita:

$$m_{NiO \cdot Ni} = \frac{m_{Ni_o}}{0.8907 \cdot 0.96 \cdot 1.0} = 388 \text{ kg}$$

Donde:

1.0: Rendimiento del niquel en el horno de cuchara.

d) Masa de carbono que aporta el sinter de niquel.

$$m_{C_{NiO \cdot Ni}} = \frac{m_{NiO \cdot Ni} \cdot 0.12}{100} = 0.46 \text{ kg}$$

4. Masa de carbono total en el horno de cuchara.

Al horno de cuchara entraron 348 kg de carbono (0.58 %).

$$m_{C_t} = 348 + m_{C_{FeCr}} + m_{C_{FeMn}} + m_{C_{NiO \cdot Ni}} = 464.84 \text{ kg}$$

que en porcentaje representan 0.75 %.

5. Masa de silicio total en el horno de cuchara.

Al horno de cuchara entraron 49.8 kg de silicio (0.083 %). A pesar de que el tratamiento del metal en el horno de cuchara tiene un corto periodo de duración, lo cual evita la oxidación de

determinados elementos, se realiza la adición de 50 kg de FeSi para mantener la escoria desoxidada y favorecer el ajuste. La masa de silicio que aporta esta adición será:

$$mSi_{desox} = \frac{mFeSi \cdot 75}{100} = 37.5 \text{ kg}$$

El rendimiento del silicio en el horno de cuchara es de 50 %, por tanto las adiciones realizadas para lograr el ajuste aportarán:

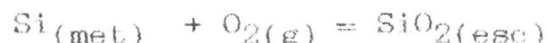
$$mSi_{ad} = (mSi_{FeCr} + mSi_{FeMn} + mSi_{des}) \cdot 0.5 = 25 \text{ kg}$$

En el baño quedarán:

$$mSi_B = 49.8 + mSi_{ad} = 74.8 \text{ kg}$$

que en por ciento representa 0.12 %.

El otro 50 % (25 kg) pasará a la escoria en forma de sílice. Se estima que luego del desescoriado en los 500 kg de escoria existen 150 kg de CaO y 100 kg de SiO₂.



$$mSiO_2 = \frac{mSi \cdot MMSiO_2}{MMSi} = 53.6 + 100 \text{ (escoria)} = 153.6 \text{ kg}$$

Durante el tratamiento del metal en el horno de cuchara se ajusta la basicidad a 2.4 con cal, además se añade fluorita, en una relación con la cal de 1/12, para aumentar la fluidez de la escoria.

$$mCaO = 2.4 \cdot mSiO_2 = 368.64 - 150 \text{ (escoria)} = 218.64 \text{ kg}$$

$$mcal = mCaO / 0.9 = 243 \text{ kg} \quad mCaF_2 = mcal / 12 = 20 \text{ kg}$$

Composición química del metal a la salida del horno de cuchara:

C-0.75% Si-0.12% Mn-1.0% P-0.032% S-0.18% Cr-18.0% Ni-9.32%

A una temperatura de 1630-1650 °C, con la composición química deseada, se desescoria hasta dejar aproximadamente 500 kg de escoria y la cazuela se introduce en el VOHSD.

2.10 Tratamiento del metal al vacío.

1. Etapa de descarburación u oxidación.

La temperatura de comienzo y final de la oxidación es de 1625 y 1700 °C respectivamente. El insuflado de oxígeno se realizará

hasta obtener 0.1 % de carbono.

a) Cálculo de la cantidad de carbono a oxidar.

$$mC_{ox} = \frac{(0.75-0.1) \cdot 61\,500}{100} = 400 \text{ kg}$$

b) Volumen de oxígeno necesario.

$$VO_2 = \frac{0.94 \cdot mC_{ox}}{0.5} = 752 \text{ m}^3$$

Donde:

0.94: Cantidad estequiométrica de oxígeno para oxidar 1 kg de carbono [m^3/kg].

0.5: Rendimiento del carbono.

c) Tiempo total de insuflado.

Según los datos técnicos de la lanza de oxígeno, la misma está diseñada para insuflar $12 \text{ m}^3/\text{min}$.

$$T_{ins} = \frac{752 \cdot 1}{12} = 63 \text{ min}$$

d) Consumo específico de oxígeno:

$$C_e = \frac{VO_2}{61.50} = 12.23 \text{ m}^3/\text{ton}$$

2. Etapa de degasificación.

El boiling off se efectúa durante 20 minutos. Obteniéndose como resultado un carbono de 0.02 % y una temperatura de $1685 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1 Análisis de los elementos.

a) Análisis del cromo.

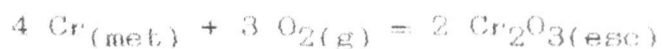
El rendimiento del cromo en el VOHSD es de 98 %, por tanto quedarán en el baño:

$$mCr_p = \frac{11\,070 \cdot 98}{100} = 10\,848.6 \text{ kg}$$

Existirán unas pérdidas de cromo de:

$$mCr_p = 11\,070 - mCr_p = 221.4 \text{ kg}$$

a.1) Masa de oxígeno que reacciona con el cromo.



$$m\text{O}_{\text{Cr}} = \frac{m\text{Cr}_p \cdot 3\text{MMO}_2}{4\text{MMCr}} = 102.23 \text{ kg}$$

a.2) Masa de cromita que se forma.

$$m\text{Cr}_2\text{O}_3 = \frac{m\text{Cr}_p \cdot 2\text{MMCr}_2\text{O}_3}{4\text{MMCr}} = 323.73 \text{ kg}$$

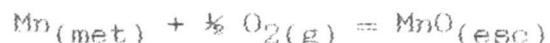
b) Análisis del manganeso.

El rendimiento del manganeso en el VOHSD es de 50 %, por tanto quedarán en el baño:

$$m\text{Mn}_b = \frac{615 \cdot 50}{100} = 307.5 \text{ kg}$$

El otro 50 % (307.5 kg) reaccionará con el oxígeno y pasará a la escoria.

b.1) Masa de oxígeno que reacciona con el manganeso.



$$m\text{O}_{\text{Mn}} = \frac{307.5 \cdot \text{MMO}}{\text{MMMn}} = 89.45 \text{ kg}$$

b.2) Masa de óxido de manganeso que se forma.

$$m\text{MnO} = \frac{307.5 \cdot \text{MMMnO}}{\text{MMMn}} = 397 \text{ kg}$$

c) Análisis del silicio.

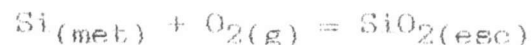
El rendimiento del silicio en el VOHSD es de 15 %, por tanto quedarán en el baño:

$$m\text{Si}_b = \frac{74.83 \cdot 15}{100} = 11.22 \text{ kg}$$

Existirán unas pérdidas de silicio de:

$$m\text{Si}_p = 74.83 - m\text{Si}_b = 63.61 \text{ kg}$$

c.1) Masa de oxígeno que reacciona con el silicio.



$$m_{O_{Si}} = \frac{63.61 \cdot M_{MO_2}}{M_{MSi}} = 72.7 \text{ kg}$$

e.2) Masa de sílice que se forma.

Se estima que luego del desescoriado final en el horno de cuchara, en los 500 kg de escoria existen 200 kg de CaO y 100 kg de SiO₂.

$$m_{SiO_2} = \frac{63.61 \cdot M_{MSiO_2}}{M_{MSi}} = 136.3 + 100 \text{ (escoria)} = 236.3 \text{ kg}$$

Con el objetivo de formar la nueva escoria con una basicidad de 2.34, antes del proceso de oxidación se adiciona cal y fluorita.

$$m_{CaO} = 2.34 \cdot m_{SiO_2} = 553 - 200 \text{ (escoria)} = 353 \text{ kg}$$

$$m_{cal} = m_{CaO} / 0.9 = 393 \text{ kg} \quad m_{CaF_2} = m_{cal} / 12 = 33 \text{ kg}$$

c) Masa total de oxígeno que reacciona.

$$m_{tO_2} = m_{O_{Cr}} + m_{O_{Mn}} + m_{O_{Si}} = 264.38 \text{ kg}$$

El rendimiento del carbono es de 50 %, por lo que el 50 % del oxígeno insuflado no reacciona con este. En kg representa:

$$m_{O_{nr}} = \frac{VO_2 \cdot 0.5 \cdot 32}{22.4} = 537.14 \text{ kg}$$

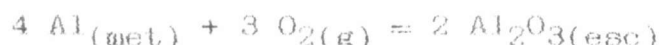
De estos 537.14 kg de oxígeno que no reaccionaron con el carbono, 264.38 kg reaccionaron con el cromo, manganeso y silicio, por lo que será necesario reducir 272.76 kg.

Balace de escoria (entrada al VOHSD y luego de la oxidación).

ASPECTOS	(kg)
. Escoria de entrada al VOHSD	500.0
. Oxidación del silicio	136.30
. Oxidación del cromo	323.73
. Oxidación del manganeso	397.0
. Cal de balanceo	393.0
. Adición de fluorita	33.0
MASA TOTAL	1 783

2.11 Período de reducción de la escoria en el V.O.H.S.D.

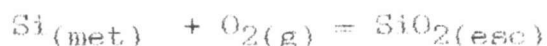
Para llevar a cabo la reducción de la escoria partimos de 170 kg de AL 95 (161.50 kg de Al).



a) Masa de oxígeno a eliminar con Al 95.

$$m_{\text{O}_2\text{Al}} = \frac{161.50 \cdot 3MMO_2}{4MMA1} = 143.5 \text{ kg (53\%)}$$

El resto del oxígeno, 129.26 kg (47%), se eliminará con FeSi 75.



b) Masa de silicio que reacciona con el oxígeno a reducir.

$$m_{\text{Si}} = \frac{129.26 \cdot MMSi}{MMO_2} = 113.1 \text{ kg}$$

c) Masa de FeSi 75 ha añadir en la reducción.

$$m_{\text{FeSi75}} = \frac{m_{\text{Si}}}{0.75 \cdot 0.98 \cdot 0.75} = 568 \text{ kg}$$

Donde:

0.75: Rendimiento del silicio en el ferrosilicio, durante la reducción en el VOHSD.

d) Masa de sílice que se forma durante la reducción.

$$m_{\text{SiO}_2} = \frac{m_{\text{Si}} \cdot MMSiO_2}{MMSi} = 242.36 \text{ kg}$$

Como resultado de la reducción de la escoria se obtiene la siguiente recuperación:

a) Recuperación del cromo.

De los 221.5 kg de cromo oxidados se logra una recuperación de 65 % que equivale a 143.97 kg (210.41 kg de Cr_2O_3 reducida). La masa total de cromo en el baño será de:

$$10\ 848.6 + 143.97 = 10\ 993 \text{ kg}$$

b) Recuperación del manganeso.

De los 307.5 kg de manganeso oxidados se recupera el 85 % que equivale a 261.37 kg (337.40 kg de MnO reducido). La masa total de manganeso en el baño será de:

$$307.5 + 261.37 = 568.87 \text{ kg}$$

La masa total de escoria después del proceso de reducción es la siguiente:

$$M_{esc_{red}} = M_{esc_{ox}} - m_{Cr_2O_3_{red}} - m_{MnO_{red}} = 1\ 235\ kg$$

Donde:

$M_{esc_{ox}}$: Masa total de escoria después de la oxidación.

$m_{Cr_2O_3_{red}}$: Masa de cromita reducida.

$m_{MnO_{red}}$: Masa de óxido de manganeso reducido.

2.12 Ajuste final.

Al realizar el ajuste, con el peso neto de las diferentes adiciones se realiza un cómputo para obtener una composición química que se corresponda con la masa final.

1. Ajuste del cromo.

El ajuste se realizara hasta 18.25 % con FeCrHC.

a) Masa de cromo necesario para realizar el ajuste.

$$m_{Cr_j} = \frac{62\ 000 \cdot 18.25}{100} = 11\ 315\ kg$$

Donde:

62 000: Masa final.

b) Masa de cromo necesario en el ferrocromo.

$$m_{Cr_D} = m_{Cr_j} - 10\ 993 = 322\ kg$$

c) En forma de ferroaleación se necesita:

$$m_{FeCr} = \frac{m_{Cr_D}}{0.7002 \cdot 0.98 \cdot 1.00} = 468\ kg$$

Donde:

1.0: Rendimiento del cromo en el ajuste.

d) Masa de silicio que aporta el ferrocromo.

$$m_{Si_{FeCr}} = \frac{m_{FeCr} \cdot 0.82}{100} = 3.83\ kg$$

e) Masa de carbono que aporta el ferrocromo.

$$m_{C_{FeCr}} = \frac{m_{FeCr} \cdot 6.90}{100} = 32.3\ kg$$

2. Ajuste del manganeso.

El ajuste se realizará hasta 1.40 % con FeMnLC.

a) Masa de manganeso necesario para realizar el ajuste.

$$mMn_j = \frac{62\ 000 \cdot 1.40}{100} = 868\ \text{kg}$$

b) Masa de manganeso necesario en el ferromanganeso.

$$mMn_n = mMn_j - 568.87 = 299.13\ \text{kg}$$

c) En forma de ferroaleación se necesita:

$$mFeMnLC = \frac{mMn_n}{0.8090 \cdot 0.98 \cdot 0.97} = 390\ \text{kg}$$

Donde:

0.8090: Ley de manganeso en el ferromanganeso bajo carbono.

0.97: Rendimiento del manganeso en el ajuste.

d) Masa de silicio que aporta el ferromanganeso.

$$mSi_{FeMnLC} = \frac{mFeMnLC \cdot 0.30}{100} = 1.17\ \text{kg}$$

e) Masa de carbono que aporta el ferromanganeso.

$$mC_{FeMnLC} = \frac{mFeMnLC \cdot 0.74}{100} = 2.88\ \text{kg}$$

3. Ajuste del silicio.

El ajuste se realizará hasta 0.36 % con FeSi 75.

a) Masa de silicio necesario para realizar el ajuste.

$$mSi_j = \frac{62\ 000 \cdot 0.36}{100} = 223.2\ \text{kg}$$

b) Masa de silicio necesario en el ferrosilicio.

$$mSi_n = mSi_j - 11.22 = 211.98\ \text{kg}$$

c) En forma de ferroaleación se necesita:

$$mFeSi = \frac{mSi_n}{0.75 \cdot 0.98 \cdot 0.96} = 300\ \text{kg}$$

Donde:

0.96: Rendimiento del silicio en el ajuste.

4. Ajuste del carbono.

Como resultado del boiling off el carbono se encontraba en 0.002 % (1.24 kg). Al añadir los materiales para el ajuste final, estos aportan determinada cantidad de carbono. Su masa total será:

$$mC_t = 1.24 + mC_{FeCr} + mC_{FeMnLC} = 36.42 \text{ kg}$$

que en por ciento representan 0.058 %, valor dentro del rango para el acero a producir.

5. Ajuste del níquel.

La masa de níquel en el baño metálico es de 5 731.8 kg que en por ciento representan:

$$\%Ni_b = \frac{5\,731.8 \cdot 100}{62\,000} = 9.24 \%$$

por ciento permisible en el acero AISI 304.

Análisis de la basicidad.

a) Masa total de sílice formada en cada una de las etapas del tratamiento del metal en el VOHSD.

$$mSiO_2 = 100(\text{esc. inicial}) + 136.3(\text{oxid.}) + 242.36(\text{red}) + 10.7(\text{ajus})$$

$$mSiO_2 = 489.37 \text{ kg}$$

b) Masa de cal y fluorita que se añade.

$$mCaO = 2.4 \cdot mSiO_2 = 1\,174.46 - 553 (\text{CaO inicial}) = 621 \text{ kg}$$

$$mcal = mCaO / 0.9 = 690 \text{ kg}$$

$$mCaF_2 = mcal / 12 = 57 \text{ kg}$$

La masa de escoria final será:

$$Mesc_f = Mesc_{red} + mcal + mCaF_2 = 1\,982 \text{ kg}$$

Composición química final del acero:

C-0.058% Si-0.36% Mn-1.40% P-0.03% S-0.018% Cr-18.25% Ni-9.24%

En el ajuste final se debe garantizar la temperatura óptima para la posterior etapa de vaciado (1710-1725 °C).

2.13 Cálculo del número ferrítico.

La determinación del número ferrítico es de gran importancia ya que su valor ó rango siempre es una especificación del cliente en dependencia del posterior uso del acero a adquirir.

Mientras mayor sea el número ferrítico, dentro del rango establecido, mayor es la calidad del acero ya que los sulfuros que se encuentran en su estructura quedan atrapados por la ferrita. Esto disminuye la posibilidad de que al someter el acero a un tratamiento térmico ó laminación estos sulfuros, por su baja temperatura de fusión, se disuelvan y formen grietas.

Si el número ferrítico es extremadamente elevado el acero es difícil de laminar ya que es más propenso a la formación de grietas y no es posible su uso en aquellos lugares donde se encuentre sometido a grandes esfuerzos mecánicos y variaciones bruscas de temperatura.

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$F_n = \frac{(30 \cdot \%C + 30 \cdot \%N + \%Ni + 0.5 \cdot \%Mn + 36.5)}{(\%Mo + \%Cr + 1.5 \cdot \%Si + 0.5 \cdot \%Nb + 17.6)} \cdot 99.7 + 138$$

$$F_n = 4.57 \%$$

CALCULO ECONOMICO.

El cálculo económico se basa en los precios de compra de las diferentes materias primas e insumos utilizados durante el proceso.

De forma general el cálculo se realiza de la siguiente forma:

a) Determinación del índice de consumo.

Los índices de consumo se determinan en base a las 60 toneladas de acero obtenidas en una colada.

$$I.C = \frac{M_{t.a}}{60}, \text{ [kg/ton]}$$

Donde:

I.C: Índice de consumo.

$M_{t.a}$: Masa total de material utilizado en el agregado.

En el caso del ferrocromo y el sinter de níquel el precio depende del cromo y el níquel contenido respectivamente. Su índice de consumo será igual a:

$$I.C = \frac{M_{t.a} \cdot Le}{60}, \text{ [kg/ton]}$$

Donde:

Le : Ley del elemento (Ni,Cr) en el material (NiO•Ni,FeCr).

b) Cálculo del costo por toneladas.

$$C = \frac{I.C \cdot P}{1000}, \text{ [USD/ton]}$$

Donde:

P : Precio de compra del material (USD/ton).

c) Cálculo del costo total de colada

El costo total de colada se obtiene de la sumatoria de los costos totales en cada agregado y el costo total de otros insumos utilizados en el proceso.

$$\begin{aligned} CT_{colada} &= CT_{H.A.E} + CT_{L.F} + CT_{V.O.H.S.D} + CT_{otros} \\ &= 835.80 + 51.706 + 24.126 + 79.28 \\ &= 990.912 \text{ USD/ton} \end{aligned}$$

Los resultados del cálculo económico aparecen resumidos en las tablas Nº 5, 6, 7 y 8.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Valoración de los resultados del cálculo de carga.

Partiendo de los resultados obtenidos a través del cálculo de carga podemos hacer la siguiente valoración de la tecnología desarrollada:

1. El 84 % de la carga lo constituye la chatarra de acero inoxidable, lo cual aumenta el rendimiento del cromo, disminuye el tiempo tap-top-tap del H.A.R y la cantidad de ferrocromo alto carbono, ferromanganeso alto carbono y ferrosilicio de carga.
2. La adición en la carga de la cantidad necesaria de trozos de electrodos de grafito, permite obtener el porcentaje de carbono deseado a la salida del H.A.R sin la necesidad del insuflado de oxígeno al baño metálico y con la debida protección de los demás elementos.
3. El proceso de reducción en el H.A.R es favorecido por un volumen de escoria y contenido de óxidos en esta, limitados.
4. La utilización de sinter de níquel disminuye la posibilidad de pérdidas en la transportación y en el H.A.R por aspiración, dada su granulometría. Además su limitado contenido de oxígeno disminuye la probabilidad de que ocurran reacciones violentas en el baño.
5. Número ferrítico.

Mediante la fórmula que relaciona el níquel y el cromo equivalente se obtiene un número ferrítico de 4.57 %. Según el rango exigido por la marca de un 2 % como valor mínimo, 4 % óptimo y 6 % máximo, el valor obtenido satisface las exigencias para evitar defectos posteriores tanto en la superficie como en el interior de los planchones y palanquillas.

Valoración económica.

La valoración económica de la tecnología desarrollada, se fundamenta en los precios de compra de las diferentes materias primas e insumos, utilizados en la empresa ACINOX para la obtención del acero inoxidable AISI 304. El costo de producción está basado en los índices de consumo a lo largo del proceso.

La concepción de utilizar el 100 % de chatarra de acero inoxidable AISI 430 para la obtención del AISI 304, mediante la refusión, disminuye la cantidad de ferroaleaciones de carga (ferrocromo, ferromanganeso, ferrosilicio) ya que dicha chatarra es portadora de porcentajes elevados de dichos elementos, permitiendo disminuir los costos de producción y de importación.

La utilización de sinter de níquel cubano evita la necesidad de importar del extranjero materias primas con contenido de níquel (sinter de níquel, briquetas, ferroníquel, etc),

disminuyendo así los gastos por transportación.

Los índices de consumo de electrodos, refractarios y energía eléctrica, disminuyen al reducirse el tiempo tap-top-tap del H.A.E.

En cuanto al costo total por tonelada de la tecnología desarrollada, existe una diferencia de 45 USD/ton con respecto al costo de la tecnología tradicional utilizada en ACINOX.

CONCLUSIONES

1. Se demuestra que con la utilización de chatarra de acero inoxidable el proceso se hace más efectivo y económico.
2. La tecnología que se propone, ofrece ventajas de tiempo de trabajo aumentando la productividad de la empresa ACINOX.
3. El sinter de níquel utilizado tiene un mejor rendimiento como materia prima, ofrece menos probabilidades de la ocurrencia de reacciones violentas y garantiza un alto rendimiento del níquel como elemento.
4. Se obtiene un ahorro, en cuanto a costo por tonelada, de 45 USD/ton.

RECOMENDACIONES

1. Llevar a cabo refusiones de chatarra de acero inoxidable para la disminución de los costos de producción y tiempos de trabajo.
2. Efectuar análisis de escoria a lo largo del proceso con el objetivo de determinar el comportamiento de la basicidad y de los diferentes elementos y calcular los rendimientos de los mismos en las condiciones de ACINOX.
3. Mantener un riguroso control sobre la regulación de la apertura de la válvula reguladora del sistema de aspiración de humos.
4. Utilización de un régimen eléctrico de potencia alta, así como una garantía de materias primas que permitan un trabajo continuo de los agregados y conserve la frecuencia de las cargas al horno.

BIBLIOGRAFIA

1. Cabezas Obregón, Guillermo; Fanjul Rayneri, Amalio; Smirnov Nicolai: Producción de acero. Editorial Pueblo y Educación, 1994.
2. Kudrin V. A.: Metalurgia del acero. Editorial Mir, 1984.
3. Proyecto Básico ACINOX-TUNAS.
4. Rodríguez Vilomara, Guillermo: Tecnología de elaboración de aceros inoxidable. Edición provicional. Tomo I. Enero 1989.
5. Rodríguez Vilomara, Guillermo: Tecnología de elaboración de aceros inoxidable. Edición provicional. Tomo II. Enero 1989.
6. The electric arc furnace. International iron and steel institute. Committee on technology. Brussels. 1990.

Tabla N°1 Composición química del acero a producir, según la norma internacional A.I.S.I.304 (%).

Acero	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nmáx.	Almáx.	Cumáx.	Comáx.	Sn
A.I.S.I.304	0.03-0.07	0.30-0.70	1.3-1.9	0.038	0.020	9.0-10.5	18-19.5	≈0.50	0.035	0.015	0.25	0.50	0.015

Tabla N°2 Composición química del metal al salir del H.A.E (%).

Acero	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
A.I.S.I.304	0.6	0.9	0.030	0.02	0.17	9.0	17.00

Tabla N°4 Composición de la carga bruta.

Material	P.Bruto (Kg)	Rm	Re	P.Netto (Kg)	C (Kg)	Mn (Kg)	P (Kg)	S (Kg)	Si (Kg)	Ni (Kg)	Cr (Kg)	Fe (Kg)
Chat. inox.	54 270.00	94	—	51 013.80	65.12	542.70	21.71	16.28	542.70	—	9 225.90	43 687.35
FeCrHC	3 877.87	98	90	3 420.28	267.57	—	1.08	1.78	31.80	—	2 715.28	860.89
FeMnHC	212.67	98	80	166.73	14.27	168.22	0.32	0.01	0.15	—	—	29.69
NiO•Ni	6 315.26	96	100	5 400.00	7.58	—	—	4.42	—	5 626.90	—	44.21
Grafito	400.00	100	60	240.00	392.00	—	—	—	—	—	—	—
TOTAL (Kg)	64 675.80	—	—	60 000.81	746.54	710.92	23.11	22.49	574.65	5 626.90	11 941.18	44 622.14
Composición química (%)					1.15	1.10	0.03	0.03	0.89	8.70	18.46	69.00

Rendimiento de la masa metálica: 92.77 %

Rm: rendimiento del material.
Re: rendimiento del elemento.

Tabla N°5 Fundamentación económica del H.A.R.

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
Chatarra inoxidable	904.5	266.5	241.05
FeCrHC (Cr contenido)	45.25	1 028.00	46.52
NiO•Ni (Ni contenido)	93.75	5 167.00	484.40
FeMnHC	3.54	630.00	2.23
FeSi 75	5.00	770.00	3.85
Al 95	7.66	700.00	5.36
Sub-total			783.41

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
Refractarios	22.00	927.00	20.39
Electrodos (500 mm)	5.00	2 480.00	12.40
Termopares	0.067 (U/ton)	1.50	0.10
Electricidad	650.00 (KWh/ton)	0.03	19.50
Sub-total			52.39
TOTAL H.A.R			835.80

Tabla N96 Fundamentación económica del Horno de Cuchara.

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
FeCrHC (Cr contenido)	16.40	1 028.00	16.86
NiO•Ni (Ni contenido)	5.40	5 167.00	27.90
FeMnHC	3.12	630.00	1.96
FeSi 75	0.813	770.00	0.626
CaF ₂	0.325	247.57	0.08
Sub-total			47.426

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
Refractarios	1.00	1 000.00	1.00
Electrodos (300 mm)	1.00	2 200.00	2.20
Termopares	- (U/ton)	1.50	-
Tomamuestras	- (U/ton)	2.50	-
Sondas Combinadas	0.03 (U/ton)	5.50	0.18
Electricidad	30.00 (KWh/ton)	0.03	0.90
Sub-total			4.28
TOTAL HORNO DE CUCHARA.			51.706

Tabla N°7 Fundamentación económica del V.O.H.S.D.

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
FeCrHC (Cr contenido)	5.17	1 028.00	5.314
FeMnLC	6.29	1 150.00	7.233
FeSi 75	8.14	770.00	6.271
Al 95	2.74	700.00	1.919
CaF ₂	1.45	247.57	0.359
Sub-total			21.096

INSUMOS	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
Refractarios (tapa)	4.00	653.00	2.61
Termopares	0.033 (U/ton)	1.50	0.05
Tomamuestras	- (U/ton)	2.50	-
Sondas Combinadas	0.067 (U/ton)	5.50	0.37
Sub-total			3.03
TOTAL V.O.H.S.D.			24.126

Tabla N98 Fundamentación económica de otros insumos.

INSUMOS	U/M	CONSUMO KG/TON	PRECIO USD/TON	COSTO USD/TON
Refractarios (cuchara)	kg/ton	38.40	640.00	22.27
Piezas especiales	kg/ton	3.20	5 500.00	17.60
Termopares	U/ton	0.03	1.50	0.05
Polvo de hierro	kg/ton	1.00	2 000.00	2.00
Polvo de cobertura	kg/ton	1.66	850.00	1.41
Polvo de lingotera	kg/ton	1.17	960.00	1.12
Polvo del cierre	kg/ton	0.50	307.00	0.15
Tubo 22 mm	U/ton	0.10	21.00	2.11
Tubo 16 mm	U/ton	0.10	15.00	1.51
Tubo 8 mm	U/ton	0.10	11.00	1.10
Tubo ceramizado	U/ton	0.05	23.00	1.15
Disco corte de refrac.	U/ton	0.001	750.00	0.75
Piedra abrasiva	U/ton	0.003	114.00	0.38
Marcador planch.	U/ton	0.008	7.00	0.06
Gas helio	U/ton	0.0003	276.00	0.08
Lubricantes	U/ton	-	-	2.50
Piezas de respuesto	U/ton	-	-	25.00
TOTAL				79.28

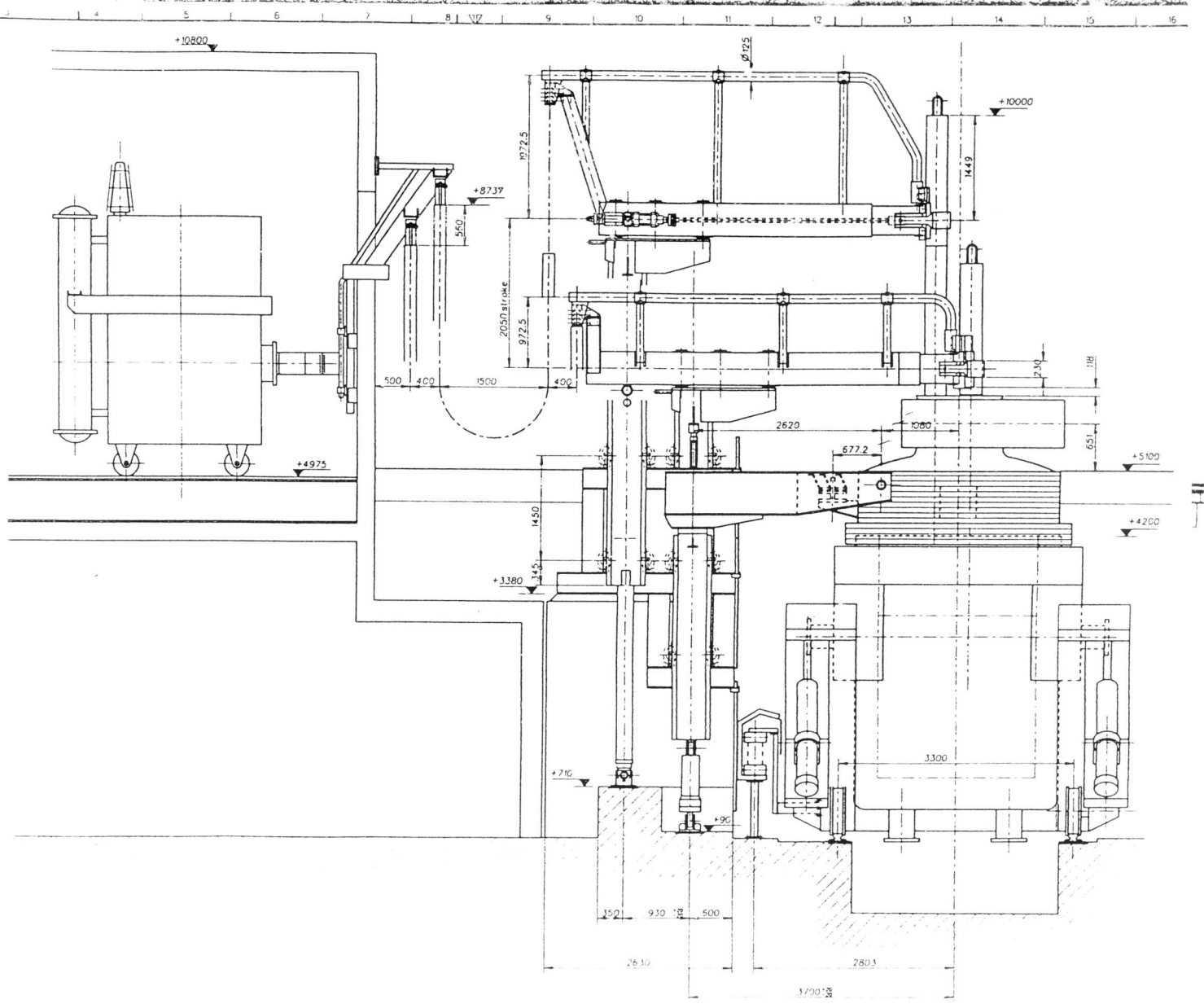
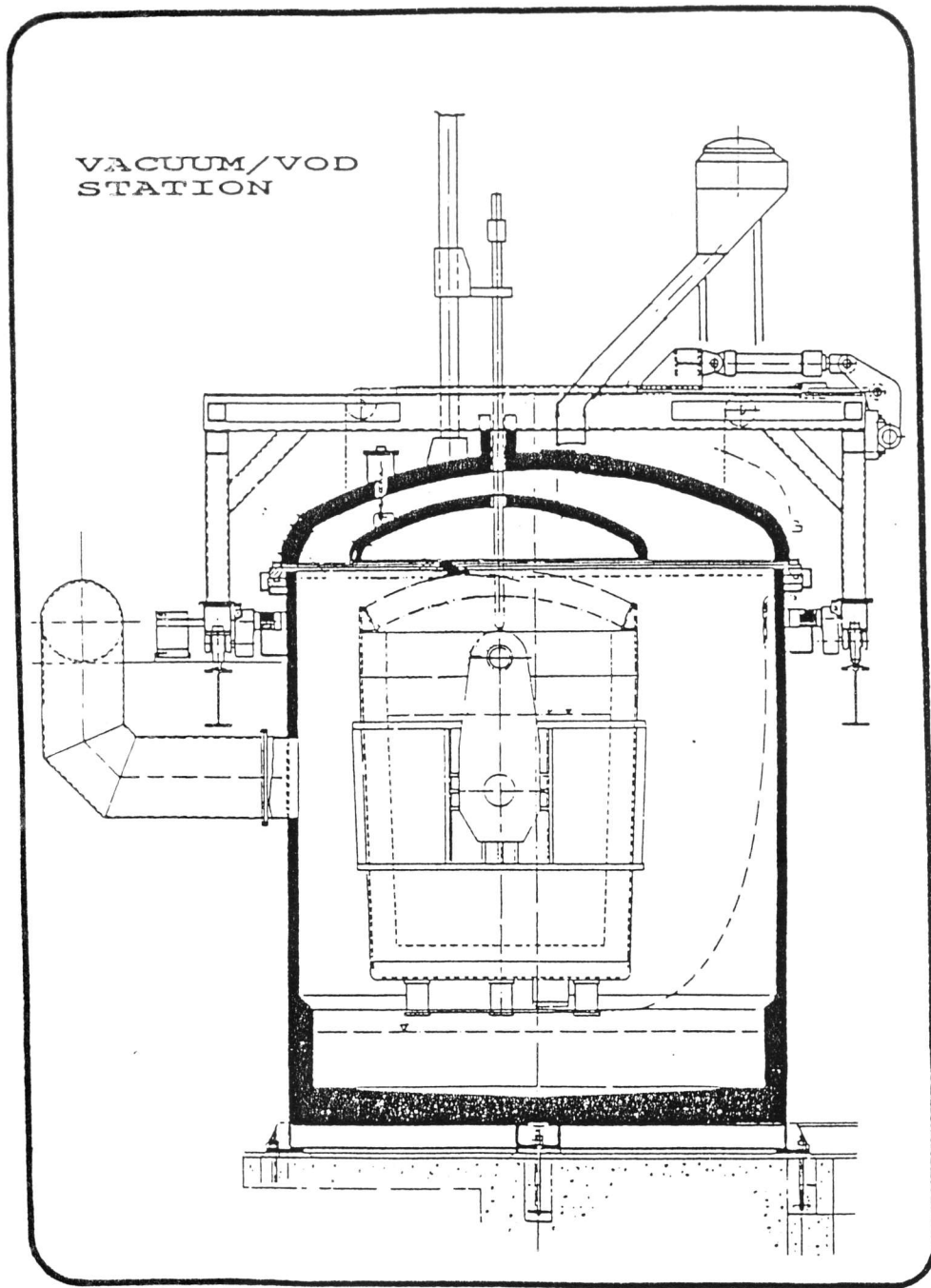


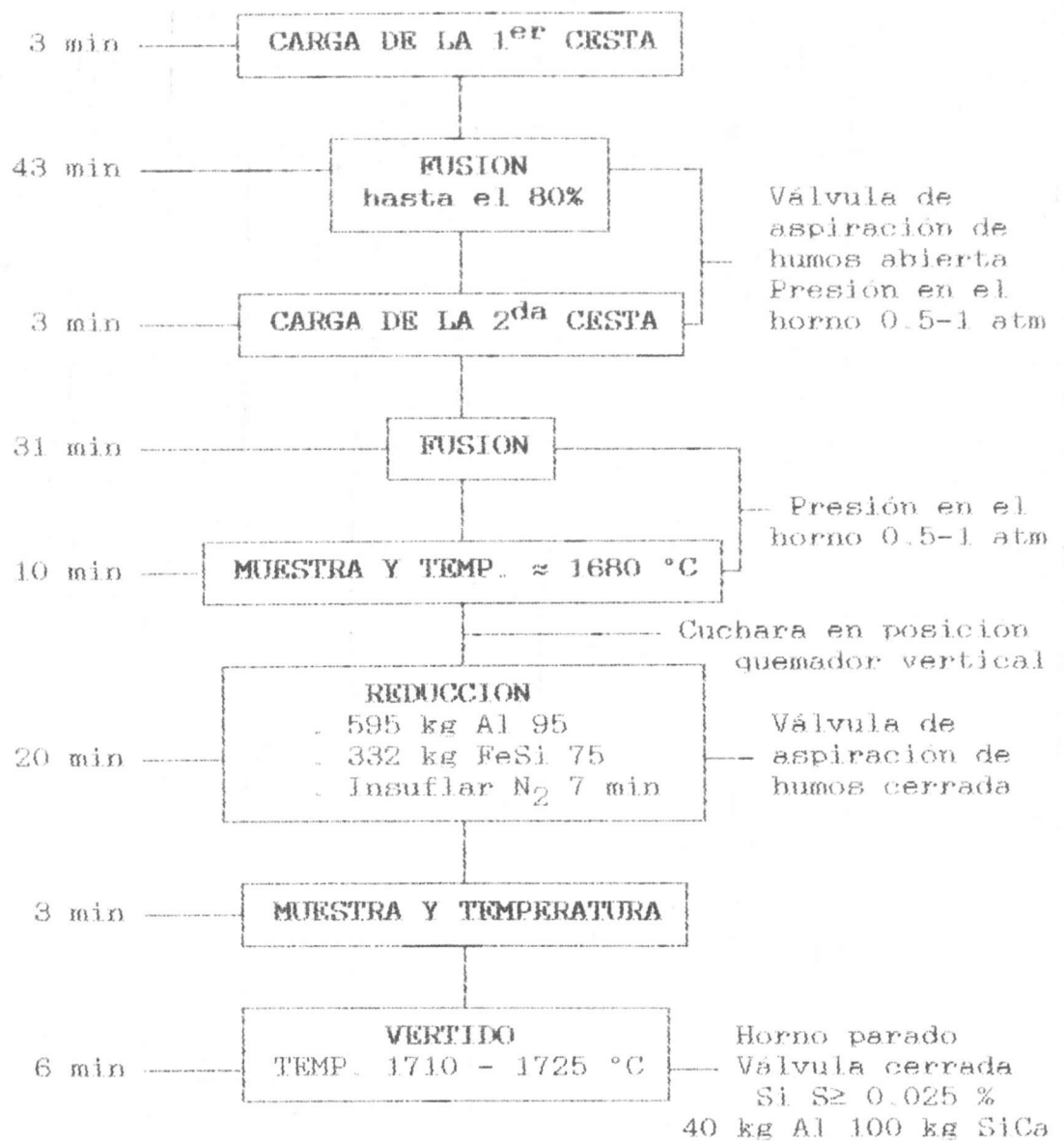
Fig. 2 Horno Cuchara



3111 TRS

4273 - VOHSD

Fig. 3 VOHSD



otros 30 min

Total 149 min

Nota: Si la temperatura del baño supera los 1725 °C se debe adicionar 1-3 toneladas de chatarra de acero inoxidable.

Fig.5 Práctica operativa del H.A.R.