



**INSTITUTO POLITECNICO  
NACIONAL.**



Escuela Superior de Ingeniería Química e  
Industrias Extractivas.

**“OBTENCION DE ACEROS MICRO-ALEADOS  
CON TITANIO (Ti), VANADIO (V) Y NIOBIO (Nb)  
EN HORNO DE INDUCCION.”**

**T E S I S.**

**PRESENTADA POR:**

Enrique De Muga Mendoza.

Alberto Delgado González.

**ASESOR:**

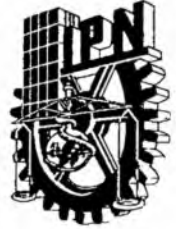
M.C. MIGUEL ANGELES HERNANDEZ



SECRETARIA  
DE  
EDUCACION PUBLICA

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



### DEPARTAMENTO DE PRÁCTICAS, VISITAS Y TITULACIÓN

T-134-05

México, D F., 12 de diciembre del 2005

**C. ENRIQUE DE MUNA MENDOZA**  
**C. JOSE ALBERTO DELGADO GONZALEZ**

Boleta:	Carrera:	Generación:
2001320401	IMM	2000-2004
96021005	IMM	2000-2004

Presentes

Los suscritos tenemos el agrado de informar a Ustedes, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente, denominado:

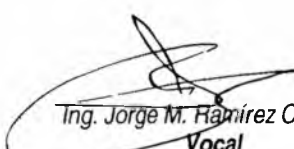
**“Obtención de aceros micro-aleados con titanio (Ti), Vanadio (V) y niobio (Nb) en horno de inducción”**

encontramos que el citado **TRABAJO DE TESIS COLECTIVA**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente

**JURADO**

  
M en C. Miguel Angeles Hernández  
**Presidente**

  
Ing. Jorge M. Ramírez Ceballos  
**Vocal**

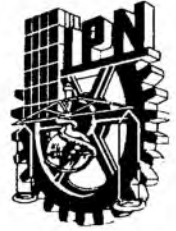
  
Dr. José F. Chávez Alcalá  
**Secretario**

c c p - Expediente



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



## DEPARTAMENTO DE PRÁCTICAS, VISITAS Y TITULACIÓN

T-134-05

México, D F , a 07 de diciembre del 2005

Al C Pasante

**ENRIQUE DE MUGA MENDOZA**  
**JOSE ALBERTO DELGADO GONZALEZ**

Boleta:  
**2001320401**  
**96021005**

Carrera:  
**IMM**  
**IMM**

Generación:  
**2000-2004**  
**2000-2004**


Calle Tabachin 13A  
Colonia Loma Linda  
Naucalpan  
Estado de México

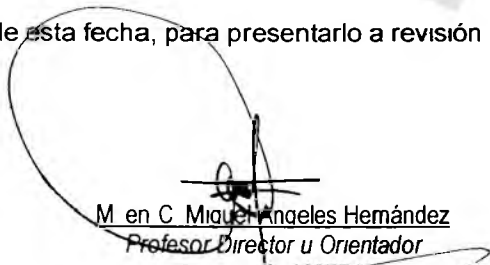
Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **C. M. en C. Miguel Angeles Hernández**, sea orientador en el Tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción, Tesis Colectiva, con el título y contenido siguientes

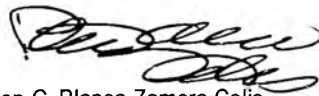
**“Obtención de aceros micro-aleados con titanio (Ti) , Vanadio (V) y niobio (Nb) en horno de inducción”**

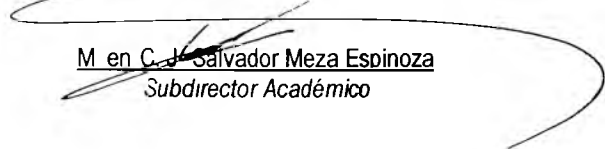
- Resumen.  
Introducción  
I - Fundamentos teóricos del Proceso de obtención de acero micro-aleado al Ti, V y Nb  
II - Acero micro-aleado  
III - Desarrollo experimental  
IV - Resultados  
V - Análisis de resultados  
Conclusiones  
Bibliografía.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado

  
**Inq. Jorge M. Ramírez Ceballos**  
Presidente de Academia

  
**M. en C. Miguel Angeles Hernández**  
Profesor Director u Orientador  
Ced Prof. 1397714

  
**M. en C. Blanca Zamora Celis**  
Jefa del Depto. de Prácticas

  
**M. en C. J. Salvador Meza Espinoza**  
Subdirector Académico

## **DEDICATORIAS**

Alberto Delgado González.

### **A DIOS**

Por darme la vida y la dicha de ser parte de una familia maravillosa y por todo este tiempo para concluir esta meta, por esto y por muchas cosas le doy las gracias.

### **A MIS PADRES (PRIMITIVO Y ALICIA)**

Por darme la vida, por su amor, su cariño y el apoyo incondicional que siempre me han brindado en todo momento, el cual me da fuerzas para seguir adelante, gracias por la paciencia brindada para ver concluido este proyecto de vida, por ser mi ejemplo a seguir y con la promesa de seguir siempre adelante.

### **A MIS HERMANOS (DAVID Y CLAUDIA)**

Por depositar en mi su confianza, por su amor y cariño, por hacer mis días más alegres gracias a que siempre estuvieron conmigo, gracias por sus consejos que me sirven de mucho, agradeciéndoles de ante mano su apoyo incondicional.

### **A MI ABUELITA BENITA**

Quien sin importar el día, lugar y hora, momento y circunstancia me brindaba su amor, por sus palabras de aliento, por que, aunque ya no este con nosotros físicamente, sí esta en mi corazón y nunca la olvidare, este proyecto es un regalo de mi parte y una promesa que te hice abuelita gracias donde quiera que estes.

### **AL M.C. MIGUEL ANGELES HERNANDEZ**

Por sus conocimientos y sabios consejos impartidos hacia mi persona, por su ayuda brindada para concluir este trabajo, por ser un ejemplo de dedicación, esfuerzo, trabajo, perseverancia y constancia, por haberme brindado su amistad que para mi es lo mas valioso mil gracias querido maestro.

### **A MI MEJOR AMIGO**

No tengo como agradecerte todo lo que hizo por mi, por su amistad, por su tiempo, dedicación y esfuerzo para concluir este trabajo que es de los dos, por darme la oportunidad de realizarlo juntos, gracias en verdad y te considero como un hermano para mi.

### **DEDICATORIAS**

Enrique Muga Mendoza

### **A MIS PADRES (Enrique y Raquel.)**

Cuyo esfuerzo debo lo siguiente.

### **A MI HERMANA (Miriam)**

Gracias por sus consejos que me sirven de mucho, agradeciéndole de ante mano su apoyo incondicional.

### **A MI MEJOR AMIGO**

De igual forma te agradezco tu amistad, por tu tiempo, dedicación, esfuerzo para concluir este trabajo que es de los dos, por darme la oportunidad de realizarlo juntos, gracias en verdad y te considero también como un hermano para mi.

## **INDICE.**

- RESUMEN
- INTRODUCCIÓN.

### **I Fundamentos teóricos del proceso de obtención de acero micro-aleado al Ti, V y Nb.**

- I.1 Principio en el que se basa el proceso de aceración.
  - I.1.1 Decarburación.
    - I.1.1.1 Control de la cantidad de carbono en el baño.
    - I.1.1.2 Mecanismo de la eliminación del contenido de carbono
    - I.1.1.3 Influencia del alto contenido de carbono en el baño metálico.
  - I.1.2 Desoxidación (bloqueo).
    - I.1.2.1 Desoxidación por precipitación
    - I.1.2.2 Desoxidación por difusión
  - I.1.3 Diagramas de Ellinham.
  - I.1.4 Disolución de gases en el acero (Ley de Sievert).
    - I.1.4.1 Causas de la aparición de los defectos por gases.
    - I.1.4.2 Influencia del comportamiento de la atmósfera del Horno de Inducción para producir aceros micro-aleados.

### **II Acero micro-aleado**

- II.1 Influencia de los elementos que están presentes en el acero Micro-aleado.
  - II.1.1 Titanio
  - II.1.2 Niobio

- II.1.3 Vanadio.
- II.1.4 Influencia de los elementos nocivos.

### **III Desarrollo experimental.**

- III.1 Plan de trabajo
- III.2 Materias primas utilizadas.
- III.3 Equipo
- III.4 Dispositivos.
- III.5 Fusión
  - III.5.1 Como obtener una atmósfera inerte en el horno de inducción.
- III.6 Cálculo de carga
  - III.6.1 Cálculo para la barra de acero 1045 utilizada
  - III.6.2 Cálculo para determinar la cantidad de escoria decarburante.
- III.7 Desarrollo experimental del proceso de decarburación.
- III.8 Desarrollo experimental para la obtención de acero micro-aleado.

### **IV Resultados**

- IV Análisis químico obtenido en la decarburación.
- IV Análisis químicos obtenidos de los aceros micro-aleados.

### **V Análisis de resultados.**

- V.1 Proceso de Decarburación para la obtención de acero micro-aleado.
- V.2 Comportamiento del contenido de Titanio (Ti).
- V.3 Comportamiento del contenido de Niobio (Nb).

V.4 Comportamiento del contenido de Vanadio (V).

V.5 Obtención de los aceros micro aleados en el Horno de Inducción.

V.6 Justificación de los contenidos de Manganeso y Silicio en los experimentos realizados.

- **CONCLUSIONES.**
- **BIBLIOGRAFIA.**

**SOLO LECTURA**

## Resumen.

En el presente trabajo se analiza el proceso de fabricación de aceros micro-aleados con Titanio (Ti), Vanadio (V) y Niobio (Nb), con el uso del Horno de Inducción a condiciones atmosféricas de 10 kg de capacidad de acero líquido, con crisol monolítico de refractario básico a base de magnesita (MgO), ubicado en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería en Metalurgia y Materiales.

Se efectuó una etapa previa de decarburación del acero AISI 1045 que se utilizó como chatarra, cuyos resultados se indican en la Tab. 3, mientras que la cinética de la reacción se ilustra en la fig. 19, obteniéndose hasta una concentración de 0.0227% de carbono en aproximadamente 29 minutos.

Se controló la atmósfera del horno mediante el uso de una tobera por donde se inyectó 2 l/min. de argón a una presión de 3 kg/cm<sup>2</sup>, operación que se aprovechó para agitar el baño e incrementar la rapidez del proceso de decarburación.

Se desoxidó el baño metálico con 30 gr de calcio-silicio (Ca-Ci), obteniéndose resultados muy satisfactorios en el momento de alear a los elementos Ti, V y Nb. Esas concentraciones se registraron en los experimentos 8 para el Ti, 7 para el V y 13, 14 y 15 para el Nb de la tabla 4.

## Introducción.

Existe una amplia gama de aceros que se producen en las empresas acereras, cuya manufactura por lo regular es en el Horno de Arco Eléctrico, ya que este reactor tiene gran capacidad de producción que puede alcanzar hasta de 200 Tons. por fusión. Sin embargo, uno de los objetivos de ese reactor es producir aceros micro-aleados; Por tal razón, si no se tienen condiciones fuertemente reductoras en el proceso de aceración es muy difícil obtener esos materiales.

Los aceros Micro-aleados son fundamentalmente del tipo C-Mn, los cuales se caracterizan por tener concentraciones inferiores a 0.15% de Nb, V o Ti, adicionados de forma individual o combinada; estos elementos se alean en muy baja concentración cuya operación se realiza en la olla de vaciado cuando ya se registra en el baño metálico una temperatura aproximada entre 1550° a 1600° C. Esos aceros al obtenerse en el rango de la composición química deseada, se ha demostrado que incrementan considerablemente sus propiedades mecánicas. Por tal razón, si se compara con un acero al carbono que no tiene esos elementos se nota marcadamente la diferencia. Por ese motivo, esos aceros son utilizados con una gran demanda en la industria de la construcción para fabricar varilla, etc..

Para realizar la aleación de los elementos Micro-aleantes, es necesario acondicionar al baño metálico para que esté libre de oxígeno disuelto, por lo que es de suma importancia adicionar algunos materiales como aluminio (Al) en trozos, calcio-silicio (Ca-Si), ferro-silicio (Fe-Si), etc., cuya misión es combinarse de forma química con el oxígeno disuelto en el baño metálico para obtenerse sus

respectivos óxidos que se transportan a la fase de escoria que se encuentra sobre la superficie de dicho baño, debido a la fuerte afinidad que tienen esos elementos (Al, Ca, Si etc.) por el oxígeno a esas condiciones de operación.

Considerándose la problemática antes expuesta, en el presente estudio se analizó la factibilidad de utilizar el Horno de Inducción como una alternativa para entender y obtener las condiciones fisicoquímicas del proceso de aleación acondicionándolo de tal forma que se alcance el objetivo del presente trabajo.

El acondicionamiento consistió en la adaptación de una tobera en la base del crisol del Horno para inyectar argón y una tapa de acero inoxidable enfriada por agua en la parte superior; ese dispositivo se utilizó con el propósito de aislar al proceso y presurizar de argón la atmósfera existente entre la superficie del acero líquido y la citada tapa. para que de esa forma se evacuara el aire que es el principal dosificador de oxígeno hacia el seno del baño metálico.

Este estudio puede servir como una alternativa para solucionar la producción de aceros Micro-aleados a baja escala a nivel industrial en las empresas que cuenten con la infraestructura del Horno de inducción.

Para desarrollar este trabajo se utilizaron las instalaciones y equipo con que cuenta el Taller de Fusión y Moldeo del Departamento de Ingeniería en Metalúrgica y Materiales, mismo que consiste en un Horno de Inducción de 15 kg. de capacidad de acero líquido y todos los equipos auxiliares, así como dispositivos utilizados.

Las grandes empresas metalúrgicas nacionales dispondrán de nuevos aceros para fabricar tuberías de mejor calidad y mayor resistencia, lo que reducirá los daños causados por el intemperismo y los sismos, y se evitarán así (en lo posible) los desastres ambientales que generan fugas o explosiones en instalaciones debilitadas estructuralmente, tal como ha ocurrido recientemente en la red de ductos de conducción y distribución de gas y petróleo de PEMEX

Los resultados que se obtienen con estos aceros, hacen posible aventurar un impacto social y económico muy importante en la industria nacional de hidrocarburos, pues al sustituirse aceros convencionales por éstos de mayor resistencia se reducen significativamente los daños estructurales en las tuberías que conducen el crudo, gas y productos refinados -que cubren buena parte del subsuelo del país-, y que constituyen un riesgo latente para la población, por la alta frecuencia de explosiones, fugas, desperfectos y fracturas que provocan daños económicos y ambientales y, en la mayoría de los casos, pérdida de vidas humanas.

## **I Fundamentos teóricos del proceso de obtención de acero micro-aleado al Ti, V y Nb.**

El proceso de aceración se basa en la refinación del baño metálico dentro de un horno de fusión para obtener un acero con mejores propiedades, tanto físicas como mecánicas <sup>(1)</sup>, cuyas condiciones de operación deben adaptarse de tal forma que no exista ningún inconveniente para alear los microalentes en el seno del citado baño.

### **I.1 Principio en el que se basa el proceso de aceración.**

Estos procesos generalmente se realizan en hornos de arco eléctrico y convertidor al oxígeno.

Los factores que influyen en la selección de estos procesos son:

- La composición química a obtener y la temperatura de fusión.
- Calidad exigida.
- Tipo y calidad de chatarra disponible
- Tipo, cantidad, costo de las ferro-aleaciones y otros materiales (Decarburantes, Desoxidantes, fundentes, etc).
- Capacidades del horno y facilidades en la planta.
- Destino final del acero: moldes, lingotera, olla<sup>(1)</sup>.

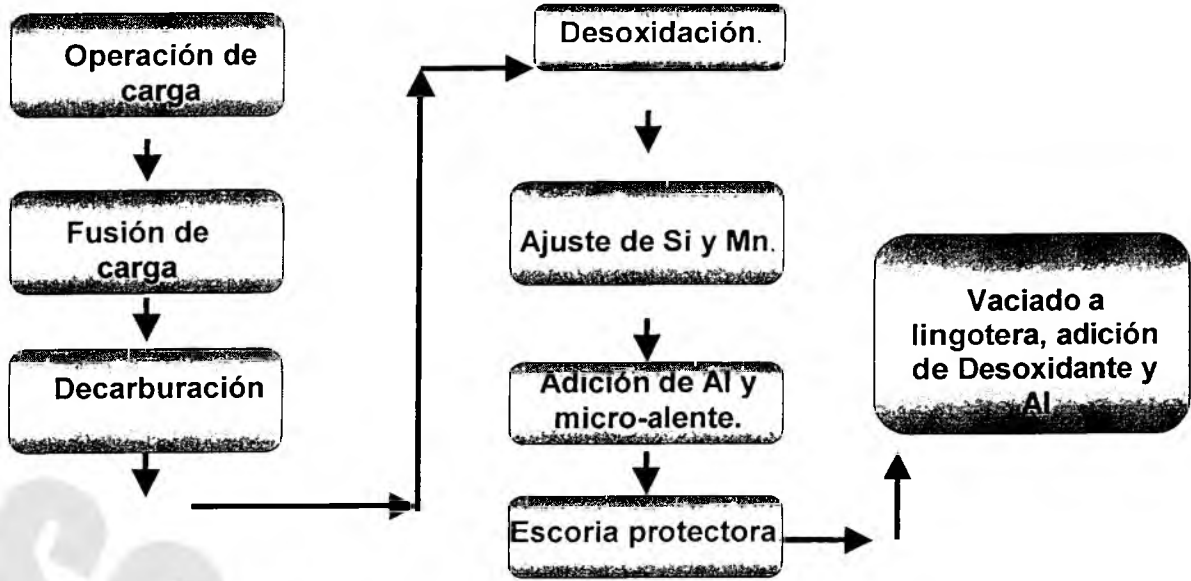
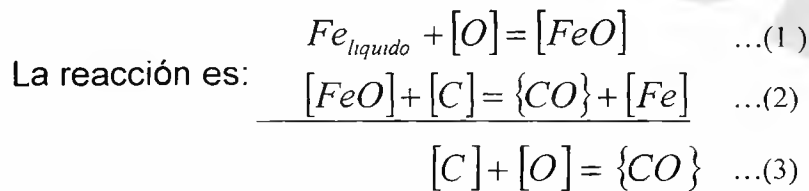


Fig.1. Diagrama del proceso de obtención de acero-microaleado convencional

### I.1.1 Decarburación.

Este proceso es de gran importancia, pues dependiendo del contenido de carbono disuelto en el hierro se define el tipo de material (acero o hierro). De acuerdo con el diagrama hierro-carbono se tiene un acero cuando la concentración de carbono es menor de 2%, y a partir de ese porcentaje se tienen los llamados hierros, cuyas propiedades mecánicas son diferentes pues el incremento en el contenido de carbono brinda mayor dureza y por tal motivo disminuye el grado de deformación plástica del material.

Este proceso se refiere a la oxidación del carbono para disminuir su contenido en el baño metálico, con la finalidad de obtener un acero más limpio, también se produce agitación causada por la formación de CO, que homogeniza la temperatura y la composición química, se eliminan gases indeseables y elimina inclusiones no-metálicas.



$$K = \frac{P_{CO}}{a_C \cdot a_O} \quad \dots(4)$$

$$\text{Log}K = \frac{2975}{T} + 1.06 \quad \dots(5)$$

La formación de burbujas de CO provoca los siguientes efectos:

- Homogenización de la temperatura del baño

- Homogenización de la composición química del acero
- Eliminación de gases indeseables ( $H_2, N_2, O_2$ )
- Eliminación de inclusiones no metálicas
- Aceleración en la cinética de reacciones
- Preparación del baño metálico para la siguiente etapa

Las burbujas de CO deben vencer las siguientes presiones:

$$P_{CO} > P_{atmosférica} + \rho_{Fe} + \rho_{Escoria} + \text{tensión superficial del Fe} \quad \dots(6)$$

$$P_{CO} > P_{atmosférica} + h_{Fe} * \rho_{Fe} + h_{escoria} * \rho_{Escoria} + \frac{2\sigma}{r} \quad \dots(7)$$

Donde:

$h_{Fe}$  = columna de Fe sobre la burbuja de CO

$h_{escoria}$  = columna de escoria sobre la burbuja de CO

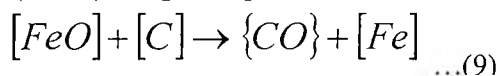
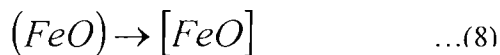
$\rho_{Fe}$  = densidad específica del acero fundido

$\rho_{Escoria}$  = densidad específica de la escoria fundido

$r$  = radio de la burbuja

$\sigma$  = tensión superficial del hierro fundido (1000 a 1700  $\frac{dina}{cm}$ )

En este caso debido a que se trabaja con un horno de inducción a escala no es posible inyectar oxígeno con una lanza, por tanto se emplea la cascarilla de laminación. Cuyas reacciones son:



$$K_0 = \frac{P_{CO}}{[\%C]} * a_{FeO} \quad \dots(11)$$

Las condiciones para una buena decarburación son las siguientes:

- Alto contenido de FeO.
- Alta temperatura.
- Escoria fluida y activa.
- Bajos contenidos de otros elementos<sup>(1)</sup>.

#### **I.1.1.1 Control de la cantidad de carbono en el baño.**

Es ampliamente conocido que el carbono es un elemento que define la clasificación de los aceros, ya que con base a como se encuentran dentro del baño metálico, es como se obtiene el grado de esos materiales.

En la Fig. 2, se ilustra el comportamiento del contenido de carbono en hierro en función de la composición en por ciento peso; es decir, el carbono como elemento representa el soluto y el Hierro el solvente.

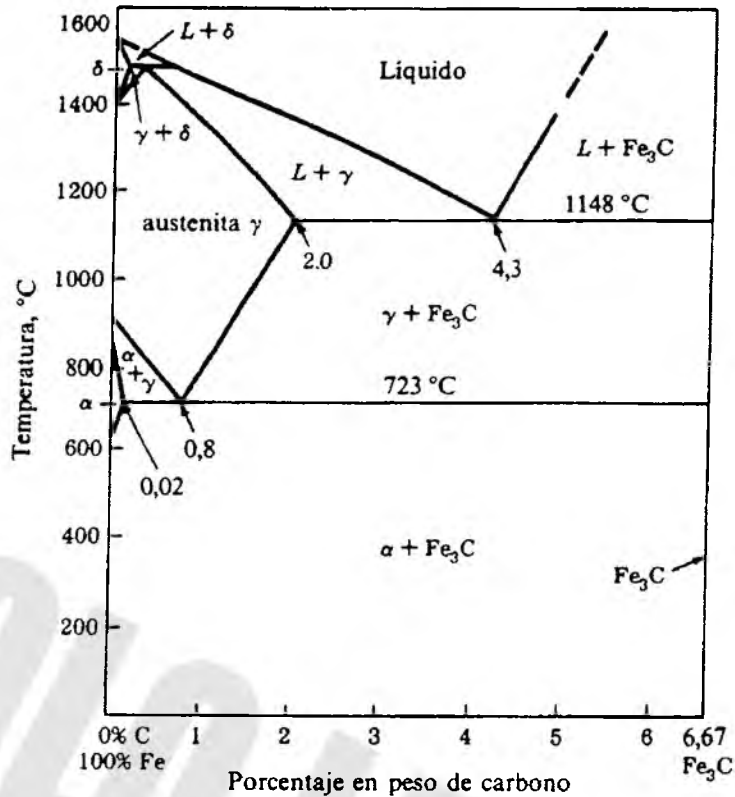


Fig. 2. Diagrama Hierro-Carbono en función de la temperatura y concentración.

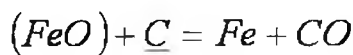
Como se observa en la Fig. 2, se define a un acero cuando el mecanismo de disolución del carbono se acomoda dentro de la estructura atómica del Hierro en espacios intersticiales o vacancias, el contenido máximo de ese elemento disuelto es de 2.06% y si se le incrementa hasta rebasar ese contenido, se inicia otro mecanismo con la presencia de carbono. Por consiguiente, al tender a saturar la aleación Hierro-Carbono al solidifica se obtiene una precipitación en los límites de grano de la micro estructura denominándose fundiciones, de donde proviene la definición de Hierro colado o hierro gris, cuya característica es obtener un material muy duro que no se puede deformar.

Con respecto a los aceros, se pueden clasificar de baja aleación de carbono (0.04-0.08% C), mediana aleación (0.4-0.6% C) y alta aleación (0.8-1.5% C).

Para el caso que compete a este trabajo, se efectuó para aceros de baja aleación (0.04-0.08% C) y si aunado a esta característica se le adicionan los elementos Titanio, Vanadio y Niobio en bajas proporciones (0.15-0.05%) se obtiene un acero micro aleado.

### I.1.1.2 Mecanismo de la eliminación del contenido de carbono

Para el caso del uso del horno de inducción la reacción de decarburación se efectuó vía reacción 3; misma que se considera de forma permanente entre la interfase metal líquido - escoria líquida que se encuentra sobre la superficie del metal líquido. Este mecanismo se ilustra en el esquema siguiente:



Reacción permanente  
decarburación

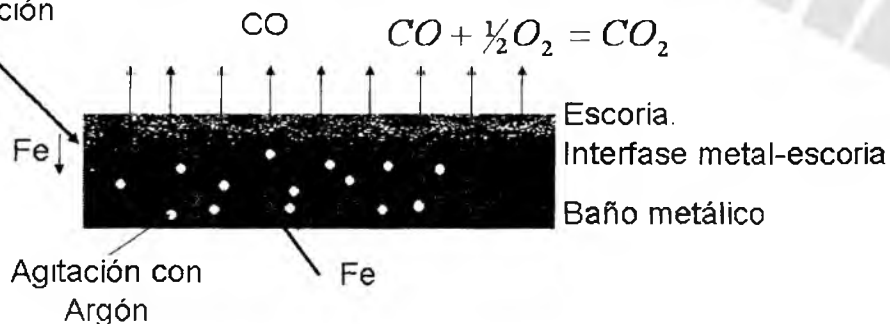


Fig. 3 Mecanismo de la reacción de decarburación con cascarilla de laminación a una temperatura aproximada de 1600°C

Como se observa en las reacciones 1, 2 y 3, la desoxidación se efectuó con cascarilla de laminación que tiene alto contenido de FeO, al depositarlo sobre la superficie del baño de acero mezclada con otra cantidad de CaO y hacer contacto, de inmediato se funde y se forma la escoria líquida, proporcionando así el mismo FeO sobre la superficie del baño en forma de escoria; como este compuesto tiene alto carácter oxidante, el oxígeno busca a otro elemento más afín para combinarse, esos elementos son de acuerdo al diagrama de Ellingham (Fig. 7), el silicio, manganeso, carbono, titanio, vanadio, etcétera. Todos los que tienen una  $\Delta G^0$  más negativa; es decir, entre más aumenta el valor negativo más será afín al oxígeno por esos elementos, tal como es el caso del calcio. Sin embargo, entre esos elementos también se encuentra el carbono y no es la excepción para combinarse y quitarle el oxígeno enlazado con el Fe (FeO) para obtener a los átomos de ese elemento en forma elemental y quedarse en el baño metálico formando parte del solvente de la aleación líquida; ese mecanismo se corrobora mediante la reacción (3) y se ilustra en la figura 3, sin duda reafirma que el horno de inducción sí se puede usar como reactor para producir acero de cualquier tipo.

### **I.1.1.3 Influencia del alto contenido de carbono en el baño metálico.**

Al observar la tab. 4, donde se indican los resultados del análisis químico de 15 experimentos, al oxidar el contenido de carbono como es el caso de los experimentos 3 a 6 y 10 a 12, ese elemento prácticamente quedó disuelto por arriba del contenido de la especificación ( $>0.5\%$ ), esa acción favorece considerablemente a la operación de alear a los elementos muy afines al oxígeno como

pueden ser los micro aleantes, ya que se puede asegurar que no existe oxígeno disuelto en el baño metálico. Este fenómeno químico se puede ilustrar mediante la curva de disolución de carbono en Hierro respecto también a la disolución del oxígeno, tal como se presenta en la Fig, 4

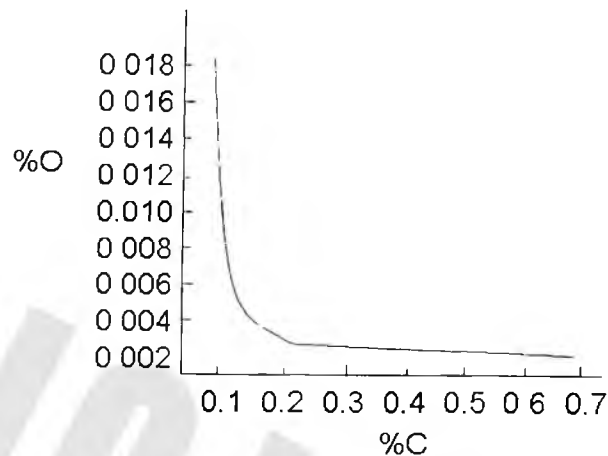


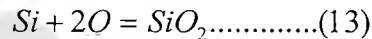
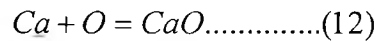
Fig. 4. Curva de la disolución de oxígeno y carbono en la aleación Fe-C.

Para los experimentos referidos, debido a la explicación anterior, no hubo prácticamente problemas de aleación para los elementos micro aleados. Sin embargo, apegándose a la norma no es posible dejar al contenido de carbono a esos niveles, puesto que el máximo contenido debe registrar no más del 0.05 al 0.15%.

Se seleccionó el Silicio y el Calcio ya que termodinámicamente tiene una reacción espontánea cuando se combina con el oxígeno, su cambio de energía libre de Gibbs ( $\Delta G^0$ ) tiene un valor muy negativo a la temperatura del proceso que se controló a aproximadamente 1600°C. Si se compara el calcio con el silicio el primero reacciona de inmediato y luego el silicio, ya que el calcio se encuentra hasta debajo de los elementos estudiados en el diagrama de Ellingham.

El uso de esos elementos en este trabajo se seleccionó en función del costo y de cómo se obtienen para ser utilizados y se encontró que se podía utilizar en forma de ferro liga como es el caso del material denominado Calcio-Silicio.

Una vez seleccionados los elementos desoxidantes el mecanismo de la eliminación del oxígeno se efectúa mediante las siguientes reacciones:



Estas reacciones tienen lugar en el seno del baño de acero oxidado, misma que se ilustra a continuación:

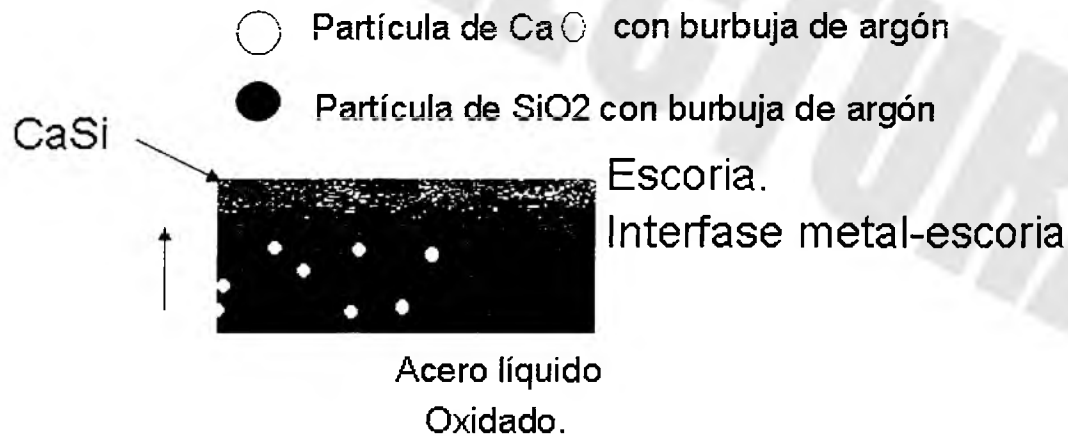


Fig. 5. Eliminación del contenido de oxígeno en la aleación Fe-C, agitado con argón en el horno de inducción.

Como se observa en la Fig. 5, cuando se disuelven los elementos calcio y silicio en el baño metálico, el calcio inmediatamente se combina con el oxígeno disuelto, obteniéndose la formación de

partículas de CaO cuyo arrastre se realiza por las burbujas de argón que lo transporta con mayor rapidez a la fase de escoria, es importante señalar que, al formarse la partícula de CaO inmediatamente cambia la densidad cuyo valor es muy bajo si se compara con la densidad del baño de acero. Por consiguiente, debido a ese fenómeno físico-químico también tiende a transportarse hacia la escoria de forma natural.

Mismo fenómeno sucede cuando el silicio se combina con el baño. No obstante, esa reacción se efectúa en segundo lugar ya su función también es la de eliminar el contenido de oxígeno, y si todo ese elemento ya fue eliminado, entonces el silicio efectúa otro mecanismo denominado disolución que se transporta hacia el baño metálico.

### **I.1.2 Desoxidación (bloqueo)**

Este proceso es vital para poder alear un acero (titanio, vanadio, niobio), pues el oxígeno que se encuentra disuelto en el hierro se combina fácilmente con los elementos aleantes, no permitiendo que entren en disolución, estos se oxidan y se pierden en la escoria. Por tal motivo se debe de aplicar el proceso de desoxidación previamente al proceso de aleación. Esto mediante agregar elementos de mayor afinidad por el oxígeno (Aluminio, calcio-silicio, ferro-silicio, etc) para que estos se combinen y se transporten en forma de óxidos hacia la fase de escoria <sup>(3)</sup>.

Por otro lado, hay que considerar la influencia negativa que los gases pueden tener sobre las propiedades del acero, dado que pueden

formar compuestos nocivos que afecten a las propiedades mecánicas del acero<sup>(2)</sup>.

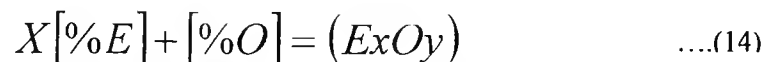
Otras opciones son la desoxidación mediante el trabajo en vacío, aunque esta operación, además de compleja, no es suficiente para solucionar el problema por si misma. La colada sí se realizara en condiciones de vacío se obtendrían magníficos resultados en lo que respecta a la eliminación del hidrógeno. Sin embargo, se tendría el problema del costo de la instalación y su adaptación al proceso<sup>(2)</sup>.

El oxígeno se combina con los elementos afines a él que están contenidos en baño metálico, dando lugar a óxidos estables conocidos como inclusiones endógenas.

La desoxidación será la eliminación del oxígeno disuelto o combinado con el baño metálico.

Existen 2 mecanismos para eliminar el oxígeno del baño metálico:

- **I.1.2.1 Desoxidación por precipitación:** se agregan elementos que tengan mayor afinidad por el oxígeno que los metales base y que formen óxidos termodinámicamente más estables<sup>(1)</sup>.



$$K_0 = \frac{a_{(ExOy)}}{a^x[\%E] * a^y[\%O]} \quad \dots(15)$$

Si se considera a ( $ExOy$ ) un óxido puro:  $a_{(ExOy)} = 1$

Y si E y O forman soluciones diluidas con el hierro:

$$K_0 = \frac{1}{K^*} \quad \text{y si } K^* = [\%E]^x * [\%O]^x \quad \dots(16)$$

Por ejemplo:



- **I.1.2.2 Desoxidación por difusión:** se agregan sobre el baño metálico elementos o compuestos reductores de escoria formando una escoria reductora y por difusión el oxígeno del metal se desplaza a la escoria <sup>(1)</sup>.

$$L_O = \frac{(O)}{[O]} + \bar{R} = \bar{R}O \quad \text{Gas y líquido} \quad \dots(23)$$

El punto de partida para la elección del desoxidante es el diagrama de Ellingham de los óxidos, después se consideran factores como solubilidad, presión de vapor (grado de volatilización) y costos. Lo que en la práctica reduce a la cantidad de desoxidantes en unos cuantos<sup>(2)</sup>.

Los materiales desoxidantes más utilizados son:

- Aluminio (Al), Ferro-manganeso (Fe-Mn), Ferro-silicio (Fe-Si), Ferro-silico-manganeso(Fe-Si-Mn), Calcio-silicio (Ca-Si), Ferro-titanio (Fe-Ti.)

Debido a que los elementos contenidos en el acero-micro aleado son de gran afinidad por el oxígeno, se utilizó para desoxidar el Calcio-silicio (Ca-Si) y Aluminio debido a su gran reactividad y afinidad por el oxígeno<sup>(3)</sup>.



Fig.6. Fotografía en la que se observa la desoxidación del baño metálico, en donde se produce una excitación del baño.

### I.1.3 Diagramas de Ellingham

Una herramienta termodinámica poderosa es la información que proporciona este diagrama, mismo que está en función del cambio de Energía Libre Estandar de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) en función de la Temperatura (T).

Hay tres empleos principales del diagrama de Ellingham:

1. Determinar la facilidad relativa de reducir un dado óxido metálico a metal.
2. Determinar la presión parcial de oxígeno que está en equilibrio con un óxido metálico a una temperatura dada.
3. Determinar la proporción de monóxido de carbono al dióxido de carbono que será capaz de reducir el óxido a metal en una temperatura dada.

La posición de la línea para una reacción dada sobre el diagrama de Ellingham muestra la estabilidad del óxido como una función de temperatura. Las reacciones más cerca a la parte superior del diagrama son los metales "nobles" (por ejemplo, el oro y el platino), y sus óxidos son inestables y fácilmente reducidos. Por consiguiente, los que se indican hacia el inferior del diagrama, los metales se hacen cada vez más reactivo y sus óxidos se hacen más difíciles de reducir.

La escala sobre el lado derecho del diagrama " $P_{O_2}$ " es usado para determinar la presión parcial de oxígeno que estará en el equilibrio con el óxido metálico y el metal en una temperatura dada.

La importancia de esto es que, si la presión parcial de oxígeno es más alta que el valor de equilibrio, el metal será oxidado, y si es inferior que el valor de equilibrio entonces el óxido será reducido.

Ellingham graficó las relaciones  $\Delta G^\circ - T$  determinadas experimentalmente para la oxidación y sulfuración de una serie de metales y encontró que estas en forma general se aproximaban a rectas en un rango de temperaturas en el cual no se producían cambios de estado. La relación puede expresarse por medio de una ecuación simple como:

$$\Delta G^\circ = A - BT \quad (24)$$

$$\text{con } A = \Delta H^\circ \text{ y } B = - \Delta S^\circ \quad (25)$$

Con este estudio termodinámico se determina la secuencia para agregar los elementos aleantes en un proceso de aceración, cuyo objetivo y condición es que no haya oxígeno disuelto en el baño metálico<sup>(2)</sup>.

La afinidad de los elementos por el oxígeno se clasifica de la siguiente forma:

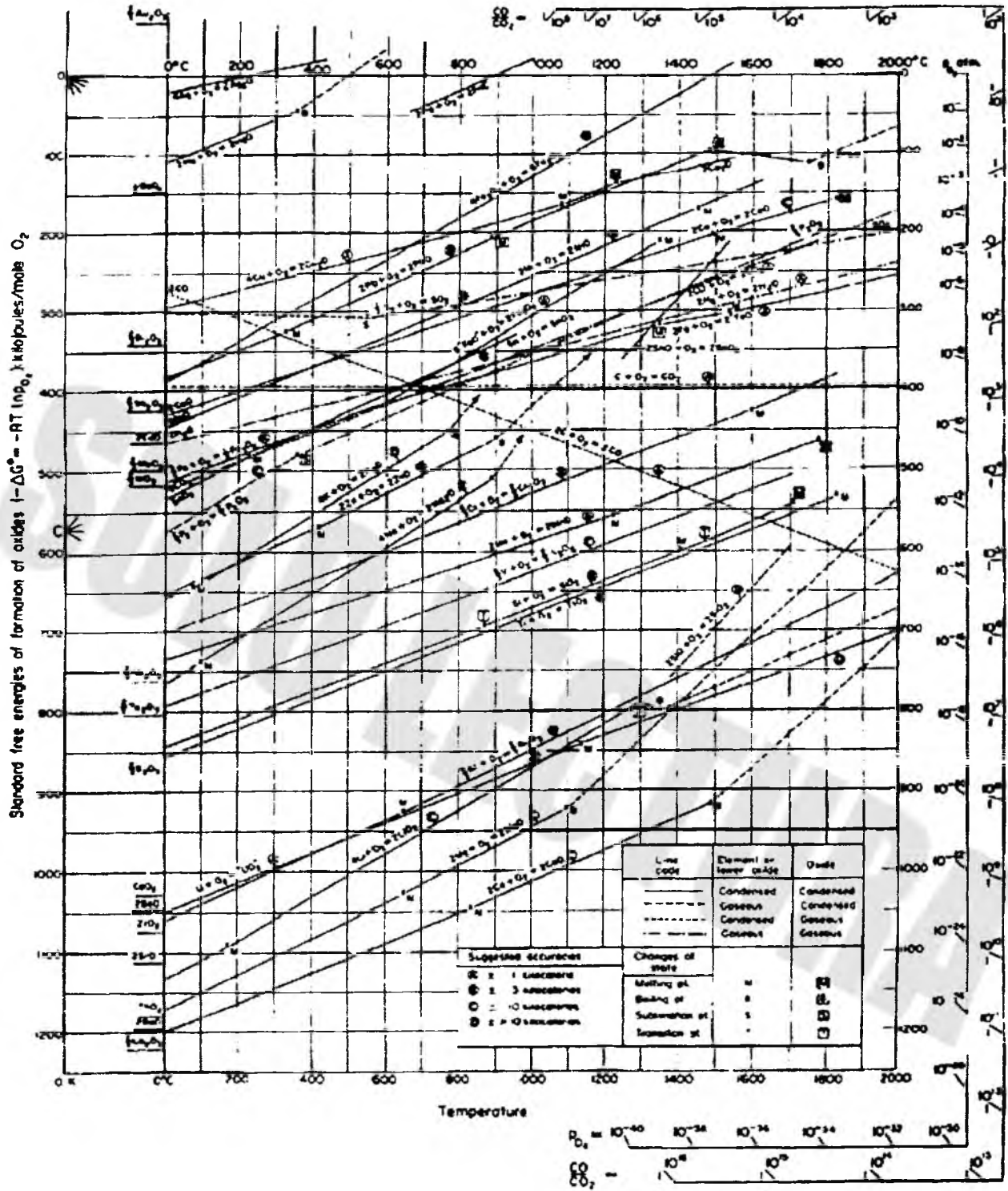
- Nula afinidad por el oxígeno: Níquel, cobalto, Molibdeno, cobre, etc.
- Media afinidad por el oxígeno: Wolframio, Cromo, Niobio, Etc.
- Alta afinidad por el oxígeno: Silicio, Aluminio, Titanio, Vanadio, Zirconio, Calcio<sup>(4)</sup>.

Los elementos de poca afinidad son los primero que se agregan para provocar su rápida aleación.

Los de media afinidad se deben agregar al principio o después del proceso de desoxidación o después de agregar ferro-silicio (Fe-Si) y ferro-manganeso (Fe-Mn.)

Los que presentan alta afinidad se deben agregar al final del proceso en el horno, la olla o directamente en el lingote<sup>(2)</sup>.

SOLO LECTURA



(2)

Fig. 3 Diagrama de Ellingham para la formación de Óxidos

### I.1.4 Disolución de gases en el acero (Ley de Sievert)

Existe otro problema natural durante el proceso de fusión de cualquier tipo de acero: la disolución de gases hacia el seno del baño metálico cuando se alcanzan temperaturas de 1500 a 1600 °C. Sin embargo, este fenómeno afecta considerablemente al proceso cuando se desea alear elementos que tienen una fuerte afinidad por el oxígeno como es el caso del Ti, Nb y V porque, una vez fundido el acero, entre los elementos que se disuelven es el oxígeno, mismo que siempre estará presente durante todo el proceso de obtención de aceros Microaleados y si no se elimina antes de efectuar la operación de aleación, simple y sencillamente los citados elementos de aleación se combinarán con dicha concentración de ese elemento para formar sus respectivos óxidos.

Hay dos causas básicas para la porosidad en los metales fundidos: evolución gaseosa durante la solidificación y la contracción en volumen que acompaña a la solidificación en la mayoría de los metales.

Los gases difieren en que su solubilidad en los metales dependen marcadamente de la presión aplicada, muchos gases entran en contacto con los metales son di-atómicos  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , si la solubilidad es pequeña, es posible, con frecuencia, expresar la relación entre la presión y la solubilidad de los gases di-atómicos en una forma sencilla, conocida como la **LEY DE SIEVERT**.

$$C_g = K \sqrt{p} \quad \dots(26)$$

Donde:

$C_g$  = Es la solubilidad del gas disuelto

$P$  = Es la presión del gas

$K$  = Es una constante

La solubilidad de los gases en los metales es también una función de la temperatura, y en la mayor parte de los casos, la solubilidad aumenta rápidamente con la temperatura.

Si la solubilidad máxima es pequeña de un gas en un metal, a una presión gaseosa constante, como una función exponencial del tipo previamente derivado para la solubilidad del carbono en el hierro o sea:

$$C_g = B e^{-Q/RT} \quad \dots(27)$$

Donde:

$C_g$  = Es la concentración del gas en el metal.

$B$  = Es una constante

$Q$  = El trabajo para introducir una mol de átomos de gas en el metal

$R$  y  $T$  = Tienen significados usuales.

Conociendo la ley de Sivert es posible estimar la cantidad de gases que el baño metálico puede disolver, porque esa ecuación es fuertemente dependiente de la temperatura. Es decir, a mayor temperatura mayor cantidad será de gases disueltos y no es la excepción para el oxígeno <sup>(2)</sup>.

#### **I.1.4.1 Causas de la aparición de los defectos por gases.**

Las sopladuras se forman debido a que el gas queda atrapado en el seno del material en el momento de la solidificación. Atendiendo a su origen podemos distinguir:

- Sopladura endógena, motivada por un contenido elevado de gas en el caldo que se desprende en el momento de la solidificación. Principalmente se debe a burbujas de CO o CO<sub>2</sub>, que pueden verse agrandadas por difusión de hidrógeno o de nitrógeno.
- Sopladura exógena, proveniente de alta humedad en el molde o los machos, por la elaboración de estos con aglomerantes con tendencia a desprender gases, o por el uso de pinturas de recubrimiento de moldes y machos con tendencia a desprender gases.
- Retención mecánica de los gases, por insuficiente salida de gases, falta de permeabilidad del molde o por atrape de aire por las turbulencias producidas en el llenado.
- Sopladuras de escoria: Suelen ir acompañadas de inclusiones de escoria y estar localizadas en la parte superior del molde, y están motivadas por reacciones de oxidación en el metal líquido, que dan lugar a la formación de óxidos y gas, o por reacción del caldo con el refractario del horno, con la cuchara o con el molde.

No deben confundirse las sopladuras con los rechupes, que son cavidades abiertas o cerradas, de paredes rugosas, normalmente

dendríticas, motivadas principalmente por defectos de alimentación de la pieza.

Los principales gases que intervienen en la formación de las sopladuras son el oxígeno, hidrógeno y nitrógeno<sup>(5)</sup>.

#### I.1.4.2 Influencia del comportamiento de la atmósfera del horno de inducción para producir aceros micro aleados.

Definitivamente la atmósfera del horno juega un papel importante para lograr alear los elementos micro aleantes, puesto que al fundir la chatarra, de acuerdo a la ley de Sievert, los gases se disuelven con mayor facilidad hacia el seno del baño metálico cuando se incrementa la temperatura, y para el caso de las fusiones, ese parámetro se registra alrededor de 1600 °C.

En la figura 14. se ilustra el mecanismo de la disolución del Oxígeno que suministra la fuente principal que es el aire mediante la reacción.

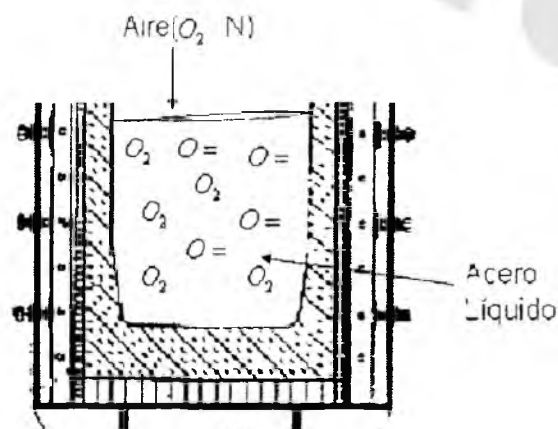


Fig. 8. Mecanismo de la disolución de oxígeno hacia el baño metálico en un horno de inducción, a una temperatura aproximada de 1600°C.

Como se observa en la figura 3, hay una reacción de disolución de oxígeno hacia el baño metálico, razón por la cual ese elemento se queda atrapado, y si no se considera ese mecanismo, y aún así si se sigue exponiendo al acero líquido sin protección, seguramente la reacción se hace reversible obteniéndose el oxígeno molecular; por tal motivo, si ese acero se vacía en una lingotera y sí después se parte a la mitad, seguramente se observa a simple vista una porosidad que es provocada por burbujas de oxígeno, tal como se ilustra en la siguiente figura:

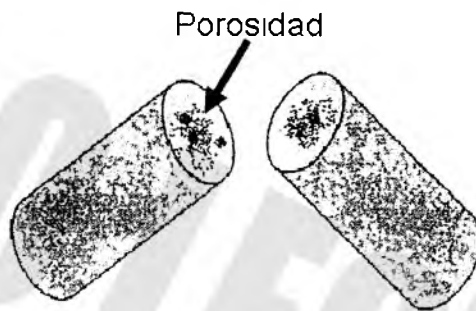


Fig 9 Corte transversal de un lingote oxidado.

## II Acero micro-aleado

Los aceros micro aliados son fundamentalmente aceros del tipo C-Mn, que se caracterizan por tener concentraciones inferiores a 0.15% Nb, Ti o V, adicionados de forma individual o combinada<sup>(6)</sup>.

En realidad, el control de las propiedades de la micro estructura se logran a través del afino de grano y del endurecimiento por precipitación durante el enfriamiento de la ferrita. Normalmente los aceros micro aleados alcanzan, como mínimo, limites elásticos de 300 MPa y valores de resistencia a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de  $375\text{ K j} \cdot \text{m}^{-2}$ . Estas características permiten eliminar prácticamente los tratamientos de temple y revenido<sup>(7)</sup>.

Estos aceros surgieron cada vez más debido a las exigencias de la industria de construcción, transportista, petroquímica, automotriz. etc.

Están basados en la composición de un acero al carbono, pero han sufrido modificaciones:

- Reducción en el contenido de C para mejorar las propiedades mecánicas, la solubilidad y soldabilidad.
- Adiciones pequeñas de elementos que son formadores de carburos, tales como el Nb, Ti, V que incrementan la tenacidad y disminuyen la temperatura de transición

Para que estos aceros sean útiles en ingeniería deben presentar buenas propiedades y su fabricación debe ser económicamente viable.

Entre otras propiedades se tienen:

- Tenacidad.
- Soldabilidad.
- Dureza
- Formabilidad.
- Resistencia a la fatiga.

El requerimiento balanceado de un grupo de propiedades en el acero como las ya mencionadas, significa que un incremento en una de ellas, no debe ser el decremento de otras.

El mejoramiento en las propiedades de estos aceros se logra con la adición de tan solo una décima o algunas centésimas de por ciento de un elemento de aleación<sup>(7)</sup>.

Los elementos micro-aleantes mas usados son el Nb, Ti, V; con los cuales se consigue un considerable aumento de carbonitruros estables que producen un efecto de endurecimiento al precipitarse fina y homogéneamente en la matriz, con excepción del carburo de Vanadio, no se disuelven por completo a las temperaturas normales de austenización, impiden también un fuerte crecimiento de los granos en la zona austenítica. La finura de grano que se obtiene, es una característica más de estos aceros, la cual contribuye a aumentar el valor del límite de fluencia así como a mejorar la resistencia<sup>(9)</sup>.

## II.1 Influencia de los elementos que están presentes en el acero micro-aleado.

Dentro de la metodología se ha expuesto que una de las principales etapas es la investigación bibliográfica que sirve para poder entender mejor el estudio de las condiciones experimentales a las que se deben considerar en el estudio para obtener acero micro-aleado. Gracias a los elementos contenidos en el acero es que se pueden obtener las características apropiadas para cada aplicación de este. A continuación se describen los elementos que integran un acero micro-aleado:

### **Carbono.**

Su número atómico es 6; y pertenece al grupo 14 del sistema periódico.

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido del carbono en el acero es relativamente bajo. La mayoría de los aceros tienen menos de 9 átomos de carbono por cada 100 de hierro en el acero. Como el carbono es más ligero que el hierro, el porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%. La forma convencional de expresar el contenido de los elementos en las aleaciones es por el porcentaje de la masa total con que cada uno contribuye. El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0.5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0.1%. Además, como puede apreciarse en la figura 3, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%

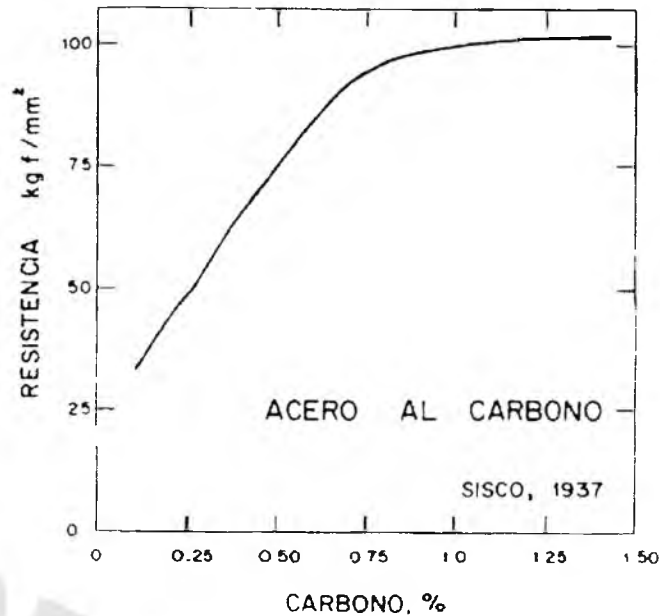


Fig. 10. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros.

El incremento de la concentración de carbono en los aceros generalmente reduce la ductilidad <sup>(1)</sup>.

### Manganeso.

Es un elemento metálico, frágil, de aspecto blanco plateado. El manganeso es uno de los elementos de transición del sistema periódico. Su número atómico es 25.

Este metal está presente en todos los aceros al carbono en el intervalo de 0.03 a 1.00%. La función del Mn es contraria al S. Cuando existe una cantidad de Mn mayor que la requerida para formar MnS, el exceso se combina con carbono para formar el compuesto (Mn<sub>3</sub>C) que se asocia con el carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C) en cementita. El manganeso también promueve la desoxidación del acero líquido.

Los aceros micro-aleados generalmente tienen contenidos de Mn mayores que los aceros comunes al carbono. Este elemento eleva la resistencia a la corrosión, al impacto y la tenacidad <sup>(8)</sup>.

### **Silicio.**

Es un elemento semi-metálico, el segundo elemento más común en la Tierra después del oxígeno. Su número atómico es 14 y pertenece al grupo 14 (o IVA) de la tabla periódica.

La mayoría de los aceros contienen entre el 0.05 y el 0.3% de Si. Este metaloide tiende a disolverse en ferrita aumentando la resistencia del acero, sin disminuir mucho la ductilidad. Promueve la desoxidación del acero líquido a través de la formación de dióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ , tendiendo así a dar mejores propiedades físicas como la dureza en las piezas fundidas, es por ello que el Si resulta fundamental su uso en los aceros fundidos.

Para poder entender con mayor facilidad, porqué se deben alear los elementos Ti, Nb y V, es necesario saber que efecto tienen esos elementos en la propiedad del acero a producir, cuya explicación está basada en el diagrama Fierro- Carbono, y es como sigue <sup>(1)</sup>.

### **II.1.1 Titanio**

Es un elemento metálico blanco plateado que se usa principalmente para preparar aleaciones ligeras y fuertes. Su número atómico es 27 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico.

Este elemento fue descubierto en 1791 (en el mineral menacanita), por el clérigo británico William Gregor, quien le puso el nombre de menaquita. Cuatro años después, el químico alemán Martin Heinrich Klaproth volvió a descubrir el elemento en el mineral rutilo, y le llamó titanio como alusión a la fuerza de los mitológicos titanes griegos. El metal fue aislado en 1910.

La adición de titanio permite afinar el tamaño de grano ferrítico bloqueando el crecimiento del grano austenítico.

Su poder de afinar granos es mayor que el del niobio y el vanadio especialmente a las temperaturas de austenización en los tratamientos termomecánicos <sup>(10)</sup>.

Por otra parte, este elemento retarda la recristalización tanto estática como dinámica salvo si la temperatura de deformación es más baja (950°C), su influencia sobre las propiedades mecánicas permite elevar el límite de elasticidad, eso se manifiesta cuando se obtienen contenidos de Ti superiores al 0.02%.

En cuanto a su influencia sobre las propiedades mecánicas, permite elevar el límite de elasticidad y la resistencia. Estos incrementos se manifiestan con contenidos de titanio superiores al 0.02%. Con concentraciones menores, el Ti ya no puede influir sobre tales propiedades debido a que ha precipitado como TiN. Los precipitados de TiN son muy gruesos para endurecer al acero. Este nivel de 0.02% depende principalmente del contenido de azufre en el acero <sup>(11)</sup>.

## II.1.2 Niobio

Es un elemento metálico, de color gris acero, brillante, dúctil y maleable. El número atómico del niobio es 41. El niobio es uno de los elementos de transición del sistema periódico.

Este metal fue descubierto en 1801 por el químico británico Charles Hatchett. El niobio arde cuando se le calienta en presencia de aire y se combina con el nitrógeno, el hidrógeno y los halógenos. Resiste la acción de casi todos los ácidos. Su uso principal es como elemento de aleación en el acero inoxidable, al que le proporciona mayor resistencia a la corrosión, especialmente a altas temperaturas.

El niobio ocupa el lugar 32 en abundancia natural entre los elementos de la corteza terrestre. Existe, asociado con el elemento similar tantalio, en varios minerales, siendo el más importante la columbita o tantalita.

Posee la capacidad de formar carbonitruros endureciendo al acero por el fenómeno de precipitación. Esto permite utilizar al Niobio para que controle la operación de solidificación y conseguir propiedades especiales como en aceros para herramientas, debido a las presencia de carburos que tienen la propiedad de ser muy duros.

El uso más frecuente que se le da al Niobio es cuando sus contenidos son menores a 0.01% .Cuando está presente en aceros Microaleados ese elemento se agrega para obtener propiedades como resistencia, tenacidad, conformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión atmosférica.

Durante la laminación el Nb en solución precipita principalmente en la austenización en forma de carbonitruros (precipitación inducida por conformación). Estas partículas inhiben el crecimiento de grano y adicionalmente, los efectos del Nb soluble retardan la recristalización de los granos de austenita. Ningún otro elemento no microaleante es tan efectivo como el Nb para elevar la temperatura a la que finaliza la recristalización de la austenita, efecto que es más pronunciado a mayores contenidos de C. En consecuencia se dispone de un intervalo de temperatura mas amplio para conformado en caliente del acero, produciéndose así austenita altamente deformada. Una parte del Nb remanente en solución después de la laminación precipitará en ferrita como carbonitruros muy finos, durante o después de la transformación  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Este fenómeno de precipitación puede acelerarse incrementando la deformación <sup>(6)</sup>.

En suma, la influencia del Nb en el acero se controla ajustando la composición química, la temperatura de austenización, el grado de deformación y la velocidad de enfriamiento <sup>(9)</sup>.

### II.1.3 Vanadio.

Es un elemento metálico blanco plateado de número atómico 23. El vanadio es uno de los elementos de transición del sistema periódico. Fue descubierto en 1801, en México, por Andrés Manuel del Río, pero se pensó que era una forma de cromo. En 1830 aproximadamente, el químico sueco Nils Gabriel Sefström lo reconoció como un nuevo elemento.

El vanadio puede pulirse fácilmente y es uno de los metales más duros. Tiene un punto de fusión de 1890 °C, un punto de ebullición de

3.380 °C y una densidad relativa de 5,96. Su masa atómica es 50.941. El vanadio es soluble en ácido sulfúrico y ácido nítrico e insoluble en ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y alcohol diluidos. Forma varios óxidos ácidos, siendo los más importantes el trióxido ( $V_2O_3$ ) verde oscuro, y el pentóxido ( $V_2O_5$ ) anaranjado. Otros compuestos importantes son el monosulfuro de vanadio, (VS), el trisulfuro de vanadio ( $V_2S_3$ ), el dicloruro de vanadio ( $VCl_2$ ), el tricloruro de vanadio ( $VCl_3$ ), el dihidróxido de vanadio, ( $V(OH)_2$ ) y el ácido metavanádico, ( $HVO_3$ ).

El vanadio ocupa el lugar 19 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. Nunca se encuentra en estado puro, sino que existe combinado en varios minerales, carbones y petróleos, sobre todo en los petróleos de México y Venezuela. Los mayores productores de vanadio son Estados Unidos, Rusia y la República de Suráfrica.

Al ser este elemento un microaleante con mayor solubilidad a las temperaturas del tratamiento termomecánico, eleva el valor del límite elástico sin afectar sustancialmente la ductilidad hasta concentraciones de 0.16%<sup>(12)</sup>. Tal incremento de las propiedades mecánicas se debe a la precipitación de carbonitruros de Vanadio de tamaño relativamente pequeño, con lo que se forman granos finos de austerita <sup>(4)</sup>. El tamaño de grano ferrítico resultante es proporcional, entonces, a la cantidad de V añadido y su tamaño de grano alcanza  $13.8 \text{ mm}^{-0.5}$  a 0.15%V <sup>(12)</sup>. Existe evidencia experimental del efecto que ejercen la temperatura de transformación isotérmica y la velocidad de endurecimiento sobre la tendencia de los aceros microaleados al vanadio <sup>(12)</sup>. Se sabe que la reducción del espaciado interlaminar y el tamaño de los precipitados se producen por la disminución de la temperatura de transformación isotérmica. En los

aceros micro-aleados con altos contenidos de carbono la adición de V puede usarse para mejorar la calidad. Por ejemplo el efecto de endurecimiento por precipitación del nitruro de vanadio permite una disminución del contenido de carbono y por tanto una reducción de la tendencia a la formación de laminillas de cementita durante la solidificación <sup>(13)</sup>.

### II.1.4 Influencia de los elementos nocivos.

#### **Azufre.**

El azufre se encuentra en el grupo 16 (o VIA) del sistema periódico. Su número atómico es 16 y su masa atómica 32.064.

Este elemento en los aceros se mantiene generalmente por debajo del 0.05%. Este metaloide se combina con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS), el cual forma, a su vez, una aleación eutéctica de bajo punto de fusión, con hierro que tiende a concentrarse en las fronteras de grano. Cuando el acero se forja o lamina a altas temperaturas, se hace frágil debido a la fusión del eutéctico sulfuro de hierro, que impide la cohesión de los granos permitiendo que se desarrollen grietas. En presencia de manganeso, el azufre tiende a formar sulfuro de manganeso (MnS), en vez de sulfuro de hierro. El MnS suele permanecer como inclusiones bien distribuidas por toda la estructura. Así pues la presencia del Mn es un inhibidor del efecto que produce el S.

Con la presencia del azufre se mejora la maquinabilidad, esto se debe a la presencia de inclusiones sulfurosas más numerosas, que hacen

pedazos las rebabas, reduciendo de esta manera el desgaste de las herramientas <sup>(1)</sup>.

### **Fósforo.**

Es un elemento no metálico reactivo, fundamental en los organismos vivos y con múltiples aplicaciones industriales. Su número atómico es 15 y su masa atómica 30,974. Se encuentra en el grupo 15 (o VA) del sistema periódico.

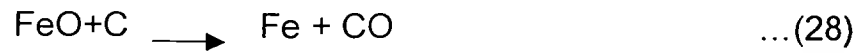
Fue descubierto hacia el año 1669 por el alquimista alemán Hennig Brand cuando experimentaba tratando de obtener oro a partir de la plata.

El contenido de fósforo en los aceros se mantiene por debajo del 0.04%, cantidad que tiende a disolverse en ferrita, aumentando ligeramente la resistencia y la dureza. En algunos aceros, una cantidad de fósforo entre el 0.07 y el 0.12% parece mejorar las propiedades del corte.

En mayores proporciones, el fósforo reduce la ductilidad, aumentando con ello la tendencia del acero a agrietarse cuando se trabaja en frío<sup>(1)</sup>.

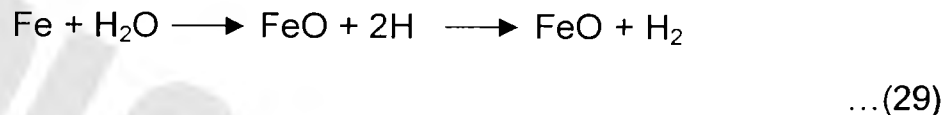
### **Oxígeno:**

La causa más frecuente de la aparición de sopladuras es la presencia de oxígeno en el acero, que se presenta disuelto como óxido de hierro o en óxidos insolubles como óxido de manganeso, dióxido de silicio u óxido de aluminio. La reducción de los óxidos por el carbono da lugar a monóxido de carbono, que no se disuelve en el metal.



Vapor de agua:

Proveniente de la humedad ambiental, de chatarra húmeda, del molde en verde, del revestimiento o de la cuchara, no se disuelve en el en el acero. A elevadas temperaturas se descompone según la siguiente reacción:



Reacción que evoluciona en sentido contrario a bajas temperaturas.

### Hidrógeno:

Proviene principalmente de la humedad del molde o ambiental, aunque también puede provenir de los productos formadores de escoria o de las ferroaleaciones si estas no se han procesado o almacenado correctamente; se diluye rápidamente en el acero líquido, originándose los poros en la solidificación por la reacción:



El efecto más perjudicial que produce el hidrógeno en el acero es la formación de copos, con la consiguiente disminución de todas las características mecánicas, y en especial una disminución de la ductilidad. Estos copos son manchas brillantes provocadas por burbujas de hidrógeno que en las operaciones de forja o laminado dan origen a finas grietas, y es tanto más grave cuanto mayor es la sección de la pieza.

**Nitrógeno:**

El contenido de nitrógeno es muy pequeño en la práctica y se encuentra combinado en forma de nitruros. Su efecto es nocivo sobre las propiedades mecánicas de los aceros<sup>(12)</sup>.

**SOLO LECTURA**

### III Desarrollo experimental.

El presente trabajo se desarrolló en las instalaciones del Taller de Fusión y Moldeo del Laboratorio Pesado del Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales con el uso del Horno de Inducción y equipos auxiliares, así como dispositivos con que se dispone.

Para elaborar un acero micro-aleado es necesario controlar los parámetros de operación, ya que los elementos de aleación son muy afines por el oxígeno y pueden perderse en forma de óxidos hacia la fase de escoria.

Se establecieron los siguientes criterios para realizar las pruebas del estudio, mismas que son:

1. Fundir 10 kg. de carga de acero líquido, con el objetivo de que no existiera salpicadura en las paredes del crisol del refractario del Horno, debido a la inyección de Argón por medio de la tobera que se instaló en la base inferior del citado crisol.
2. Efectuar la fusión de la carga metálica hasta registrar 1600 °C, para asegurarse de que se encontrara en condiciones de trabajar la operación de aleación de los elementos Micro-aleantes.
3. Realizar el proceso de decarburación para obtener el contenido de carbono apropiado de acuerdo a la norma (0.06 %C)

4. Se desoxida el baño metálico con elementos que tuvieran una fuerte afinidad con el oxígeno, para asegurarse de que prácticamente no existiera ningún potencial de oxígeno disuelto.
5. Una vez eliminado el oxígeno disuelto, se agrega ferro-silicio, ferro-manganeso y aluminio.
6. Se procede a efectuar la operación de aleación de los elementos Micro-aleantes.
7. Después operación de aleación se agrega escoria protectora sobre la superficie del baño metálico, así como también se coloca la tapa protectora de acero inoxidable con la finalidad de aislar a la atmósfera del Horno que se encontraba entre la escoria líquida y ésta.
8. La lingotera debe estar preparada con desoxidante (CaSi) y aluminio, para posteriormente realizar el vaciado directo.

### **III.1 Plan de trabajo.**

Para efectuar todo el estudio hubo la necesidad de realizar las experimentaciones siguientes:

- Se realizó una fusión para determinar y ajustar los parámetros de la decarburación a los niveles de concentración de carbono deseados (0.05 %C).
- 3 para micro-alea Ti
- 3 fusiones para alea Nb, obtener las condiciones apropiadas.

- 4 fusiones para micro - alear V

### III.2 Materiales utilizados.

Los siguientes materiales fueron seleccionados de acuerdo a las características del equipo y a las necesidades del material a obtener.

- **Barra de Acero 1045** (10,000gr acero), con la siguiente composición:

Elemento	%
C	0.45
Mn	0.87
Si	0.10
P	0.04
S	0.03

- **Gas inerte** (Argón al 99.99% de pureza)
- **Cascarilla de Laminación (FeO)** como material decarburante
- **Fluorita ( $CaF_2$ )**
- **Calcio-silicio** para desoxidarel baño metálico.
- **Micro-aleantes bajo carbono** con 65% del elemento aleante y 80% de eficiencia:

28.84gr ferro-vanadio (FeV)

28.84gr ferro-titanio (FeTi)

28.84gr ferro-Niobio (FeNb)

- **Escoria decarburante:**

200g FeO

200g CaO

48g  $CaF_2$

2 Cantidades de escoria de 448gr.

- **Material desoxidante:**

CaSi dos porciones de 30gr

- **Escoria protectora**, una cantidad de 248gr.

200g CaO

48g CaF<sub>2</sub>

- **Ferro-aleantes bajo carbono:**

19.23gr ferro-silicio (FeSi) con 75% de Si y un rendimiento del 80%

148.55gr ferro-manganeso (FeMn) con 69% de Mn y se tiene una eficiencia del 80%.

- **Tubo de vidrio PYREX:**

Se utilizan para muestrear succionando el metal líquido

- **Termo-copias:**

Se utiliza para generar la diferencia de potencial que requiere el pirómetro para medir la temperatura, estos se colocan en la punta de la lanza.

### III.3 Equipo

- **Horno de Inducción de alta frecuencia:**

Se emplea para realizar el proceso de fusión de la carga metálica, además se usa como reactor para obtener el acero micro-aleado.

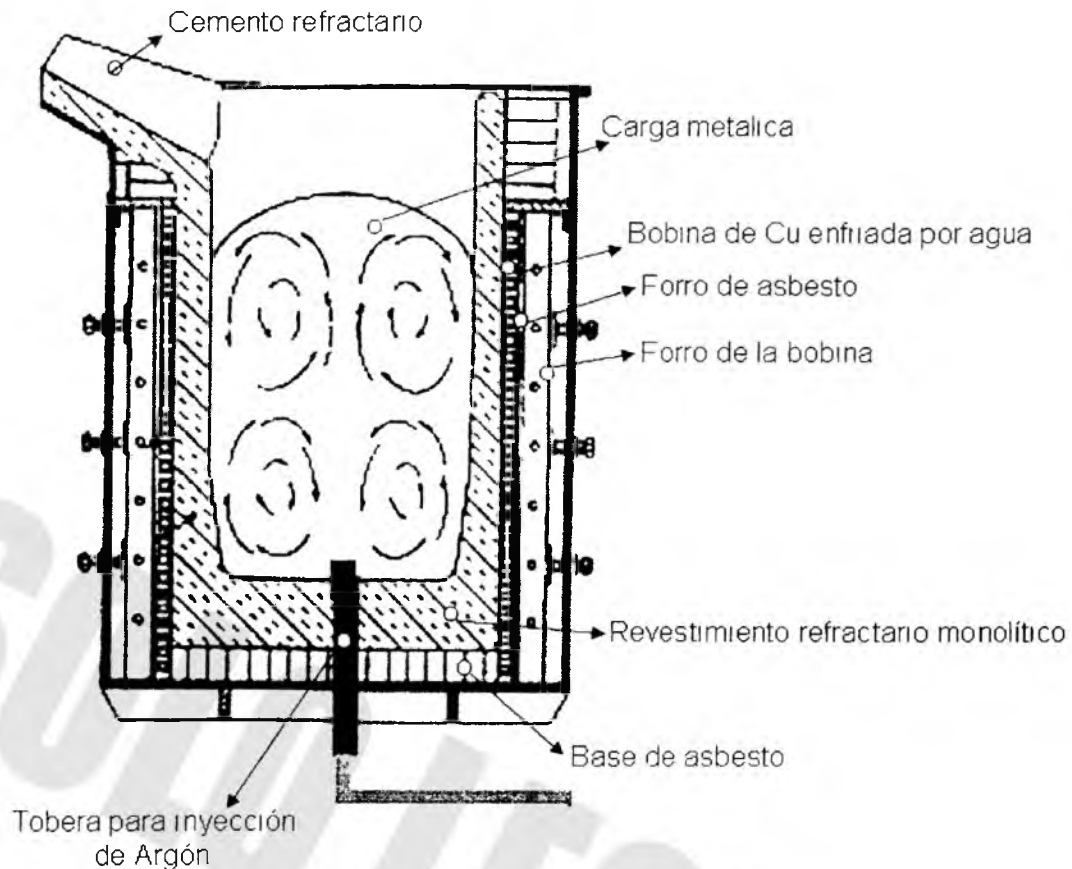


Fig 11 Sección transversal del baño metálico que está contenido en el crisol del Horno de Inducción

- **Pirómetro:**

Se utiliza para medir la temperatura del metal líquido y poder mantener un control adecuado del proceso.

### III.4 Dispositivos

- **Sistema de inyección de Argón:**

Este sistema cuenta con 2 tanques de argón, un medidor de flujo, manguera flexible y una tobera introducida en la parte baja central del horno. Esto con la finalidad de homogenizar la composición y la

temperatura, así como mantener una atmósfera inerte y flotar inclusiones no metálicas hacia la escoria.

- Quemador:

Se utiliza para calentar la lingotera y que este lista para la etapa de vaciado.

- Lingotera:

Se utiliza para recibir el metal líquido directamente del horno en la etapa de vaciado.

- Barreta de Acero:

Se emplea para manipular salpicaduras y retirar el lingote al enfriarse.

- Cuchara: Se utiliza par retirar la escoria líquida durante el proceso.

- Brochas:

Se utiliza para retirar o incorporar materiales acumulados durante el proceso en la boca del horno de inducción.

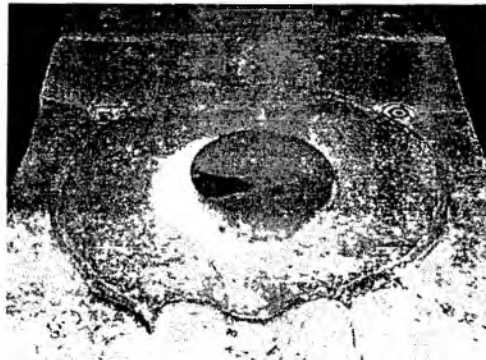


Fig.12. Fotografía del horno de inducción al inicio del proceso

### III.5 Fusión

Debido a que la materia prima que se utilizó fue chatarra de acero 1045, se necesita un proceso que reditué menos pérdidas de elementos, tales como C y Mn, por lo cual se decidió utilizar el horno de inducción sin núcleo cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características del horno de inducción utilizado en la experimentación.

Características	Horno de inducción.
Capacidad	15 Kg
Revestimiento	Básico
Corriente	120 Amps.
Frecuencia	3,000 Hz
Potencia	44 Kw



Fig 13. Fotografía del horno de inducción durante la fusión de la carga

#### III.5.1 Cómo obtener una atmósfera inerte en el horno de inducción.

Como se describe en el sub-capítulo anterior el mecanismo de oxidación del baño es fuertemente función de la temperatura; es decir,

a mayor temperatura mayor concentración se obtendrá de ese elemento en el seno del acero líquido. Para evitar este mecanismo, fue necesario controlar la atmósfera mediante el uso de un gas inerte como es el caso del Argón, mismo que fue utilizado para tratar de obtener una atmósfera del Horno prácticamente inerte. Para comprender mejor ese mecanismo, en la Fig. 16 se ilustra la acción considerada para ese propósito:

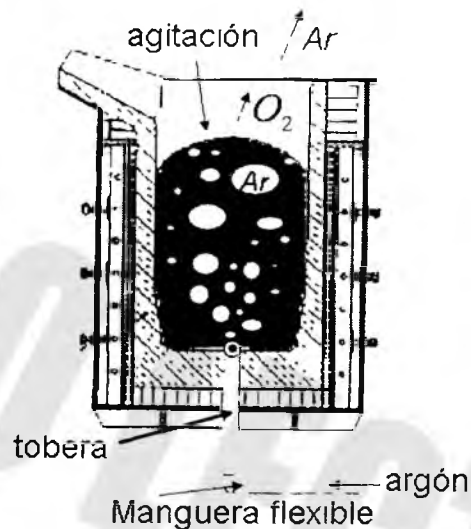


Fig. 14. Representación esquemática de la evacuación de oxígeno en un horno de inducción a 1600°C para producir acero micro aleado

La evacuación de oxígeno en el baño metálico se hace por el mecanismo de arrastre.

El objetivo del control de la atmósfera se logró mediante la adaptación de una tobera por la base inferior del crisol del Horno de Inducción, cuya operación se efectúa con 3.5 Kg/cm<sup>2</sup> de presión y 2 l/min. de gasto de argón. Esos valores fueron determinados en base a la agitación que presenta el baño; ya que si se le proporcionaba más flujo se tendía a canalizar al chorro que se inyecta. Es decir, el gas atravesaría sin agitar el baño metálico, en lo que respecta a la presión se determina en función de la presión metalostática, misma que fue

suficiente para vencerla y así se aseguró que el flujo cumplía con el propósito de agitar el baño lo más homogéneamente posible

### III.6 Cálculo de carga

En este capítulo se determinan las cantidades de los materiales a utilizar en la alimentación de carga, para obtener acero micro aleado al Titanio, Vanadio Y Niobio.

#### III.6.1 Cálculo para la barra de acero 1045 a alimentar:

Este cálculo se emplea para determinar la longitud de la barra a alimentar, teniendo en cuenta que la carga debe ser de 10 kg.

$$W_{CARGA} = 10Kg$$

$$\rho_{acero} = 7.85 \frac{kg}{cm^3} \text{ y como } \rho = w/v$$

$$V = \frac{w}{\rho} = \frac{10kg}{7.85} = 1.2738dm^3$$

$$v = a(l) \quad l = a/b \quad \text{si } a = \pi(d^2/4)$$

$$a = \left( \frac{3.5 * 0.254}{4} \right)^2 = 0.62dm$$

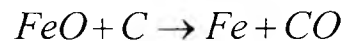
$$L = \frac{1.2738}{0.62} = 20.523cm$$

La barra debe cortarse a 23.523cm para tener una carga de 10 kg

### III.6.2 Cálculo para determinar la cantidad de escoria decarburante:

Esta escoria se emplea en el proceso de decarburación para disminuir el contenido de carbono, a su vez desfosforar y desulfurar.

Para elaborar esta escoria se requiere cascarilla de laminación (FeO), cal (CaO) y fluorita (CaF<sub>2</sub>).



$$W_{carga} = 10Kg = 10,000g$$

$$0.45 \rightarrow 0.06\%C$$

$$W_{Cdisuelto} = \frac{0.45}{100} (10,000g) = 45g$$

$$W_{Cdisuelto} = \frac{0.06}{100} (10,000g) = 6g$$

$$W_{Celiminada} = 45 - 6 = 39g$$

$$W_{FeO} = 39gC_{disuelto} \frac{(72gFeO)}{12.01gC} = 44.99g \text{ que reaccionan}$$

Calcule W escoria:

$$W_{ESCORIA} = 400g \text{ que es el } 4\% \text{ de la carga total}$$

$$W_{FeO} = 200g$$

$$W_{CaO} = 200g$$

$$w = 400g \Rightarrow \text{el } 12\% CaF_2 = 48gCaF_2$$

ESCORIA = 448g  $\Rightarrow$  200g FeO, 200g CaO, 48g CaF<sub>2</sub> Para preparar 2 cantidades de escoria decarburante

Por lo tanto, se deben prepara 2 cantidades de escoria decarburante de 448gr, integrada de 200gr de cascarilla de laminación, 200gr de cal y 48 gr de fluorita para cada escoria.

Para la escoria protectora se debe adicionar 200gr de cal y 48 gr de fluorita, teniendo un eso total de 248 gr.

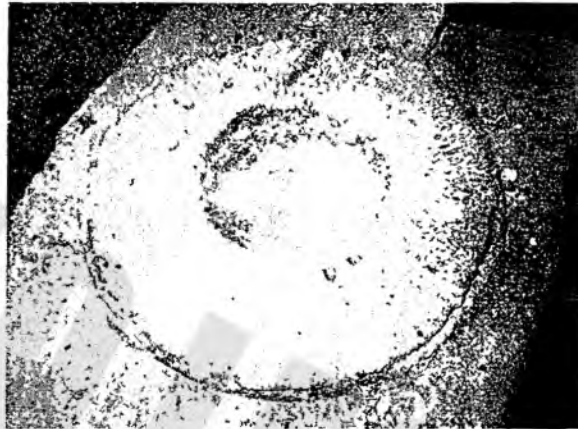


Fig 15 Alimentación de 1er escoria decarburante

Para poder alear los elementos requeridos para un acero microaleado, son necesarios el Ferro-manganeso, Ferro-silicio, ferro-vanadio, ferro-titanio, ferro-niobio y considerar el porcentaje del elemento de aleación que contiene cada ferro-aleante, así como su rendimiento. Para ese propósito se realizaron todos los cálculos que fueron necesarios para obtener la siguiente tabla que indica las concentraciones de los elementos que estuvieron presentes en el Baño metálico.

Tabla 2 Composición Química a obtener

elemento	Concentración %
V	0.15
Ti	0.15
Nb	0.15
Al	0.03
C	0.06
Mn	1.60
P	0.03
S	0.03
Si	0.10



Fig 16. Disolución de aleantes después de realizar el bloqueo.

### III.7 Secuencia experimental del proceso de decarburación.

Este experimento tiene la finalidad de ajustar los parámetros de operación y determinar el tiempo de decarburación para tener una concentración de 0.06% en el acero micro aleado a obtener. A continuación se presentan los datos registrados en la bitácora durante este proceso.

*Datos de operación para la decarburación:*

**10:17** Inicio de la fusión

**11:00** se alcanza el estado líquido. Tiempo transcurrido 43 min.

**11:04** se toma la temperatura, la cual es de 1570 ° C.

**11:06** se extrae **muestra 1**

**11:07** Se adiciona primer escoria decarburante

**11:12** se extrae **muestra 2**.

**11:17** se extrae **muestra 3** .

**11:19** Desescoriado y toma de temperatura 1521°C

**11:21** Se adiciona segunda escoria decarburante. Temperatura 1595°C

**11:26** se extrae muestra 4

**11:31** se extrae muestra5 . Temperatura de 1585°C.

**11:33** vaciado a 1600°C y se adiciona Al en la olla.

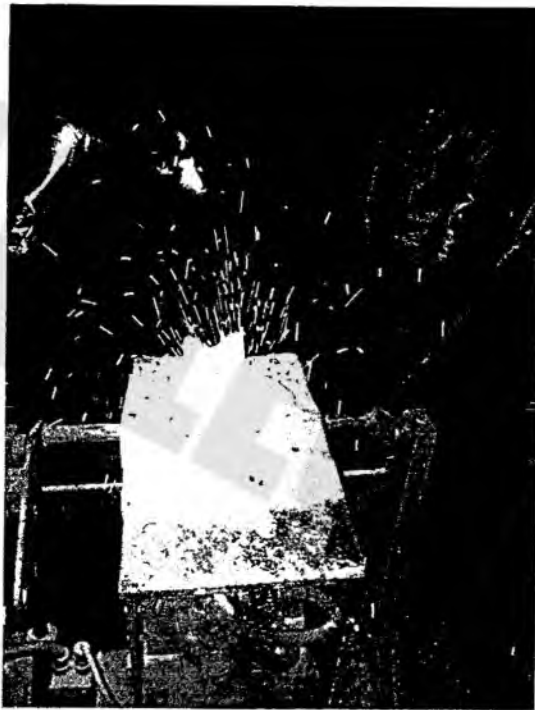


Fig.17. Fotografía del periodo decarburante

### **III.8 Desarrollo experimental para la obtención de acero micro-aleado.**

Una vez solucionado el problema del contenido de carbono se procedió a realizar una serie de experimentos para lograr alear a los elementos microaleantes y de esa forma obtener ese tipo de aceros.

*Datos de operación para Fusión de micro-aleados*

**11:48** Inicio de la fusión.

**12:31** se obtiene el estado líquido.

**12:36** se agrega primer escoria decarburante a una temperatura de 1605 °C

**12:45** se agrega segunda escoria con una duración de 11 minutos en el baño

**12:56** fin de la decarburación.

**12:57** Desoxidación en el horno con 30 g de CaSi

**12:58** Se agregan 149 g de FeMn. Y 19.23 g de FeSi

**12:59** Se agrega microaleante encapsulado con aluminio

**13:00** Se agrega escoria protectora.

**13:01** Vaciado directo a lingotera 1602 °C (la lingotera debe estar preparada con adición de desoxidante CaSi 30g y 3.3g de aluminio)

El desarrollo anterior es similar al de las siguientes 9 fusiones, Obteniéndose 10 lingotes.

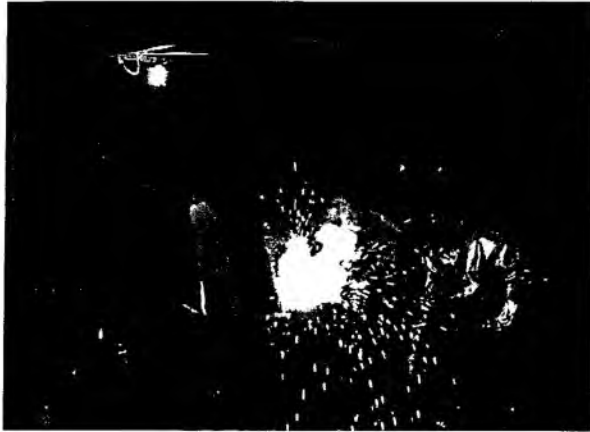


Fig 18. Vaciado de colada de acero micro-aleado.

#### **IV Resultados.**

Una vez realizados todos los experimentos que fueron necesarios para este estudio, se presentan todos los resultados obtenidos mediante la secuencia siguiente:

##### **IV Análisis químico obtenido del proceso de decarburación.**

Se realizaron tres fusiones para determinar la marcha de la decarburación, registrándose, en el mejor experimento, un tiempo total de : 25 min para obtener un % de C de 0.0227%, tal como se indica en la tabla 3:

Tabla 3 Resultados de la decarburación.

Muestra	% de Carbopno	Tiempo en min.
1.	0.45	0.0
2.	0.3493	5.0
3.	0.2479	10.0
4.	0.1905	15.0
5.	0.0491	25.0
6.	0.0227	29.0

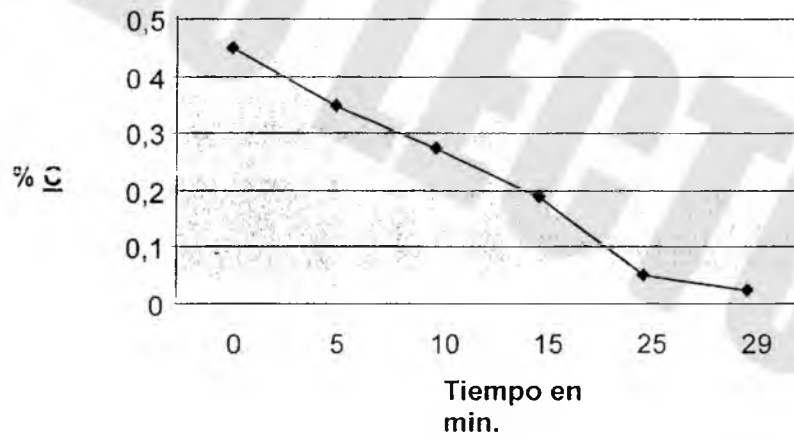


Fig. 19. Comportamiento de la concentración de Carbono con respecto al tiempo.

#### IV Análisis químicos obtenidos de los aceros micro-aleados

Todos los resultados del presente estudio han sido expresados en la siguiente:

**Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de todos los experimentos realizados, mismos que se practicaron con la técnica de “absorción atómica”.**

Exp.	%C	%Mn	%Si	%Ti	%Nb	%V
3	0.14	0.92	0.18			0.02
4	0.34	0.91	0.2			0.16
5	0.23	0.42	2.39	0.11		
6	0.34	1.02	2.7		s/a	
7	0.15	1.31	0.48			0.18
8	0.08	1.62	1.57	0.19		
9	0.09	1.21	1.34		s/a	
10	0.17	1.00	1.16			0.13
11	0.27	1.12	1.35	0.50		
12	0.42	1.03	1.49		s/a	
13	0.06	1.11	1.42		0.18	
14	0.05	1.12	1.44		0.19	
15	0.07	1.14	0.40		0.15	

La siguiente tabla muestra las especificaciones en las que se basa este trabajo de investigación:

**Tabla 5. Aceros micro aleados según Norma AISI**

<b>acero</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>otros</b>
37	0.09	0.35	0.010	0.012	0.01	0.01	0.05Al; 0.005N; 0.15Nb
38	0.09	1.25	0.010	0.012	0.03	0.15	0.05Al; 0.005N, 0.09Nb
39	0.14	1.25	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01Nb
40	0.16	1.40	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01Nb
41	0.18	1.50	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01Nb
42	0.18	1.60	0.03	0.03	0.60	0.05	
43	0.06	0.45	0.01	0.02	0.10	.	0.02Nb
44	0.06	0.75	0.01	0.02	0.10	.	0.04Nb
45	0.06	0.95	0.01	0.02	0.10	...	0.15Nb
46	0.10	0.40	...	...	...	.	0.05Ti 0.01Al
47	0.10	0.40					0.05Ti 0.01Al
48	0.10	0.40			.	...	0.05Ti 0.01Al

## **V Análisis de resultados.**

La serie de resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, fueron considerados de acuerdo a las condiciones termodinámicas a que se sometió el estudio, ya que sin este apoyo no hubiera sido posible la obtención de buenos resultados, tal como se indica en la tabla 4.

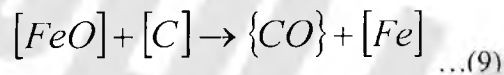
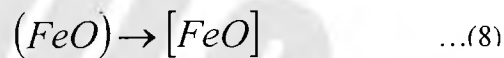
Como es de suponerse, el método convencional para producir aceros micro-aleado establece condiciones muy reductoras; es decir, que cuando se van a alear los elementos Ti, V y Nb, el baño líquido de acero a producir prácticamente debe estar exento de Oxígeno disuelto para que se alcancen a disolver esos elementos de forma elemental; si estos no se logra, todos ellos pasaran a formar parte de la fase de la escoria en forma de óxidos.

### **V.1 Proceso de Decarburación para la obtención de acero micro aleado.**

Para efectuar la refinación de la aleación Fe-C a los niveles para alear a los elementos micro aleantes es necesario disponer de un reactor apropiado para tal propósito. Sin embargo, el primer problema para este estudio fue decidir en que el reactor se debería realizar las experimentaciones, situación que se determinó que fuera el Horno de Inducción y que sólo se le podría utilizar mediante algunas adaptaciones que fueron necesarias, esto se puede observar en la figura 16.

Convencionalmente el horno de inducción a cualquier nivel de producción sólo se usa para refundir cualquier tipo de acero y hierros. Por consiguiente, en este estudio se demuestra que si puede servir como reactor y en el caso para eliminar el contenido de carbono del baño metálico mediante la practica de fusión que se ha expresado en el desarrollo experimental.

En este caso debido a que se trabaja con un horno de inducción a escala no es posible inyectar oxígeno con una lanza, por tanto se emplea la cascarilla de laminación, cuyas reacciones químicas son:



$$K_0 = \frac{P_{CO}}{[\%C]^* a_{FeO}} \quad \dots(11)$$

#### V.4 Comportamiento del contenido de Titanio (Ti).

Al observar los resultados del experimento 5, se logró observar hasta 0.11% de titanio; esta operación se realizo en la olla de vaciado cuando contenía un cuarto de aleación líquida, previamente desoxidado con 30 gramos de Calcio- Silicio y sin considerar ninguna eficiencia del ferro-titanio.

Es importante aclarar que los contenidos de Ti, V, y Nb, siempre se fijaron a un valor teórico del 0.15% a disolverse para todos los experimentos realizados.

En lo que respecta a la disolución de 0.11% de Titanio en el experimento 5, seguramente no se logró alear debido a que se adicionó en la olla, ya que para terminar el vaciado se disolvió también oxígeno que proporciona el aire durante esa acción.

También como se observa en ese experimento, los contenidos de carbono (0.23 %), manganeso (0.42%) y Silicio (2.39%) se obtuvieron, en los casos del carbono y silicio, muy por arriba de lo esperado. Es decir. Para el carbono debió ser de 0.06% y para el silicio de 0.10%.

Para el titanio obtenido en este experimento, ilustra de forma considerable la afinidad que tiene por el oxígeno, que inclusive aun cuando se tiene alto contenido de silicio (2.39%), ese elemento se oxida primero a esas condiciones de operación.

Para el caso del experimento 8, como se observa en la tabla 4, se obtuvo 0.19% de titanio disuelto. Sin embargo, para este caso se utilizó escoria protectora a base de 200 gr de CaO y 48 gr. De CaF<sub>2</sub> (óxido de calcio y fluoruro de Calcio respectivamente) con un flujo de Argón constante para todos los experimentos (2 L/min); también el vaciado del baño metálico se realizó directamente en la lingotera para evitar que el baño metálico tuviera contacto con la atmósfera que se tiene presente al vaciarse en la olla.

Como se expuso en el párrafo anterior, se alcanzó a disolver prácticamente todo el Titanio agregado, ya que se le calculó el 80% de eficiencia de aleación. Por consiguiente, también se cuidó considerablemente que no existiera algún potencial de oxígeno en el seno del baño metálico; razón por la cual se obtuvo éxito en ese experimento, además de que los contenidos de manganeso y silicio también disminuyeron con respecto al experimento 5, aunque se sigue considerando alto para el caso del contenido de silicio.

En ese experimento, sin duda fue el mejor para el objetivo del estudio, el contenido de carbono disminuyó considerablemente con respecto al experimento 5, pues se observó hasta 0.08%. Esto indica que es muy factible obtener aceros micro aleados con titanio en el horno de inducción a condiciones atmosféricas.

Al analizar el experimento 11, el contenido de titanio registró hasta 0.5%, cuyas condiciones experimentales fue idéntico al experimento 8; a reserva de que la cantidad de ferro-aleación de ese elemento (Ti) fue el doble y con 80% de eficiencia y, además, fue encapsulado con aluminio en el momento de alearlo, seguramente es la razón por lo que se alcanzó a disolver prácticamente todo el elemento tratado.

### **V.5 Comportamiento del contenido de Niobio (Nb).**

Una vez establecido las condiciones para alear titanio en los experimentos 5, 8 y 11, se decidió repetir las mismas para alear el Niobio, y como se observa en los experimentos 13, 14 y 15 de la tabla 4, se alcanzó a alear prácticamente todo ese elemento aun

considerándose el 80% de eficiencia, cuyos resultados registraron 0.18%, 0.19% y 0.15% respectivamente.

Para el caso del experimento 15, el niobio se alcanzó a oxidar, seguramente, por la naturaleza del descuido de que no se efectuó un buen proceso de desoxidación o simplemente pudiera ser un error con el análisis químico.

## V.6 Comportamiento del contenido de Vanadio (V).

Como se observa en la tabla 4, en el experimento 3, el contenido de vanadio registró 0.02%, eso sucedió por una mala práctica de desoxidación, misma que registró más tiempo para alear, razón por la que el baño se oxidara. Es decir, para este caso el vanadio funcionó como desoxidante. Además de que no se consideró ninguna eficiencia para disolverlo.

Con respecto a los contenidos de carbono (0.14%), manganeso (0.94%) y silicio (0.18%) se obtuvieron a baja concentración y no fue suficiente su bloqueo para que el oxígeno se alcanzara a disolver hacia el baño metálico, obteniéndose como resultado una muy baja aleación del vanadio. También es importante expresar que el ferrovanadio no se encapsuló en el momento de alear.

Para el caso del experimento 4, se consideró ya un 80% de eficiencia, además de que se encapsuló el ferrovanadio con lámina de aluminio, aunado a esto el contenido de carbono relativamente quedó disuelto ligeramente alto (0.15%) junto con el contenido de manganeso (1.31%), al igual que el silicio (0.48%). Es decir, el vanadio se disolvió

en el baño metálico por que los elementos antes mencionados, prácticamente bloquearon al oxígeno que proviene del aire antes de que el vanadio entrara al baño metálico.

Mismo caso sucedió en el experimento 7, y para el 10, a reserva de que el vanadio quedo registrado en 0.13%. Ese mecanismo se debe probablemente a un error también en el caso del análisis químico o a la falta de escoria protectora sobre la superficie del baño, que en algunas ocasiones se descubrían zonas por donde se podía tener contacto con el oxígeno de aire y el baño metálico.

#### **IV.2 Obtención de los aceros micro aleados en el horno de inducción.**

Para alcanzar las condiciones operativas apropiadas para la fabricación de aceros micro aleados es necesario entender las condiciones termodinámicas del proceso. Sin embargo, para que se pueda ajustar el contenido de carbono usando materiales baratos como lo es la chatarra de acero al carbono, es importante refinar a la aleación para eliminar el contenido de ese elemento a niveles de exigencia de la norma. Por consiguiente, se ha demostrado que para ese propósito el horno de inducción fue utilizado como reactor.

La otra etapa importante es el proceso de desoxidación, ya que sino existe oxígeno disuelto en el baño, se tendrá la seguridad de que los elementos micro-aleantes efectuaran el mecanismo de disolución y no el de desoxidación, obteniéndose de esa forma los aceros micro aleados.

Como se observa en la Tab. 4, los mejores resultados se obtuvieron en el experimento 7 para el caso del vanadio, en el 8 para titanio y 13,14 y15 para el niobio, cumpliéndose con esos resultados el objetivo de este trabajo.

### **IV.3 Justificación de los contenidos de Manganeso y Silicio en los experimentos realizados.**

Para el caso del contenido de manganeso presente en el baño, siempre se maneja aproximadamente 1% y para el silicio el 0.6%. sin embargo el incremento de esas cantidades se debe a que la chatarra utilizada pudo haber aportado mas concentración de esos elementos, donde está más claro es en silicio, ya que el material desoxidante aporta ese elemento que se disuelve en el baño, dando como resultado el incremento de ese elemento tal como lo indica la Tab. 4.

## Conclusiones

1. Con este trabajo de investigación, se asegura que el Horno de Inducción tiene las características de ser un reactor metalúrgico, donde se puede fabricar cualquier tipo de acero.
2. La influencia de la agitación del baño metálico es fuertemente función de la rapidez de decarburación, ya que la pendiente que se observa en la Fig. 19', para obtener hasta 0.0227% de carbono registró un tiempo de 29 min. Mismo que para el Horno de Inducción es muy aceptable.
3. Para poder alear a los elementos micro aleantes V, Ti y Nb, es necesario que en el baño no se registre potencial de oxígeno , por lo que es necesario agregar escoria protectora sobre la superficie, para que esos elementos pasen a formar parte de la solución del baño metálico, de lo contrario, se oxidarian y se transportarían a la fase de escoria en forma de óxidos.
4. Los contenidos de C, Si y Mn altos, favorecen considerablemente a la disolución de los elementos micro aleantes, mismo que se consideran bloqueadores de oxígeno.

**BIBLIOGRAFIA.**

- (1) B LINCHEVSKI, A SOBOLEVSK, A KALMEN EV, Metalurgia De Metales No Ferrosos, editorial MIR, Ex URSS, 1983
- (2) DAVID R GASKELL, Introduction To Metallurgical Thermodynamics, Mc Graw Hill, Tokio Japon
- (3) H. GHINO Y K WANDA Liquid Desoxidation and Solid State Carbures and Nitrures Presipitation Termodinamics, 1965
- (4) A T DAVENPORT, F. G BERRY y R W Honeycombe Met. Sci J, 1968
- (5) JOHN F ELLIOTT THE Physical Chemistry Of Steelmaking, publicado por Department of Metallurgy Massachussets Institute of Tecnology
- (6) R KASPAR. A STREIBELBERGGER Y O PAWELESKI, International Conference of the termomecanical Procesing of Microalloyed Austenite. The Ferrous Metallurgy Committee of the metallurgical society of AIME. Nueva York, 1981; 555-574 E SCHEIL Z. Metallkd, 1942
- (7) R R PRESTONE J MET , 29 (1), 1997 9-16
- (8) F B PICKERING. Physical Metallurgy and the desing of steels Capitulo 4. editorial Science Plublished, Londres 1987
- (9) L MEYER, F HEISTERKAMP Y W MUESCHENBORN, Microalloying 75, Union Carbide New York, 1976
- (10) L Meyer, F HEISTERKAMP y W Musachenborn Microalloyig. Union Carbide Nueva York, 1976

- (11) L. Meyer, H. E. Buhler, F. Heistekamp, G. Jackel y P. L. Ryder. Arch. Eisenh., 1972
- (12) DAVID VALLE RODRÍGUEZ, Influencia De Los Gases En El Acero, <http://www.metamsa.com/noticias/Influencia%20de%20los%20gases%20en%20el%20acero.doc>
- (13) S. A. EL-Ghazaly. Neue Hutte, 1990

SOLO LECTURA