

Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte II

METALURGIA SECUNDARIA

Jose Luis Enríquez Berciano

Enrique Tremps Guerra



Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte II
METALURGIA SECUNDARIA

José Luis Enríquez Berciano

Dr. en Ciencias Químicas

Enrique Tremps Guerra

Dr. Ingeniero de Minas

Profesores de la Universidad Politécnica de Madrid

noviembre de 2007

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Antecedentes históricos	7
1.2. Siderurgia moderna	8
1.3. Desventajas de la acería clásica	10
1.4. Objetivos y ventajas de la Metalurgia Secundaria	11
2. PROCESOS DE METALURGIA SECUNDARIA	13
2.1. Procesos vacío sin aportación térmica	14
2.1.1. Desgasificación en vacío (Vacuum Degassing, VD)	14
2.1.2. Circulación del acero	14
2.2. Procesos vacío con aportación térmica adicional	14
2.2.1. Caldeo eléctrico	14
2.2.2. Caldeo por oxígeno	15
2.3. Procesos atmosféricos sin aportación térmica	15
2.4. Procesos atmosféricos con aportación térmica adicional	16
2.4.1. Caldeo eléctrico	16
2.4.2. Caldeo por oxígeno	16
3. EXIGENCIAS, PROCESOS Y APLICACIONES	17
3.1. Cuadro general	17
3.2. Aplicaciones específicas	21
4. EL DESGASIFICADO Y SUS IMPLICACIONES	23
4.1. Gases en los aceros	23
4.2. El hidrógeno en los aceros	24
4.3. Eliminación de hidrógeno	25
4.4. El nitrógeno en los aceros	26
4.5. Eliminación del nitrógeno	27
4.6. El oxígeno en los aceros	27
4.6.1. Condiciones de equilibrio	28
4.6.2. Influencia de la temperatura	29
4.6.3. Eliminación del oxígeno	30
4.7. Desulfuración	43
4.8. Modificación de inclusiones	51
4.8.1. Control de óxidos	51
4.8.2. Efecto del calcio en los aceros	51
4.8.3. Control de forma de sulfuros	52

5. PROCESOS VACÍO SIN APORTACIÓN TÉRMICA	57
5.1. Desgasificación estática en cuchara (Vacuum Degassing VD)	57
5.2. Desgasificación en chorro (Bochümer Verein AG, BV)	59
5.3. Elevación intermitente (Dortmund-Hörder Hüttenunion AG, DH) . . .	64
5.3.1. Descripción del equipo DH	64
5.3.2. Operación del equipo DH	66
5.3.3. Ventajas e inconvenientes del proceso DH	67
5.4. Elevación y recirculación (Ruhrstahl-Heräus AG, RH)	69
5.4.1. Descripción del equipo RH	69
5.4.2. Operación del equipo RH	72
5.4.3. Posibilidades metalúrgicas del reactor RH	72
5.4.4. Fabricación de acero dulce al vacío	72
5.5. Mezclado pulsatorio (Pulsating Mixing, PM)	74
6. PROCESOS VACÍO CON APORTACIÓN TÉRMICA	77
6.1. Proceso ASEA-SKF	77
6.1.1. Descripción general	77
6.1.2. Esquema del proceso	82
6.1.3. Ventajas y posibilidades	83
6.2. Procesos similares	85
6.2.1. Horno-cuchara Stein Heurtey-S.A.F.E.	85
6.2.2. Hornos-cuchara en cámara de vacío	86
6.3. Vacuum Oxigen Decarburisation VOD	90
6.3.1. Objetivo y fundamento	91
6.3.2. Descripción del equipo	92
6.3.3. Práctica operativa	93
6.4. Procesos derivados del VOD	95
6.5. Proceso Allegheny Vacuum Refining (AVR)	96
6.6. Proceso RH-OB	97
6.6.1. Generalidades	97
6.6.2. Descripción del equipo RH	97
6.6.3. Descripción del proceso RH-OB	98
7. PROCESOS ATMOSFÉRICOS SIN APORTACIÓN TÉRMICA	103
7.1. Generalidades	103
7.2. Selección del proceso	105
7.3. Purga de argón (Argon Purge, AP)	106
7.4. Método Convencional	111
7.5. Capped Argon Bubbling (CAB)	112
7.6. Composition Adjustement by Sealed Argon Bubbling (CAS)	113
7.7. Adición mediante alambre (Cored Wire)	114
7.8. Lanzamiento de proyectiles de aluminio	116
7.9. Adición vehiculada de aluminio	118
7.10. Inyección con lanza IP y TN	119

8. PROCESOS ATMOSFÉRICOS CON APORTACIÓN TÉRMICA	121
8.1. Horno cuchara	122
8.1.1. Calentamiento por arco	122
8.1.2. Calentamiento por plasma	128
8.1.3. Calentamiento por electroescoria	134
8.1.4. Horno GRAF	136
8.1.5. BBC-CEM-IRSID	137
8.1.6. Reacciones del afino en horno cuchara	142
8.2. Proceso Argon Oxigen Decarburisation (AOD)	144
8.2.1. Generalidades	144
8.2.2. Oxidación de carbono y cromo en el baño de acero	146
8.2.3. Método operativo clásico	149
8.2.4. Fusión de la carga sólida en horno de arco	149
8.2.5. Tratamiento del baño en convertidor AOD	154
8.2.6. Comparación entre prácticas operativas HEA y AOD	161
8.2.7. Aceros fabricados en AOD	162
8.3. Convertidor CLU	162
8.4. Proceso CAS-OB	162

Bibliografía**164**

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes históricos

La segunda mitad del siglo XIX contempló el gran salto adelante del desarrollo de los métodos y equipos de fabricación de acero. Primero había sido la optimización del horno alto, tanto del equipo en sí como de la preparación de cargas, añadida a la sustitución que se había producido del carbón vegetal por el coque; optimización que comenzó a principios de ese mismo siglo.

Casi simultáneamente se produjo la aparición de los convertidores, Bessemer primero y Thomas después, que hicieron posible la fabricación masiva de acero a partir del arrabio elaborado en los hornos altos. Esta plétora de acero generó, como es lógico suponer, grandes cantidades de chatarra. La aparición casi simultánea de los hornos Siemens-Martin permitió reciclar esa chatarra, a la vez que podían actuar como unidades de conversión de arrabio en acero en serie con el horno alto.

De esta forma surgieron las tres vías clásicas de fabricación de acero:

1. mineral \rightarrow horno alto \rightarrow arrabio \rightarrow convertidor \rightarrow acero líquido
2. mineral \rightarrow horno alto \rightarrow arrabio \rightarrow Siemens \rightarrow acero líquido
3. chatarra (y a veces arrabio y mineral) \rightarrow Siemens \rightarrow acero líquido

A comienzos del siglo XX se produjo el desarrollo y difusión de la electricidad industrial que propició la aparición de los hornos eléctricos como aparato de fusión, tanto los de arco como los de inducción. Durante la primera mitad de este siglo hubo un mejoramiento de estos equipos, junto con aumento de tamaño de los mismos. Así se llegó a hornos de arco de hasta 300 t de capacidad.

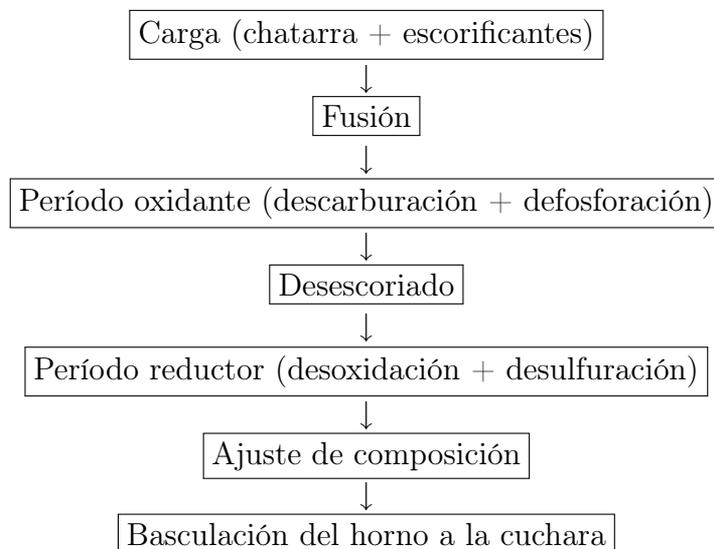
El costo de fabricación de acero en horno de arco era bastante elevado, lo que sólo les hacía adecuados para fabricación de aceros aleados, de alto valor añadido. El perfeccionamiento que se produjo, tanto en los propios hornos como en su operación, hizo que la acería eléctrica llegara a competir con la siderurgia integral (horno alto-convertidor) no sólo en calidad sino en costos. Y esto a pesar de la irrupción en

la década de los cincuenta de los oxiconvertidores (LD y sus derivados) desarrollados en Austria.

Paralelamente a estos fenómenos se produjo, a mediados del siglo XX, la desaparición paulatina de los hornos Siemens-Martin, que no podían competir en productividad con los convertidores ni en calidad con los hornos de arco. Por otro lado, los problemas medioambientales que generaban los hornos de llama (lluvia ácida provocada por el SO_2 derivado de combustibles de baja calidad), como es el caso del Siemens, aceleraron su desaparición.

1.2. Siderurgia moderna

Durante la segunda mitad del siglo XX se pusieron en juego esfuerzos considerables en la exploración y desarrollo de equipos y procesos de acería eléctrica; el horno de arco llegó a cifras inverosímilmente bajas de consumo de energía y electrodos, así como a duraciones de colada «tap-to-tap» que no llegan a una hora, como puede verse en el ábaco de la figura 1.1. Hasta entonces la colada se efectuaba íntegramente en el horno de arco, según la secuencia normativa:



Esta cuchara llena de caldo se traslada hasta la zona de colada donde llena moldes (fundición de moldeo), lingoteras (colada de lingotes para grandes forjas) o colada continua (palanquilla o planchón para laminación).

En la década de los sesenta aparecen los transformadores UHP (ultraalta potencia), con lo cual los hornos de arco, al igual que anteriormente lo hicieron los oxiconvertidores se convierten en máquinas de fundir y oxidar, transfiriendo el resto de trabajo de la colada a otro equipo; este segundo escalón es el que se ha dado en llamar «Metalurgia Secundaria» o «Metalurgia en Cuchara» (figuras 1.2 y 1.3).

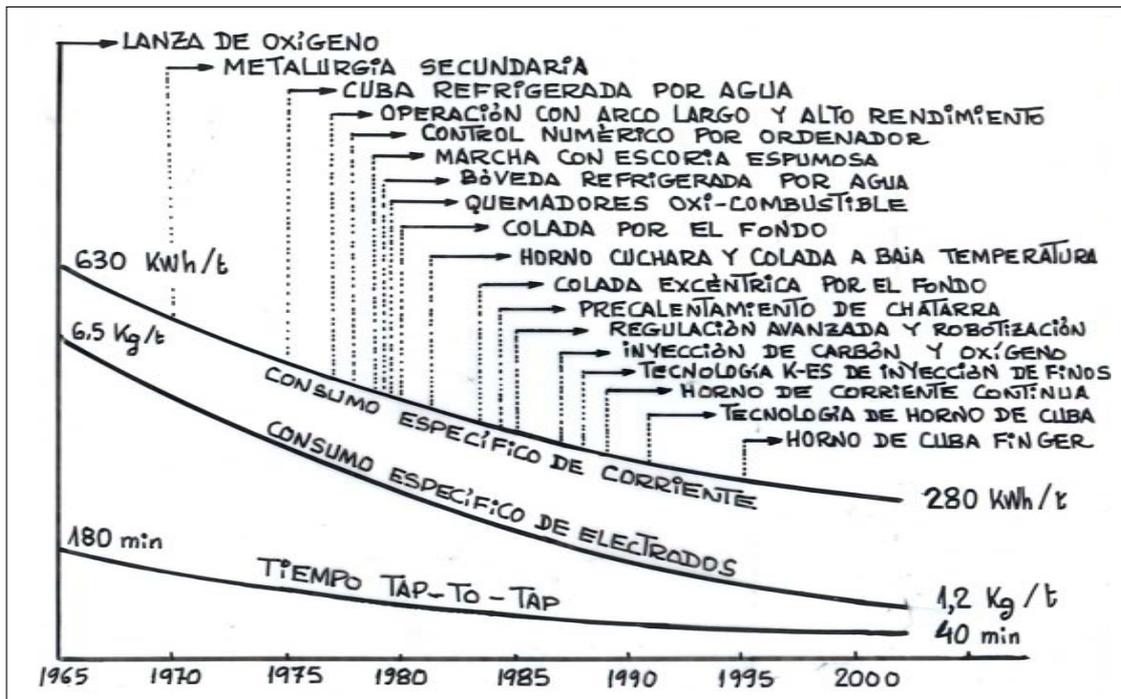


Figura 1.1: Avances en horno eléctrico

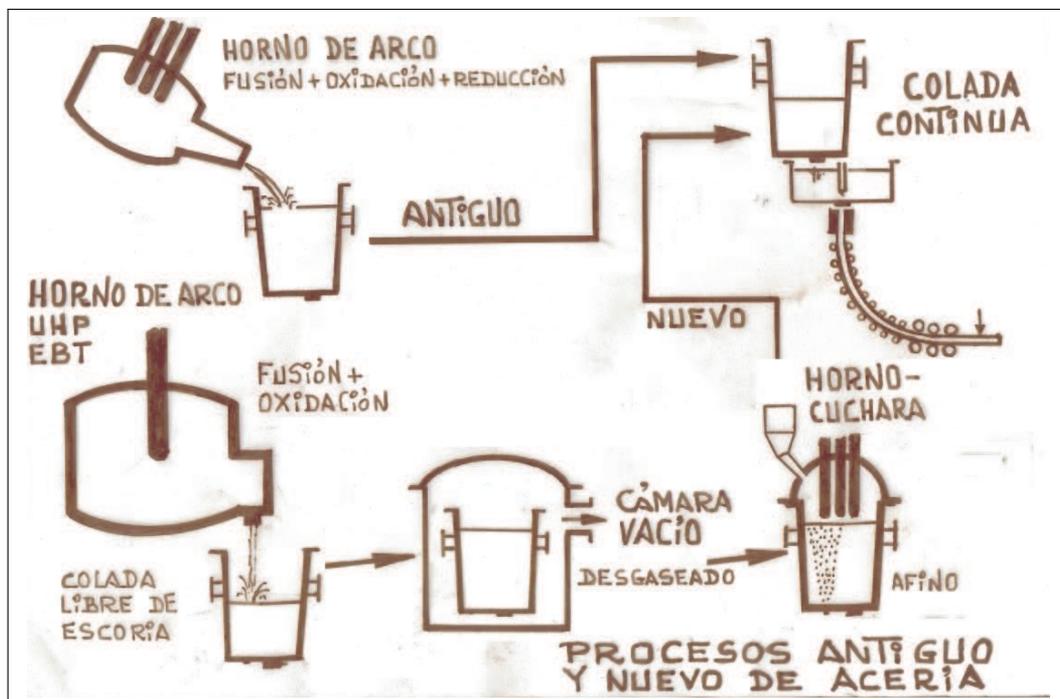


Figura 1.2: Procesos

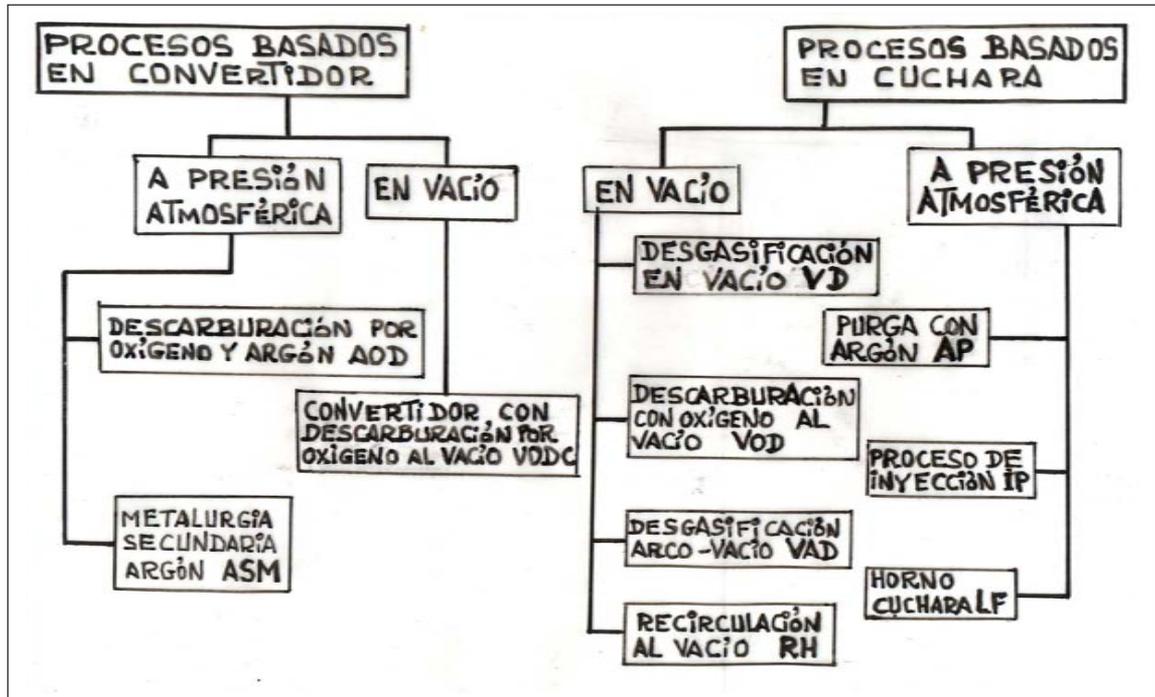


Figura 1.3: Procesos de metalurgia secundaria

1.3. Desventajas de la acería clásica

En el caso de acería eléctrica:

- Reacciones lentas por falta de interfase baño-escoria suficiente.
- Tránsito oxidación-reducción dificultoso.
- Escasa flexibilidad.
- Dificultad (por no decir imposibilidad) de hacer vacío.
- Rendimiento pobre de las ferroaleaciones.

Adicionalmente se puede decir que no se saca suficiente partido de tecnologías difundidas como: Quemadores oxifuel, lanza de oxígeno, paneles refrigerados, diseños EBT y CBT, transformadores UHP, buza de corredera y todo el mundo de la Informática.

En el caso de acería de oxiconvertidor:

- Reducción imposible en el convertidor.
- Omnipresencia de escoria fosforosa contaminante.
- Flexibilidad prácticamente nula.
- Dificultad de ajustar composición y temperatura.
- Presencia de inclusiones letales para la calidad.

1.4. Objetivos y ventajas de la Metalurgia Secundaria

Desde el punto de vista de operación se consiguen mejoras en productividad y costos, tales como:

1. Productividad:

- Optimización de las operaciones de acería.
- Mayor aprovechamiento de los equipos productivos.
- Disminución de los tiempos de colada tap-to-tap.
- Flexibilidad óptima.
- Trabajo más fácil de las máquinas de colada continua.

2. Costos:

- Ahorro de energía gracias al mejor control de temperaturas y el aprovechamiento eléctrico que conlleva.
- Mayor recuperación de ferroaleaciones y posibilidad de utilizar ferroaleaciones más baratas.
- La eficiencia de estos procesos reduce las necesidades de control de calidad.

Desde el punto de vista de calidad, estos procesos nuevos aportan mejoras a los aceros fabricados, tanto en calidad química como estructural, entre las que se pueden citar:

3. Calidad química:

- Posibilidad de encajar con precisión la composición química del acero fabricado.
- Capacidad de alcanzar contenidos ultrabajos de carbono.
- Posibilidad de defosforar a fondo.
- Se realizan con gran facilidad las operaciones básicas (desoxidación y desulfuración) de la segunda etapa (fase reductora) de la colada.
- Los equipos nuevos están en condiciones de obtener una desgasificación completa, especialmente de gases tan letales para la vida en servicio como hidrógeno y nitrógeno.

4. Calidad estructural:

- La extracción completa del oxígeno del baño por vacío o por purga con gases inertes impide la formación de óxidos (inclusiones no metálicas).
- Estos mismos procesos de vacío o purga posibilitan flotación de las inclusiones que se hubieran podido formar, enviándolas a la escoria donde son atrapadas.
- Si a pesar de todo no se pudiera evitar o flotar las inclusiones, existe la posibilidad de modificar la composición y morfología de las mismas para hacerlas menos deletéreas.
- Todo lo anterior lleva a la obtención de mejores propiedades transversales o de tenacidad, tales como las que se deducen de ensayos de resiliencia o de doblado.

Capítulo 2

PROCESOS DE METALURGIA SECUNDARIA

En este capítulo se enlistan los procesos de Metalurgia Secundaria, procesos que pueden realizarse al vacío (figura 2.1) o a presión atmosférica.

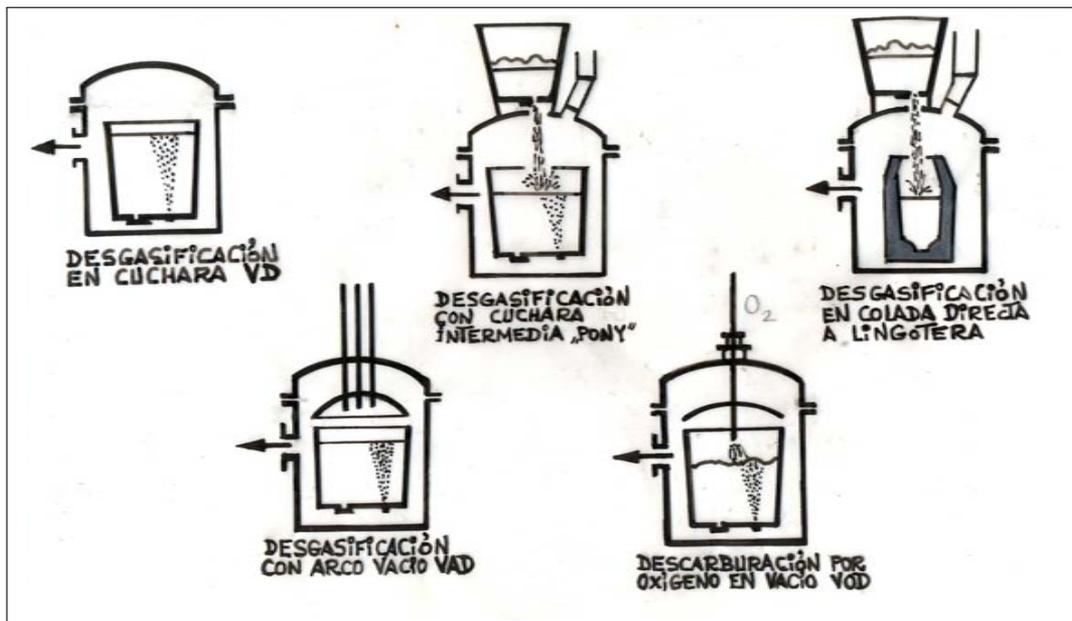


Figura 2.1: Procesos vacío en metalurgia secundaria

Los procesos al vacío consiguen resultados notables, incluso espectaculares, en la consecución de los objetivos descritos anteriormente. Los procedimientos realizados a presión atmosférica no consiguen resultados tan brillantes. Sin embargo, la relación resultados/inversión obtenida a presión atmosférica es compensatoria en una acería que fabrica aceros muy especiales sólo en ocasiones contadas que no compensan una fuerte inversión en equipos y operaciones. Tanto unos como otros pueden realizarse sin aportación térmica adicional o con caldeo posterior. Los procesos más importantes son:

2.1. Procesos vacío sin aportación térmica

Dentro de este conjunto hay dos grupos que son la desgasificación en vacío y la circulación del acero:

2.1.1. Desgasificación en vacío (Vacuum Degassing, VD)

Pueden ser:

- Estáticos en cámara desgasificadora, sin agitación o con agitación, la cual puede realizarse por gas o por inducción eléctrica.
- En chorro de metal (Bochümer Verein für Gusstahlfabrikation AG, después Fried. Krupp Hüttenwerke AG, de Bochum) del horno a la cuchara, de ésta a otra de colada o de ella a la lingotera (caso de grandes forjas).

2.1.2. Circulación del acero

Esta circulación puede ser:

- Discontinua (Dortmund Hörder - Hüttenunion, DH)
- Recirculación (Ruhrstahl - Heräus, RH), la cual puede realizarse mediante insuflación de gas inerte (Gas Lift) o inductivamente (Induction Lift, Thermo-flow, Proceso Stokes).

2.2. Procesos vacío con aportación térmica adicional

La agitación y ebullición del acero en los procesos vacío provoca un enfriamiento que en algunos casos puede ser prohibitivo para las operaciones posteriores. Para obviar esta dificultad se han desarrollado los procesos con aportación térmica adicional, la cual puede realizarse por energía eléctrica o por inyección de oxígeno.

2.2.1. Caldeo eléctrico

En este grupo de procesos el calentamiento se hace posicionando la cuchara bajo una bóveda de horno de arco de diámetro igual que el de la cuchara, todo ello en condiciones de vacío. Aunque el fundamento de los procesos es el mismo, el diseño particular varía de unos a otros, especialmente en la forma de mantener el vacío durante la operación. Puede decirse que todos ellos son variaciones de detalle del procedimiento ASEA-SKF. Los más importantes son:

- ASEA-SKF.
- Desgasificación por Arco en Vacío (VAD).
- Finkl-Mohr, variante del VAD.

- Stein Heurtey - S.A.F.E. Electric Steel Works.
- Fusión en Vacío (VM).
- Diado Ladle Furnace (LF) colaborando Davey McKee, Electromelt y Vacmelt.

2.2.2. Caldeo por oxígeno

En este grupo se aprovecha el carácter fuertemente exotérmico con que en condiciones de vacío se desarrolla la reacción Vacher-Hamilton de combustión del carbono por el oxígeno inyectado sobre el baño. Entre otros, se pueden citar los siguientes procesos principales:

- Descarburación por oxígeno en vacío VOD.
- Convertidor descarburación por oxígeno en vacío VODC.
- VOD/LD VAC (Edelstahlwerk-Republic Steel).
- ASV.
- V-R.
- AVR (Allegheny Vacuum Refining).
- RH-OB (Nippon Steel).

2.3. Procesos atmosféricos sin aportación térmica

Los efectos de creación de interfases, aceleración de reacciones, desgasificación, desoxidación, eliminación de inclusiones, etc, se consiguen mediante inyección de argón y otros gases más o menos inertes, que puede ir acompañada de adición forzada de escorificantes y ferroaleaciones. Algunos de estos procedimientos que implican inyección de gases inertes, especialmente argón, han sido desarrollados por los fabricantes o comercializadores de estos mismos gases, ya que la adopción de una tecnología basada en gases lleva a la consecución de un mercado cautivo bastante importante.

Entre éstos métodos se encuentran:

- Metalurgia secundaria argón, ASM.
- Purga con argón, AP (Union Carbide).
- Inyección desulfurante por lanza, IP y TN.
- Inyección entubada o encapsulada.
- Alimentación de hilo de Al, Ca...
- Lanzamiento de proyectiles.

- Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling, CAS.
- Sealed Argon Bubbling, SAB.
- Capped Argon Bubbling, CAB.

2.4. Procesos atmosféricos con aportación térmica adicional

Al igual que ocurría en el vacío, la inyección de gases o de materiales sólidos provoca un enfriamiento del baño de acero que en algunos casos puede imposibilitar las operaciones posteriores, especialmente en la máquina de colada continua. Esto da lugar a la aparición de los procesos con aportación térmica adicional que, al igual que al vacío, puede hacerse mediante caldeo eléctrico o caldeo por oxígeno. Los más notables son:

2.4.1. Caldeo eléctrico

- -Horno cuchara, Ladle Furnace, LF.
- Gas Refining Arc Furnace, GRAF.
- Proceso BBC-CEM-IRSID

2.4.2. Caldeo por oxígeno

- Argon Oxygen Decarburisation, AOD, (División Linde, Union Carbide).
- Creusot-Loire-Uddeholm, CLU.
- CAS con inyección de oxígeno (CAS-OB)

Capítulo 3

EXIGENCIAS, PROCESOS Y APLICACIONES

A continuación se enuncian los procesos de Metalurgia Secundaria, especialmente en base a la aplicación a que irán destinados. Para cada exigencia planteada por clientes o por otras secciones de la fábrica siderúrgica se verán en un cuadro-revisión general los propósitos a cumplir, operaciones a realizar para conseguirlos, equipos en los que pueden efectuarse y aceros que se beneficiarán de estos esfuerzos. A continuación se detallan y explican algunas aplicaciones específicas a productos o composiciones determinadas.

3.1. Cuadro general

Como se ha dicho anteriormente, en primer lugar se revisan las exigencias que se plantean al acerista y los propósitos de las mismas, operaciones a realizar y procesos y equipos para ellas y, finalmente, qué productos o equipos se benefician de ellas.

1ª Exigencia: Ajuste de composición
--

Propósito:

- Obtención segura de un análisis concreto.
- Garantizar intervalos más estrechos de composición.
- Mejorar rendimiento de adición de ferroaleaciones.

Operación:

- Adición exacta de ferroaleaciones.
- Mezclado y homogeneización correcta del caldo.

Proceso:

- DH, RH, VAD, CAS, CAB, LF.

Aplicación:

- Cualquier tipo de acero.

2ª Exigencia: Ajuste de temperatura

Propósito:

- Garantizar obtención de la temperatura exigida.

Operación:

- Enfriamiento mediante chatarra o barboteo de gas.
- Caldeo eléctrico o por oxígeno.

Proceso:

- VAD, RH-OB, LF.

Aplicación:

- Facilitar trabajo de las máquinas de colada continua.

3ª Exigencia: Desoxidación

Propósito:

- Eliminar exceso de oxígeno disuelto en el baño.
- Obtener acero limpio de inclusiones de óxidos.

Operación:

- Generación de CO acelerada por vacío.
- Formación turbulenta y barrido de Al_2O_3 .

Proceso:

- Empleo de escorias desoxidantes bajas en oxígeno.
- Procesos al vacío eliminadores de oxígeno.
- Barboteo de gases inertes purgadores de inclusiones.
- Reducción con calcio y modificación de inclusiones.

Aplicación:

- Aceros calmados.

4ª Exigencia: Desulfuración

Propósito:

- Cumplir especificación de azufre.
- Obtener acero limpio de sulfuros.

Operación:

- Estimular las reacciones metal-escoria.
- Adición forzada de CaSi, CaC₂, Mg...

Proceso:

- Trabajo con escorias sintéticas desulfuradoras.
- VAD, inyección de polvo (IP o TN), LF.

Aplicación:

- Aceros con 0,005 - 0.010 % de azufre.

5ª Exigencia: Eliminación o modificación de inclusiones

Propósito:

- Alcanzar características estructurales y mecánicas.

Operación:

- Tratamiento eliminador al vacío.
- Adición modificadora de Ca, Zr, Ti, tierras raras...

Proceso:

- VAD, inyección (IP o TN), encapsulado («sica»).

Aplicación:

- Aceros estructurales.

6ª Exigencia: Descarburación

Propósito:

- Bajar todo lo posible el contenido final de carbono.

Operación:

- Reacción carbono-oxígeno forzada por vacío o gases.

Proceso:

- Procesos vacío (ASEA-SKF, VOD, RH-OB...).
- Arrastre por gases diluyentes (AOD, CLU...).

Aplicación:

- Inoxidables o para fleje eléctrico (histéresis estrecha)
- Sustitución de efervescentes maleables y dúctiles.

7ª Exigencia: Eliminación de hidrógeno disuelto en el acero
--

Propósito:

- Evitar formación de grietas en frío.

Operación:

- Tratamiento en vacío.

Proceso:

- Procesos vacío (DH, RH, VAD, RH-OB...).

Aplicación:

- Aceros de alta fiabilidad.

3.2. Aplicaciones específicas

Las exigencias en aceros que justifiquen la desgasificación en vacío comprenden los siguientes tipos de productos o composiciones:

- Piezas forjadas de grandes dimensiones, aún de aceros con carbono medio, y, con mayor motivo, cuando se emplean aceros aleados. Caso de cigüeñales para grandes motores marinos o ferroviarios, ejes de rotor para alternadores, turbinas de vapor o hidráulicas, cilindros de laminación, discos de turbina. No sólo es necesario desgasificar para evitar la aparición de grietas internas en grandes masas de acero sino también para disminuir el peligro de inclusiones o rosarios de ellas que la forja habrá alargado y que aparecen como grietas rellenas de un polvillo blanco. Este polvillo, recogido y analizado, ha demostrado ser inclusiones que, en el caso de aceros calmados con aluminio, llega a un 80 % de alúmina y un 20 % de óxidos y silicatos.
- Piezas de acero moldeado (al carbono y aleado) de alta calidad y gran espesor como chabotas para prensas y martillos, castilletes para trenes de laminación, cilindros de apoyo moldeados, etc.. En el caso de grandes martillos de contragolpe de 25000 a 32000 kgm se han encontrado en mazas de acero moldeado, de 25 a 32 t de peso, roturas prematuras por defectos internos, las cuales han llegado a determinar la inutilización completa de la pieza.

Investigando las causas en colaboración con las plantas que las habían fabricado, se ha visto que las masas obtenidas con aceros sin desgasificar han sufrido roturas poco después de su puesta en servicio. Estas mismas piezas, fabricadas en Alemania con acero desgasificado, llevan años trabajando sin que se hayan producido averías.

- Bloques para estampas de matrices, en los que para garantizar vida en servicio se precisa tenacidad y ausencia de defectos. Son aceros aleados en piezas de gran sección; por ello es muy probable la formación de copos que inutilizarían el bloque. Aunque se tomen medidas para evitarlo, como tratamiento térmico anticopos, es indefectible que se produzcan roturas tempranas por grietas de fatiga; estas grietas han podido iniciarse en inclusiones o rosarios de ellas.
- Piezas para automoción y reactores de aviación, de gran responsabilidad, en aceros de media aleación. Aún en el caso de partir de lingotes pequeños laminados hasta redondos y cuadrados de 70 u 80 mm de lado o diámetro, existe riesgo de copos.
- Aceros para la fabricación de rodamientos de bolas y rodillos. Disminuyendo el contenido de inclusiones se aumenta la resistencia a la fatiga y se triplica la vida en servicio. Hoy día, en caminos de rodadura partiendo de barra, chapa gruesa o tubo, como también en barras o alambón para construcción de bolas y rodillos, hay que eliminar por descortezado la piel de las barras, así como la parte descarburada.

Pero también se exige máxima limpieza y eliminación de inclusiones. Por ello en las especificaciones modernas figura la exigencia de haber desgasificado el acero en vacío.

En aceros para rodamientos hay que minimizar los contenidos de fósforo y azufre. Para conseguir desulfuración a fondo hay que mantener más tiempo una escoria reductora durante la última parte de la colada del horno. Pero esta circunstancia, a su vez, promueve la absorción de hidrógeno. La única solución para disminuir el contenido de hidrógeno, como también el riesgo de inclusiones, es la desgasificación en vacío.

En las fábricas norteamericanas de rodamientos imponen como condición indispensable la desgasificación, como también lo hacen ya algunas marcas europeas.

- Chapa magnética, por la posibilidad de obtener carbonos mucho más bajos y limpieza máxima.
- Aceros de elevado contenido de carbono, aunque sean de sección pequeña, como carriles, herramientas, etc..
- Elementos y chapa para instalaciones nucleares. En los aceros para la industria nuclear, discos de turbinas, reactores de aviación y en todos aquellos en que se exija el mantenimiento de una buena resistencia a temperaturas de 450 y 550 °C . También la desgasificación en vacío mejora estas características.
- Chapa de alta resistencia para depósitos de presión, bastidores de locomotoras, etc..
- Hay referencias no confirmadas de que en aceros Hadfield (12 % de manganeso) para cruzamientos de vías, revestimientos de hornos de cemento, molinos, etc.. se disminuyen defectos.
- Para la obtención de alambre de alta resistencia, cuerda de piano, muelles, o aquellos que han de sufrir un estirado prolongado hasta diámetros muy finos, como ocurre con algunos tipos de cablecillo para cubiertas de automóvil. En alambres de acero al carbono de alta resistencia, conseguida por sucesivos estiramientos y pasadas por hileras, sin tratamiento térmico intermedio, la máxima limpieza y disminución de inclusiones en el acero, permite su estirado sin roturas hasta diámetros de 0,25 mm.

Como es sabido, cada reducción de sección por estirado en frío eleva la resistencia a la tracción de 5 a 6 kg/mm² pudiéndose alcanzar así límites de 180 y hasta 250 kg/mm² de modo que la presencia de alguna inclusión, aunque pequeña, disminuye de manera importante la sección útil de trabajo del alambre, rompiendo éste, antes de alcanzar tan elevadas resistencias.

Capítulo 4

EL DESGASIFICADO Y SUS IMPLICACIONES

Los procesos de Metalurgia Secundaria, que se revisarán más adelante, tienen como objetivo más claro el desgasificado de los baños de acero. En esta operación van incluidas las siguientes:

1. Eliminación de hidrógeno
2. Eliminación de nitrógeno
3. Eliminación de oxígeno
4. Eliminación de inclusiones
5. Descarburación por desgasificado

4.1. Gases en los aceros

Hidrógeno, nitrógeno y oxígeno son gases que están frecuentemente en contacto con los aceros fundidos en diversas etapas de los procesos de fabricación y, en ocasiones, son causa de importantes problemas en piezas moldeadas, forjadas o laminadas de acero.

La solubilidad de esos gases en los aceros aumenta con la temperatura, y esa solubilidad es mucho mayor en los aceros líquidos que en los aceros en estado sólido. El hierro puro y los aceros llegan a contener importantes porcentajes de gases cuando el baño metálico alcanza las mayores temperaturas en los procesos de fabricación. Al enfriarse el acero líquido en el horno, y en especial durante la colada, se van desprendiendo los gases, sobre todo en el momento de la solidificación, en que disminuye mucho y muy bruscamente la solubilidad.

Los principales problemas que se pueden derivar de la presencia de cada uno de estos gases en el acero son:

- El hidrógeno da lugar a la formación de las llamadas «manchas brillantes» o «copos» que reducen la tenacidad y ductilidad de los aceros. De los tres gases, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, que se disuelven en el acero a elevada temperatura luego, a la temperatura ambiente, sólo el hidrógeno aparece libre en el acero sólido.
- El nitrógeno reduce la ductilidad y comunica fragilidad a los aceros. Se suele encontrar en forma combinada, formando nitruros.
- El oxígeno origina porosidades en los aceros mal desoxidados y facilita la formación de inclusiones no metálicas. En los aceros a temperatura ambiente el oxígeno siempre aparece combinado, formando óxidos o silicatos. Se encuentra formando inclusiones no metálicas, excepto en el caso de aceros efervescentes, en que puede aparecer en pequeñas cantidades en forma de CO en los poros o cavidades que hay en el material.
- Para disminuir la acción perjudicial de los gases se suele recomendar colar los aceros a la temperatura más baja posible compatible con otras limitaciones, evitando siempre que quede algo de acero solidificado («lobos») en el fondo de la cuchara.

4.2. El hidrógeno en los aceros

Este gas crea a veces problemas, sobre todo cuando se fabrican piezas moldeadas de acero de grandes dimensiones. En las piezas de gran diámetro y de responsabilidad, la presión de hidrógeno en el acero sólido, aún en pequeñas cantidades, ocasiona defectos denominados «flakes», «hair lines», «cracks», «copos», «manchas brillantes», o «grietas internas», que son muy perjudiciales y obligan a realizar numerosas investigaciones para evitarlos. Estos defectos se manifiestan en las piezas rotas, donde aparecen en la superficie defectuosa, como indica su nombre, en forma de manchas brillantes.

En la figura 4.1 se aprecian los contenidos de hidrógeno en equilibrio con el hierro a diversas temperaturas. Se observa que el hierro puro fundido a 1539 °C puede disolver 0,0025 % de hidrógeno. La solubilidad aumenta al elevarse la temperatura del metal fundido. Al solidificarse el hierro a 1539 °C disminuye bruscamente la solubilidad desde el 0,0025 % en estado líquido hasta 0,0008 % en estado sólido. Si se sigue enfriando, disminuye aún más la solubilidad, que a la temperatura ambiente es de sólo 0,00012 (1,2 ppm).

Las grietas internas debidas al hidrógeno se forman o consolidan en el curso del enfriamiento, generalmente a unos 200 °C, que es una temperatura ligeramente inferior a 290 °C, que es la que corresponde al paso del hidrógeno atómico (que se difunde bien en el acero) a hidrógeno molecular que no se difunde y al no poder salir queda en el interior de las piezas o lingotes. La difusión del hidrógeno atómico en el acero es tanto mayor cuanto más alta sea la temperatura.

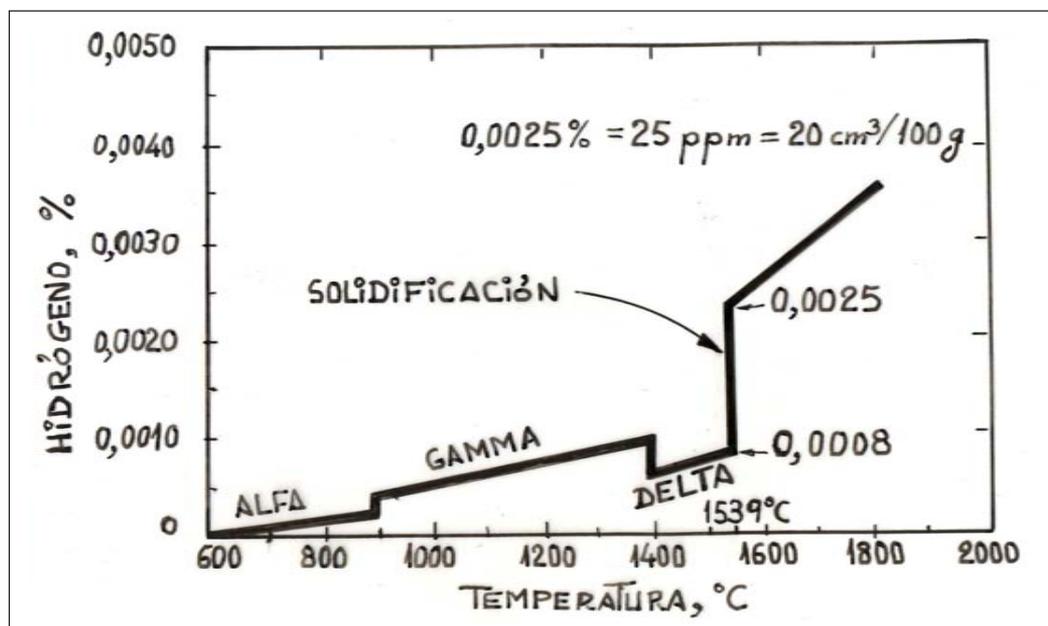


Figura 4.1: Solubilidad del hidrógeno en el hierro

En la práctica, por recocido con mantenimiento prolongado del acero a temperaturas de 600 °C o ligeramente más elevadas, es posible reducir el hidrógeno por difusión y evitar en gran parte la formación de grietas. A unos 600 °C la mayor parte del hidrógeno que contenía en solución el metal se separa en forma gaseosa y se encuentra como gas, formando pequeñas bolsadas en el interior de las piezas o lingotes. Con una permanencia prolongada a esa temperatura es posible hacer salir al gas por difusión a través del metal.

Las pequeñas bolsadas que contenían el hidrógeno (ahora ya vacías) desaparecen luego en la forja o laminación, porque al no estar oxidadas sus paredes sueldan sin dificultad por simple presión a las temperaturas de 1200 °C a las que se realiza el trabajo en caliente de los lingotes o palanquillas.

Este tratamiento tiene el inconveniente de ser bastante complicado y costoso (a veces 100 horas de duración) y de reducir las propiedades mecánicas del material por aumento de fragilidad. Suele ser necesario, en ocasiones, regenerar posteriormente el acero, en especial cuando se trata de aceros cromoníquel. El regenerado del material se consigue por un normalizado o temple en aceite, seguido de revenido. Hoy día, la eliminación del hidrógeno se hace por desgasificado.

4.3. Eliminación de hidrógeno

Ha sido el tema de mayor interés en los primeros años de desarrollo del desgasificado. Actualmente la eliminación del hidrógeno es muy uniforme en todos los procesos de desgasificado y se obtienen resultados muy regulares y satisfactorios. Por ello, a este problema se le dedica en los talleres menos atención que antes y

puede decirse que en la actualidad está prácticamente superado.

La cantidad de hidrógeno que contienen los baños de acero depende de la presión parcial de hidrógeno en la atmósfera situada sobre el metal fundido. La concentración de hidrógeno en los baños está regulada por la ley de Sievert que indica que es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del hidrógeno y viene dada por la expresión:

$$\%[\text{H}] = K\sqrt{p(\text{H}_2)}$$

La presión parcial del hidrógeno suele ser realmente del orden de 0,7 a 1 torr. Se comprende, por tanto, que en los diferentes casos que se puedan presentar el contenido de hidrógeno con que queda el acero es inferior al que corresponde teóricamente a la presión del medio ambiente, que es la que generalmente se puede medir y se señala como alcanzada en los procesos de desgasificado.

4.4. El nitrógeno en los aceros

El nitrógeno crea en ocasiones dificultades en los aceros por comunicarles fragilidad y reducir la ductilidad. En el estado líquido el acero puede llegar a contener hasta 0,0450 % de nitrógeno. El contenido de este gas, en equilibrio con el hierro líquido a 1539 °C es de 0,0390 % (figura 4.2). Al bajar la temperatura esta solubilidad pasa a ser de sólo 0,0105 %. A 1400 °C es de 0,0080 %. En el hierro gamma la solubilidad es bastante mayor que en el hierro delta; varía de 0,0210 a 0,0255 % .

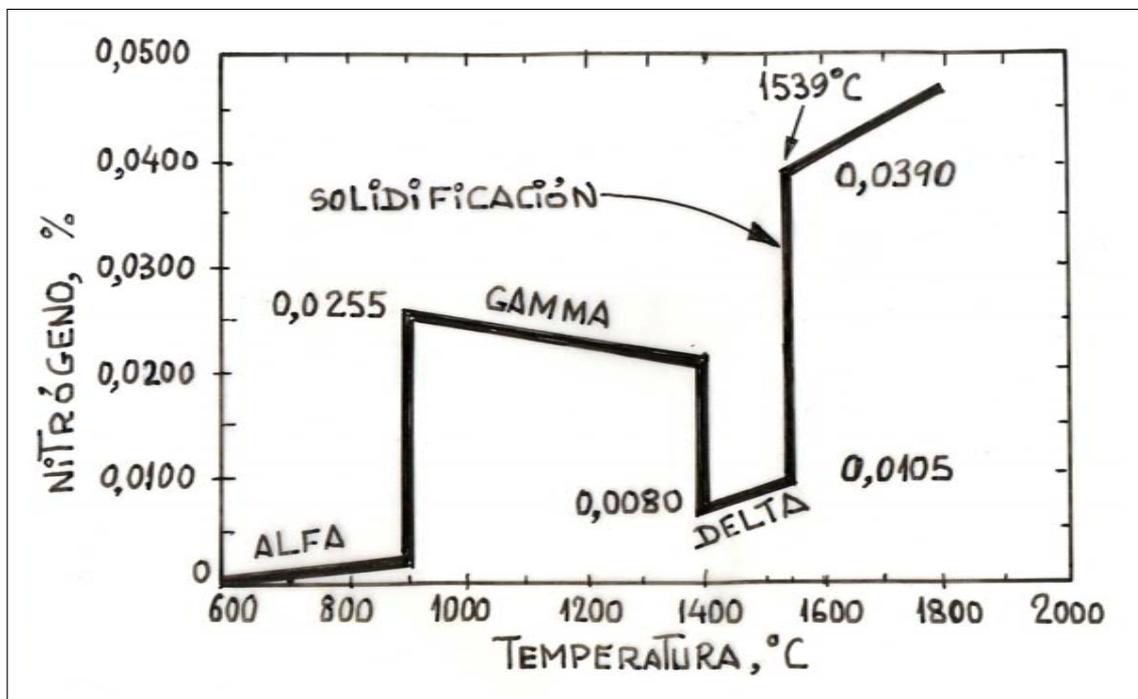


Figura 4.2: Solubilidad del nitrógeno en el hierro

Como también ocurre con el oxígeno, el nitrógeno se puede fijar en forma de compuestos complejos por la acción de ciertos elementos como Al, Ti y Zr, que forman nitruros.

4.5. Eliminación del nitrógeno

El contenido de nitrógeno viene también regulado por la ley de Sievert, y en el equilibrio es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de este gas en la atmósfera en contacto con el acero líquido. En el desgasificado, el nitrógeno es eliminado sólo en un pequeño porcentaje, generalmente comprendido entre el 10 y el 25% de la cantidad que contiene el acero. En los aceros altos en nitrógeno la eliminación puede llegar al 40%, pero eso ocurre sólo en pocas ocasiones. En los aceros calmados con aluminio o titanio el nitrógeno está tan fuertemente combinado con estos elementos que su eliminación es prácticamente nula.

La baja eliminación del nitrógeno es probablemente debida a la menor velocidad de difusión del nitrógeno, que es mucho más baja que la del hidrógeno. Contrariamente a lo que ocurre con este gas, no se puede conseguir la eliminación del nitrógeno hasta límites próximos a los señalados por la ley de Sievert.

4.6. El oxígeno en los aceros

El oxígeno, al ponerse en contacto con el acero fundido, se combina con el hierro formando óxido ferroso, FeO, que se disuelve en cantidades importantes en el baño metálico. La oxidación del acero en estado líquido se produce principalmente en los hornos de fusión. También puede oxidarse en la basculación del horno a la cuchara y en el momento de colarse el acero de la cuchara a moldes o colada continua. La cantidad de oxígeno que pueden disolver los aceros aumenta con la temperatura (figura 4.3) y disminuye al aumentar el contenido de carbono (figuras 4.4 y 4.5).

El hierro en estado líquido a 1539 °C y a la presión atmosférica, puede contener hasta 0,1600% de oxígeno (figura 4.3). A 1600 °C puede contener hasta 0,2200%. Se observa que al aumentar la temperatura aumenta la solubilidad y el hierro líquido puede contener tanto más oxígeno en disolución cuanto más alta sea la temperatura.

Al solidificarse el hierro la solubilidad del oxígeno baja muy bruscamente desde 0,1600 hasta 0,0030% y no puede, por lo tanto, mantener en disolución todo el oxígeno que disolvía en estado líquido a la misma temperatura. A la temperatura ambiente la solubilidad se hace prácticamente nula. Resumiendo, la solubilidad del oxígeno en los baños de acero depende de:

- Temperatura del baño.
- Contenido de carbono del mismo.
- Presión del ambiente sobre él.

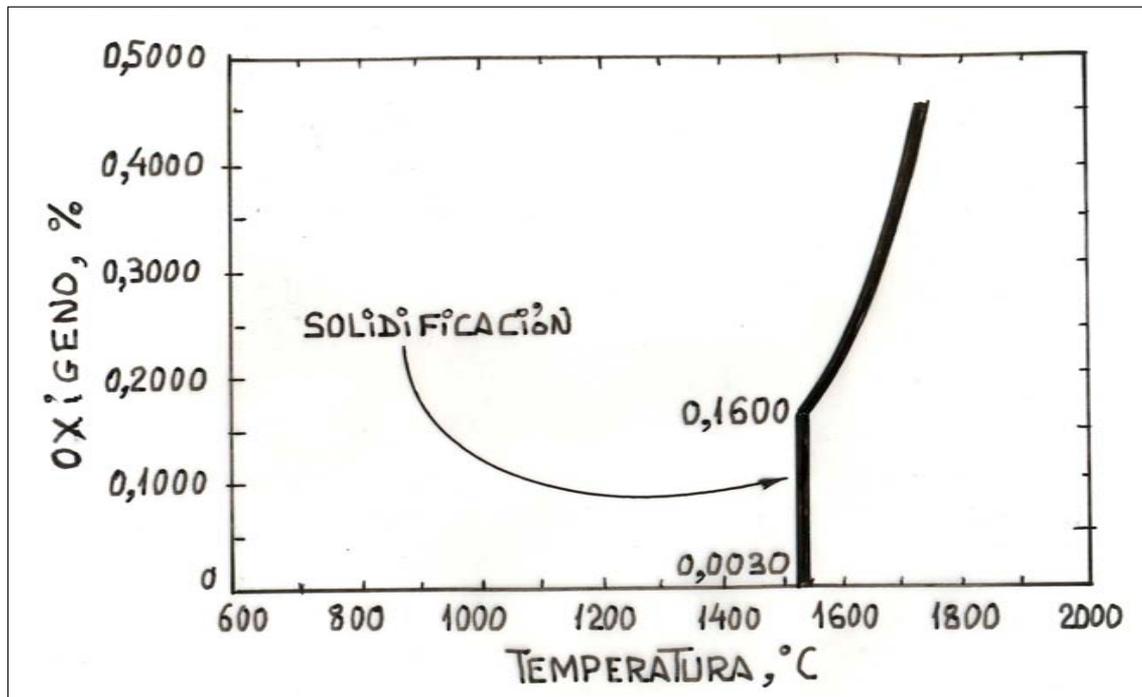
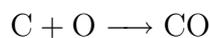


Figura 4.3: Solubilidad del oxígeno en el hierro

El oxígeno que en el enfriamiento se separa de la aleación hierro-carbono líquida reacciona con el carbono de la misma. La reacción que se produce en la solidificación de los lingotes de acero durante los procesos de enfriamiento es la siguiente:



Ese óxido de carbono que se forma puede dar lugar a porosidades en el acero.

4.6.1. Condiciones de equilibrio

En los aceros líquidos la relación entre los contenidos de carbono y oxígeno está representada en la figura 4.4, que se refiere al equilibrio a 760 torr y 1600 °C. Considerando constantes las temperaturas y la presión sobre el baño de acero, la ley que regula el contenido en oxígeno, en equilibrio con el carbono de los aceros fundidos, viene dada por la ecuación:

$$[\text{C}] \times [\text{O}] = K$$

El valor de la constante K varía con la temperatura y con la presión parcial del CO. Para 1600 °C y a la presión atmosférica, Vacher y Hamilton hallaron para la constante K el valor de 0,0025, es decir, que

$$(\% \text{C}) \times (\% \text{O}) = 0,0025$$

Otros investigadores han atribuido para K el valor 0,00202. Nielles obtuvo en sus experimentos el siguiente valor de K :

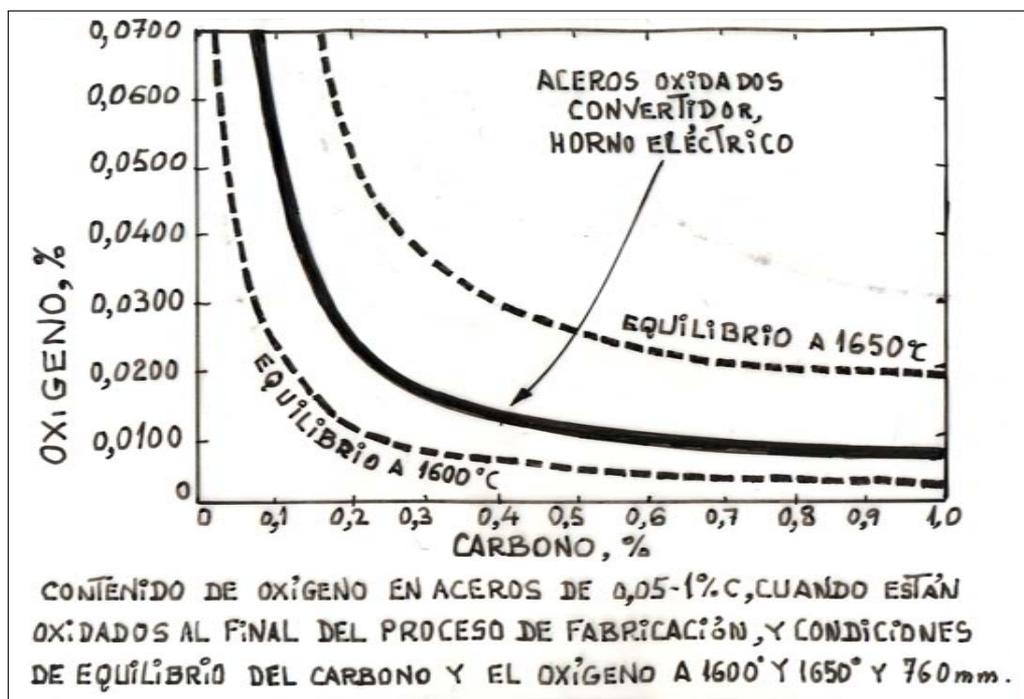


Figura 4.4: Contenido en oxígeno

$$K = [C] \times [O] = \frac{0,00202}{1 + 0,85[O]}$$

En general, el valor 0,0025 de Vacher y Hamilton es el más utilizado en los estudios relacionados con la desoxidación de los aceros. De acuerdo con esa ley, para una temperatura y presión determinadas, cuanto menor sea el contenido de carbono mayor será la cantidad de oxígeno que normalmente contienen o pueden contener los aceros líquidos.

4.6.2. Influencia de la temperatura

Por otra parte, en la figura 4.4 se señala también la importancia que tiene la temperatura en el contenido de oxígeno en el acero líquido en el horno de fusión. Para un contenido determinado de carbono, al pasar la temperatura desde 1600 a 1650 °C aumenta muy sensiblemente el contenido de oxígeno en equilibrio con el acero.

Se observa y se comprende, por lo tanto, que en los hornos, al final del proceso oxidante, los aceros a muy elevada temperatura se encuentran sobreoxidados y contienen mucho más oxígeno que el que corresponde al equilibrio.

En la figura 4.6 se señala el contenido de oxígeno en los aceros en diferentes fases de fabricación y se observa, por ejemplo, que para contenidos de 0,04, 0,10, 0,40 y 1,00 % de carbono, los contenidos de oxígeno al final de la fase oxidante, cuando están todavía sin desoxidar, son del orden de 0,1000, 0,0550, 0,0120 y 0,0060 %.

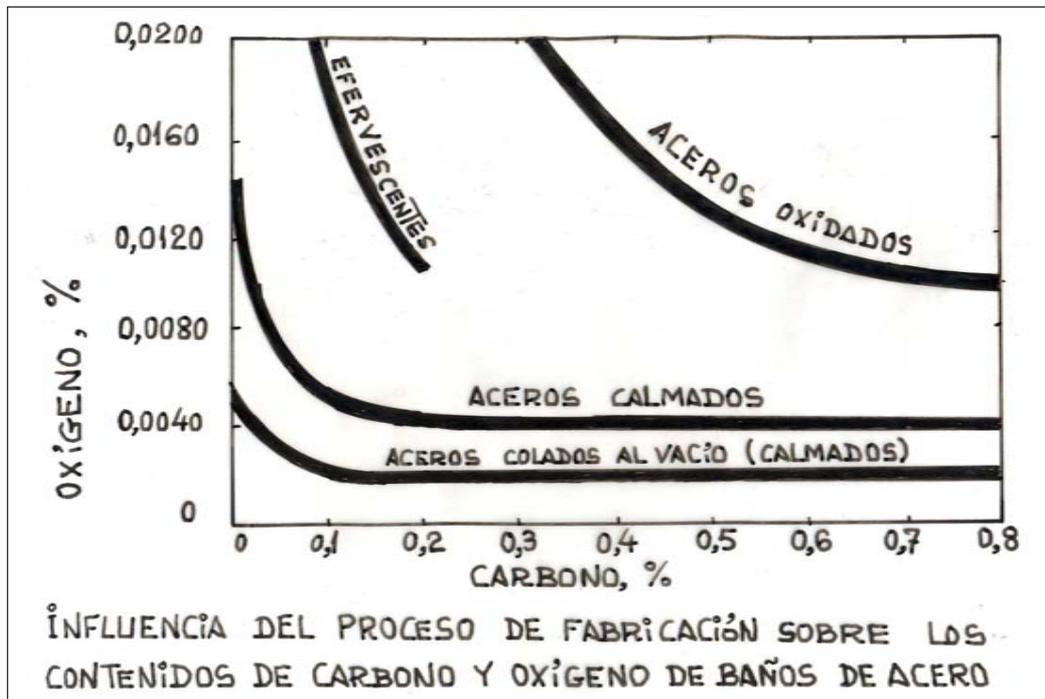
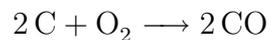


Figura 4.5: Contenido en oxígeno

4.6.3. Eliminación del oxígeno

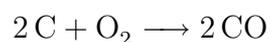
Cuando el acero líquido se pone en presencia de atmósferas con presiones inferiores a la atmosférica, disminuye su contenido de oxígeno. Se produce un desprendimiento de CO como consecuencia de la reacción



pero antes de tratar esta nueva técnica, que comenzó a desarrollarse por el año 1960, se revisarán ciertos detalles de la práctica corriente de la desoxidación de los aceros, desarrollada principalmente a partir del descubrimiento de Sir Henry Bessemer en 1856.

Desoxidación clásica

Al calmar o desoxidar los aceros por el procedimiento clásico con adiciones de pequeñas cantidades de ferrosilicio, ferromanganeso, aluminio y otros reductores, se considera que la desoxidación está bien realizada cuando después de colado el acero no se produce en el lingote ninguna efervescencia y no hay desprendimiento de gases en el momento de la solidificación. En ese caso, por contener el acero un bajo porcentaje de oxígeno, no se produce la reacción:



en el enfriamiento y solidificación, y al no haber desprendimiento de CO no se forman porosidades. En la práctica se ha visto que en la fabricación de aceros de 0,40 a 0,90% de carbono, el acero está calmado cuando el contenido en oxígeno es

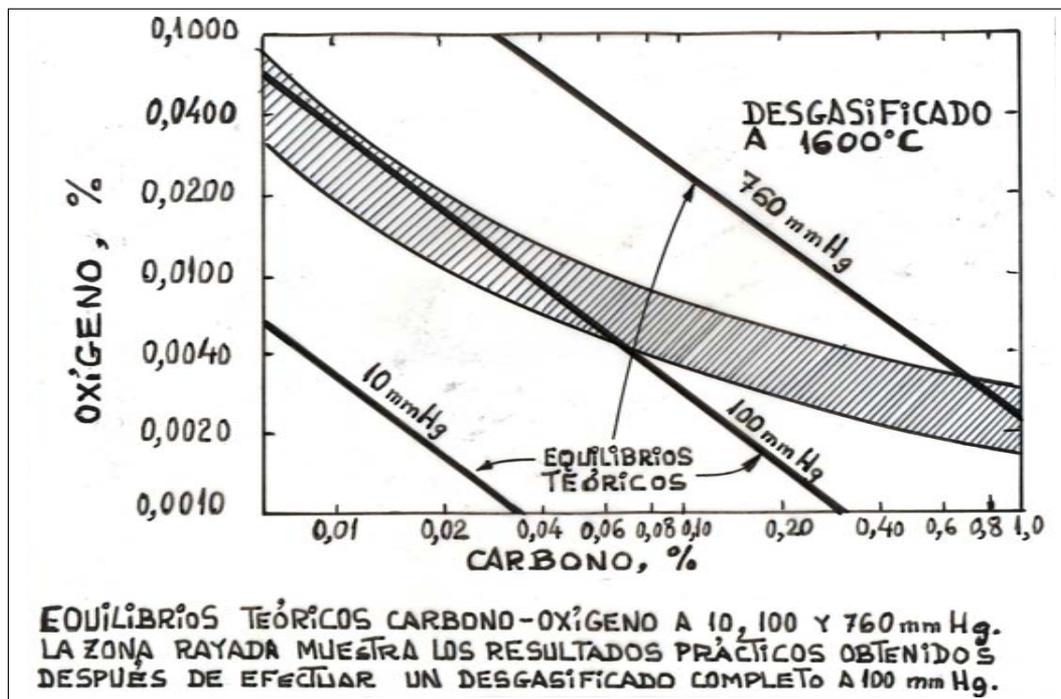


Figura 4.6: Diagrama de equilibrio teórico

inferior a 0,0030 % y, en los aceros de 0,15 a 0,40 % de carbono cuando es inferior a 0,0050 %. Para terminar, los aceros de 0,08 % de carbono están calmados cuando es inferior a 0,0080 %.

El poder desoxidante de los elementos más utilizados en Siderurgia como desoxidantes (o aleantes) se indica en la figura 4.7.

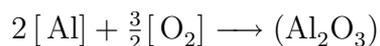
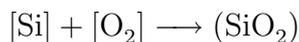
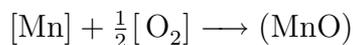
Se relacionan los valores de oxígeno y los elementos desoxidantes en equilibrio a 1600 °C y 760 torr. Se observa que el orden creciente de poder desoxidante de estos elementos es:



En la marcha normal o clásica de fabricación, esos niveles de oxígeno se consiguen generalmente empleando para el calzado las siguientes cantidades de desoxidantes:

$$\text{Mn} = 0,60 \% \ ; \ \text{Si} = 0,25 \% \ , \ \text{y} \ \text{Al} = 0,025 \%$$

Al realizarse la desoxidación de los aceros con esos desoxidantes sólidos, las reacciones clásicas de desoxidación son las siguientes:



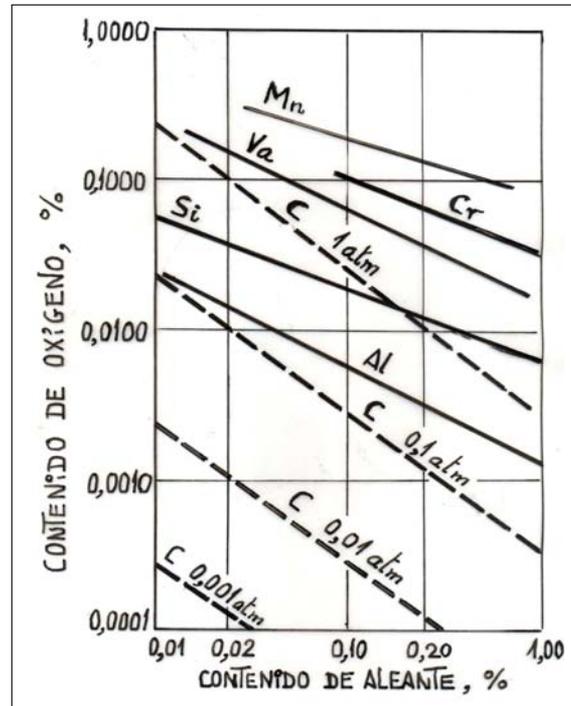
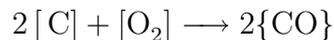


Figura 4.7: Contenidos de aleantes en equilibrio con oxígeno en baños de acero a 1600 °C

Se forman pequeñas partículas de óxidos MnO , SiO_2 , Al_2O_3 y de silicatos complejos de esos metales (inclusiones no metálicas) y disminuye mucho el contenido de oxígeno del acero. También se produce normalmente una cierta desoxidación por la acción del carbono, con la ventaja de generar un producto gaseoso, el CO , de acuerdo con la siguiente reacción:



pero, lamentablemente, su acción para bajos valores de carbono es poco enérgica.

En cambio, en el vacío o a bajas presiones, el carbono actúa como un desoxidante muy enérgico y, en términos generales, puede considerarse que la acción del carbono a muy bajas presiones (líneas de trazos) es parecida a la del aluminio con presión o atmósfera normal. Se comprende que, siempre que sea posible, se prefiera la desoxidación por el carbono, ya que no deja residuos sólidos no metálicos en la masa del acero.

Desoxidación por desgasificación

Como se ha visto anteriormente, el valor de la constante de equilibrio K de la reacción entre carbono y oxígeno es de 0,0025 a presión atmosférica de 760 torr. Sin embargo, a presión de 100 torr es 0,00025 y si la presión baja hasta ser 10 torr la constante queda reducida a 0,000035. En la figura 4.6 se muestran los contenidos de carbono y de oxígeno en equilibrio a 1600 °C, con presiones de 760, 100 y 10 torr y también los contenidos en oxígeno con que quedan los aceros al final, después de

desgasificados con presiones de 1 a 10 torr.

Si en el desgasificado de los aceros se llegara al equilibrio oxígeno-carbono, se llegaría teóricamente a porcentajes de oxígeno bajísimos (los correspondientes a presiones de 10 torr). En los procesos de fabricación de acero no se llega a alcanzar las condiciones de equilibrio, y por ello se obtienen contenidos de oxígeno un poco más elevados, que se indican en la figura, variables generalmente entre 0,0020 y 0,0100 % .

Eliminación de inclusiones

En los primeros años de utilización del desgasificado, en que sólo interesaba disminuir el contenido de hidrógeno, se fabricaba el acero por los procedimientos clásicos. Al final del proceso de fabricación se realizaba la desoxidación con ferromanganeso, ferrosilicio y aluminio, y a continuación se hacía el desgasificado. Cuando se vió que era posible desoxidar el acero en el desgasificado por la acción del carbono acelerada por el vacío se han complicado los procesos de trabajo y se han producido numerosas controversias sobre la mejor forma y momento de realizar el desgasificado. Se pueden seguir diferentes caminos, como los siguientes:

A) El proceso consta de las siguientes fases:

1. Calentamiento.
2. Oxidación.
3. Desoxidación con desoxidantes sólidos.
4. Desgasificación.

En este caso se hace el desgasificado al final del proceso después de una marcha normal de fabricación en horno eléctrico, que consta de las tres fases siguientes:

1. Calentamiento.
2. Oxidación.
3. Desoxidación con desoxidantes sólidos.

B) Se opera en la siguiente forma:

1. Calentamiento.
2. Oxidación.
3. Desoxidación por desgasificado.

En este caso se desgasifica después de realizar en el horno eléctrico sólo las dos primeras fases:

1. Calentamiento.
2. Oxidación.

Es decir, sin haber realizado la desoxidación utilizando los desoxidantes sólidos.

C) Las fases de la operación son:

1. Calentamiento.
2. Oxidación.
3. Desoxidación parcial con desoxidantes sólidos.
4. Desgasificado.
5. Se completa la desoxidación con manganeso, silicio y aluminio.

El método de trabajo más eficaz y cómodo es el C).

En general, teóricamente, parece que lo más ventajoso y recomendable es el proceso B, haciendo la desgasificación de un acero sin haberlo desoxidado antes con desoxidantes sólidos, como el ferromanganeso, ferrosilicio y aluminio, que dan lugar a la formación de inclusiones.

Este método tiene la ventaja de que al no realizarse antes con desgasificantes sólidos, como ferromanganeso, ferrosilicio y aluminio teóricamente no hay en la primera fase de la desoxidación formación de productos sólidos (inclusiones) que rebajan la limpieza del acero y se obtiene un acero muy limpio de inclusiones, ya que el producto de la desoxidación es ahora el CO gaseoso.

Si después del desgasificado se añade, como se indica en el proceso C, una pequeña cantidad de los desoxidantes clásicos, para llegar a un calado del acero más completo, como entonces el contenido de oxígeno del acero es ya muy bajo e inferior al inicial del acero, no hay formación de importantes cantidades de inclusiones y el acero será más limpio que desoxidando por el procedimiento clásico. Operando como se indica, y añadiendo luego al final sólo una pequeña cantidad de desoxidantes, los elementos manganeso, silicio y aluminio, que sirven para complementar la desoxidación realizada por desgasificado, se incorporan al acero casi más como elementos de aleación que como desoxidantes (como elementos de aleación se disuelven en el acero, como desoxidantes se hallan combinados con el oxígeno, formando inclusiones).

Si se hace primero el desoxidado clásico, proceso A, y luego el desgasificado, en la primera fase de desoxidado clásico se forman las inclusiones (óxidos, silicatos de hierro, manganeso y aluminio) y luego el desgasificado, aunque disminuye un poco los óxidos que ya contiene el acero, no mejora sensiblemente la limpieza. El acero obtenido no es tan limpio como el obtenido desoxidando primero por desgasificado

y haciendo luego un calmado complementario al final del proceso.

Si se desgasifica un acero que ya tiene inclusiones, en esa operación de desgasificado no se consigue más que una ligera disminución (5 al 10 %) de las mismas.

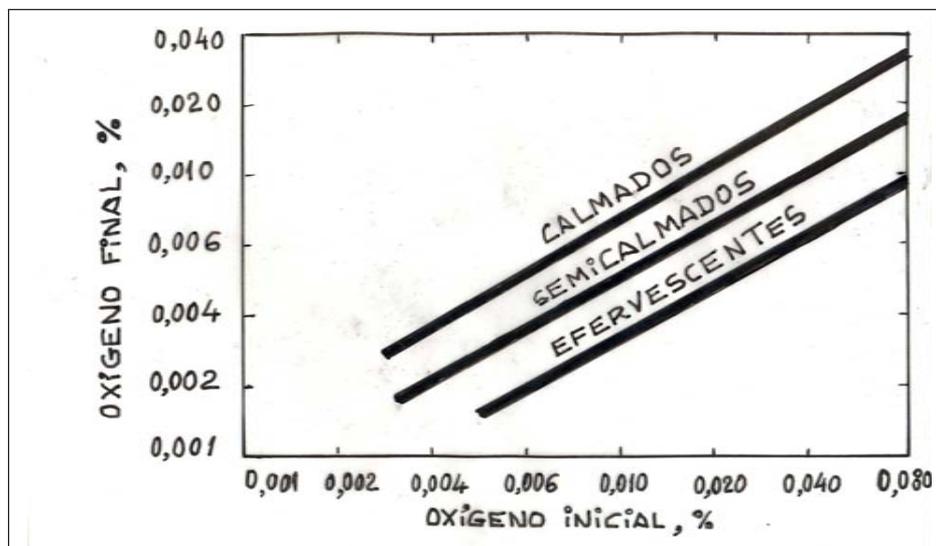


Figura 4.8: Rendimiento del desgasificado de diferentes aceros

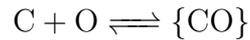
En la figura 4.8 se indican las cantidades de oxígeno total con que quedan los aceros después del desgasificado, de acuerdo con el proceso de desoxidación seguido anteriormente a recibir ese tratamiento. Se observa que los aceros que han sido calmados previamente por el procedimiento clásico son los que contienen más oxígeno. Esto es lógico, puesto que al calmar con ferromanganeso, ferrosilicio y aluminio, el oxígeno que contiene el acero queda fijado en la masa líquida en forma de inclusiones y aporta oxígeno al análisis del acero.

En cambio, cuando el acero oxidado es sometido al desgasificado directamente (proceso B) la eliminación del oxígeno se hace por reacción con el carbono como CO gaseoso y hay una disminución sensible en el contenido de oxígeno total del acero. Esos contenidos de oxígeno señalados en la figura 4.8 son proporcionales a la cantidad de inclusiones en el acero. Se comprende, por lo tanto, que la desoxidación por desgasificado disminuye la cantidad de inclusiones presentes en el acero.

Descarburación por desgasificado

En epígrafe anterior se ha visto que la reacción de carbono con oxígeno en condiciones de baja presión permite desoxidar el baño por reacción con el carbono. Las posibilidades que ofrece el desgasificado para descarburar el acero por medio de esa reacción son de gran interés. En los hornos de arco es difícil fabricar aceros con menos de 0,06 % de carbono debido a que cuando el contenido de carbono es muy bajo, inferior a 0,10 %, los electrodos recarburan el baño en la fase reductora.

Por desgasificado es posible, en cambio, obtener sin dificultad aceros de 0,03 a 0,004 % de carbono, que luego quedan perfectamente desoxidados con adiciones muy pequeñas de desoxidantes, generalmente aluminio. En la reacción reversible



se produce gas CO. En consecuencia, cualquier causa que elimine este CO formado, como puede ser el vacío o la dilución, desplazará hacia la derecha la reacción, permitiendo desoxidar y descarburar simultáneamente.

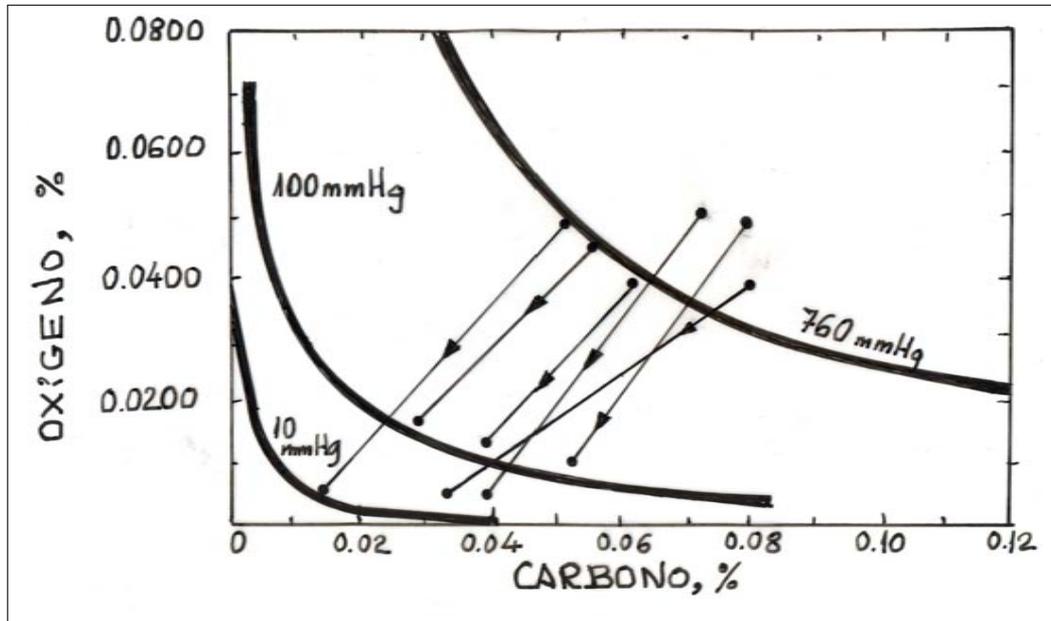


Figura 4.9: Evolución de composiciones durante el desgasificado de varios aceros calmados

En la figura 4.9 se ven varios ejemplos de los resultados obtenidos con el desgasificado de aceros fundidos, de bajo contenido de carbono. Se ha trabajado con presiones de 1 torr y con ello ha disminuido la cantidad de carbono y oxígeno que contienen. Teóricamente, de acuerdo con la ecuación $\text{C} + \text{O} = \text{CO}$, a una disminución de 12 unidades en peso de carbono corresponde una disminución de 16 unidades de oxígeno. En la figura se aprecia cómo un grupo de aceros de 0,05 a 0,08 % de carbono quedan después del desgasificado con unos contenidos de carbono de 0,02 a 0,05 %.

Las pérdidas de carbono y oxígeno, como consecuencia del desgasificado, son bastante proporcionales a las teóricas que corresponden a la reacción antes citada y en los ejemplos que se señalan. Los descensos de carbono de los aceros por desgasificado varían de 0,03 a 0,06 %.

En estos casos, se fabrican en el horno de arco los aceros con 0,05 a 0,08 % de carbono y luego, desgasificando el baño mediante los procesos que ofrece la Metalurgia Secundaria (que se verán más adelante) se llega a contenidos de 0,02 a 0,05 %, que son porcentajes muy bajos y casi imposibles de alcanzar en las marchas clásicas

de fabricación en horno eléctrico de arco.

Desgasificado de los aceros

El desgasificado de los aceros comenzó a realizarse en Alemania Occidental hacia 1951. Inicialmente se realizó para eliminar el hidrógeno de los aceros para grandes piezas de forja y la consiguiente pérdida de tenacidad y roturas catastróficas que provocaba este gas. Sobre la marcha de su utilización se vió que también aportaba una gran posibilidad de eliminar las inclusiones y permitir la obtención de aceros limpios, de gran calidad.

El desgasificado tiene también gran interés en la fabricación de aceros de muy bajo contenido de carbono, como los inoxidables o para equipos eléctricos. En la fabricación de acero en horno eléctrico es difícil llegar a contenidos menores de 0,06 % porque los electrodos contaminan el caldo al cederle parte de su carbono. Por desgasificado de los aceros fabricados en hornos eléctricos se obtienen sin dificultad aceros extrabajos en carbono, como se verá más adelante. También se consigue un control más exacto de la composición química y del rendimiento de las aleaciones que se adicionan.

En línea con lo dicho para la ferroaleaciones en el párrafo anterior, la posibilidad de descarburar hasta llegar a tasas muy bajas tiene gran interés en algunos aceros, como los inoxidables austeníticos. En el proceso clásico (más bien diríase que antiguo) de fabricación en horno de arco se producían, además, importantes pérdidas de cromo, que en el caso del desgasificado se evitan casi completamente.

Ventajas del desgasificado

Entre otras ventajas se consiguen las siguientes:

1. En el desgasificado hay una eliminación muy importante del contenido de hidrógeno, del orden del 50 al 70 %. Con esto se suprimen los largos, engorrosos y caros recocidos que hay que dar a las piezas forjadas (o moldeadas) de gran espesor. Por ejemplo, un lingote redondo de 500 mm de diámetro necesita ser recocido dos semanas a 600 °C para hacer pasar el contenido de hidrógeno desde 6 cm³/100 g hasta ser 2 cm³.
2. Se reduce el contenido de oxígeno de los aceros y esta reducción es particularmente importante en los aceros que no hayan sido desoxidados previamente. En aceros calmados la disminución viene a ser del 40 %, en los semicalmados es el 60 % y en los no calmados (efervescentes) el 75 %.
3. Reducción del contenido de nitrógeno en un 25 a 30 % del inicial, con lo que se disminuye así la posibilidad de presencia de nitruros y acritud.
4. Se minimizan las inclusiones no metálicas, tanto en número como en tamaño. Las máximas ventajas se extraen cuando se desgasifican aceros que no se han

desoxidado previamente por adición de ferroaleaciones de manganeso, silicio, y aluminio. La disminución en cantidad puede variar del 20 al 70 %. Recuérdese que la desoxidación provoca reacción C–O con formación gaseosa de CO. No se forman inclusiones sólidas de MnO, SiO₂ y Al₂O₃.

5. Al hacer las adiciones de ferroaleaciones en el baño de acero después de la desgasificación, por tener siempre un baño con muy bajo contenido de oxígeno, hay un rendimiento mucho mayor de las ferroaleaciones y se alcanza gran precisión en la especificación deseada para cada elemento.
6. Se observan mejorías sensibles en las propiedades transversales (o de tenacidad) del material, especialmente ductilidad y fatiga, que tienen una gran dependencia de la disminución de cantidad y tamaño de las inclusiones no metálicas (óxidos, silicatos...).
7. Con el desgasificado se consigue que disminuya la segregación en los lingotes, tanto la segregación positiva en V situada en la parte superior del lingote como la segregación negativa en forma de A situada en la parte inferior.
8. Disminución de la susceptibilidad de los aceros martensíticos a entalladuras producidas por cambios bruscos de temperatura.
9. Mejora de las propiedades mecánicas, aumentando ductilidad y resistencia a la fatiga, calidad más uniforme y empleo más seguro.
10. Eliminación parcial, por evaporación, de elementos perniciosos como As, Sb, Bi, Sn, Cu, Pb,..., alguno de los cuales, aún en proporciones muy pequeñas, disminuyen las características mecánicas del acero que las contiene.
11. El hervido y agitación que se produce durante el tratamiento en vacío facilita la homogeneización del acero, produciéndose una ligera disminución del contenido de carbono y, posiblemente, de azufre.
12. Mayor uniformidad de los resultados de tratamientos térmicos.

Termodinámica de la descarburación

En este capítulo se estudia la termodinámica de la descarburación de baños de acero líquido conteniendo cromo. La descarburación es un problema de primer orden en la fabricación de acero inoxidable, especialmente en lo que respecta a la práctica en horno de arco. El empleo de oxígeno gas en lugar de mineral de hierro ha reducido sustancialmente las pérdidas previsibles de cromo durante la fase oxidante, ya que temperaturas superiores desplazan el equilibrio carbono-cromo hacia contenidos más altos de cromo en el baño.

Un desplazamiento adicional del equilibrio se alcanza reduciendo la presión parcial de CO sobre el fundido mediante el empleo de vacío (VOD, VAD, ASEA-SKF, RH-OB) o dilución por mezclas de gases diversos (AOD, CLU). Ambas innovaciones, que simplemente son aplicaciones de principios termodinámicos bien conocidos, han

resultado en progresos significativos de acería y causado una verdadera revolución en la fabricación de aceros inoxidable y, en general, aceros de muy bajo carbono.

La descarburación de baños que contienen cromo debe proceder prácticamente sin que se produzca oxidación del cromo hasta que el contenido de carbono llega a quedar por debajo de un valor crítico que está en relación con el equilibrio carbono-cromo. Es previsible que una descarburación adicional resulte en pérdidas de cromo debido a la oxidación simultánea de carbono y cromo. Si el contenido de carbono se hace inferior al crítico, comenzará la oxidación del cromo con el comienzo del soplado de oxígeno, mientras que la descarburación comenzará sólo después que se alcance el equilibrio carbono-cromo.

De esta forma, la descarburación procede sólo como una oxidación simultánea de carbono y cromo que, como es lógico, resulta en elevadas pérdidas de cromo, mayor consumo de ferrocromo, tiempo de colada más largo, etc. Dado que esta situación ha de evitarse, es evidente que el operador del horno debe estar en capacidad de estimar, basándose en el análisis químico y temperatura de la primera muestra de colada, si el contenido de carbono es superior o inferior al crítico, es decir, si él puede comenzar el soplado con oxígeno o tiene que hacer algunas correcciones.

Hay que saber qué correcciones se precisan y cuándo; en qué extensión; cómo pueden hacerse. El propósito de este capítulo del estudio global es mostrar cómo puede el operador del horno estar en condiciones de responder a las preguntas anteriores. El empleo de los ordenadores puede ayudar a poner una herramienta potente, cual es la termodinámica, en manos del operador del horno.

1) Equilibrio carbono-cromo

El equilibrio carbono-cromo puede calcularse, basándose en los equilibrios carbono-oxígeno y cromo-oxígeno a partir de las siguientes ecuaciones:



+



$$K_3 = \frac{P_{CO} \cdot a_{[Cr]}^{3/4}}{a_{[C]} \cdot a_{Cr_3O_4}^{1/4}} = \frac{(f_{Cr} \cdot [Cr])^{3/4} \cdot P_{CO}}{f_C \cdot [C] \cdot a_{Cr_3O_4}^{1/4}} \quad (4.4)$$

Usando los valores «más probables» de K_1 y K_2 , la constante de equilibrio K_3 puede expresarse de acuerdo con la ecuación:

$$\log K_3 = -\frac{11955}{T} + 7,89 \quad (4.5)$$

El coeficiente de actividad de un elemento x ($x = \text{C}, \text{Cr}, \text{Si} \dots$) disuelto en el baño puede determinarse según la ecuación:

$$f_x = \exp\left\{2,303[e_x^x \cdot [\%X] + \sum_{n=1}^k (e_x^{Y_n} [\%Y_n])]\right\} \quad (4.6)$$

Los parámetros de interacción e_x^y suelen darse con referencia a 1600 °C de temperatura. Su valor para otras temperaturas puede deducirse con aproximación mediante la relación de Nelson:

$$e_T = \frac{1873}{T} e_{1873} \quad (4.7)$$

Y^X	C	Cr	Ni	Si	Mn
C	0,22	-0,024	0,008	0,106	-0,002
Cr	-0,118	-	-0,009	-0,023	-
Si	0,243	-0,010	-	0,107	-

Cuadro 4.1: Valores seleccionados de los parámetros de interacción a 1600 °C

Combinando las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6, y empleando los valores de los parámetros de interacción dados en el cuadro 4.1, el equilibrio carbono-cromo viene dado en la forma implícita:

$$\begin{aligned} \log C - \frac{3}{4} \log Cr + \frac{1873}{T} (0,309C + 0,123Si - 0,02Mn - 0,024Cr + 0,015Ni) + \\ + \log P_{\text{CO}} - \frac{1195}{T} + 7,89 + \frac{1}{4} \log a_{\text{Cr}_3\text{O}_4} = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

La solución exacta de la ecuación anterior es imposible. Sin embargo, puede emplearse una simple calculadora programable para obtener una solución numérica. Resulta fácil elaborar un programa para el cálculo del contenido crítico de carbono del baño. Los resultados del análisis químico y temperatura de la primera muestra (muestra después de fusión) del baño se introducen como «input» en la calculadora. Ésta determina el contenido crítico de carbono, lo compara con el valor actual y, si éste es menor, se calculará la temperatura a la que debe calentarse el líquido antes de iniciar el soplado de oxígeno. La figura 4.10 presenta el contenido crítico de carbono en función de la temperatura y contenido de cromo del líquido.

2) Equilibrio silicio-cromo

Similarmente a como se ha hecho anteriormente, puede deducirse la siguiente ecuación que representa el equilibrio silicio-cromo:

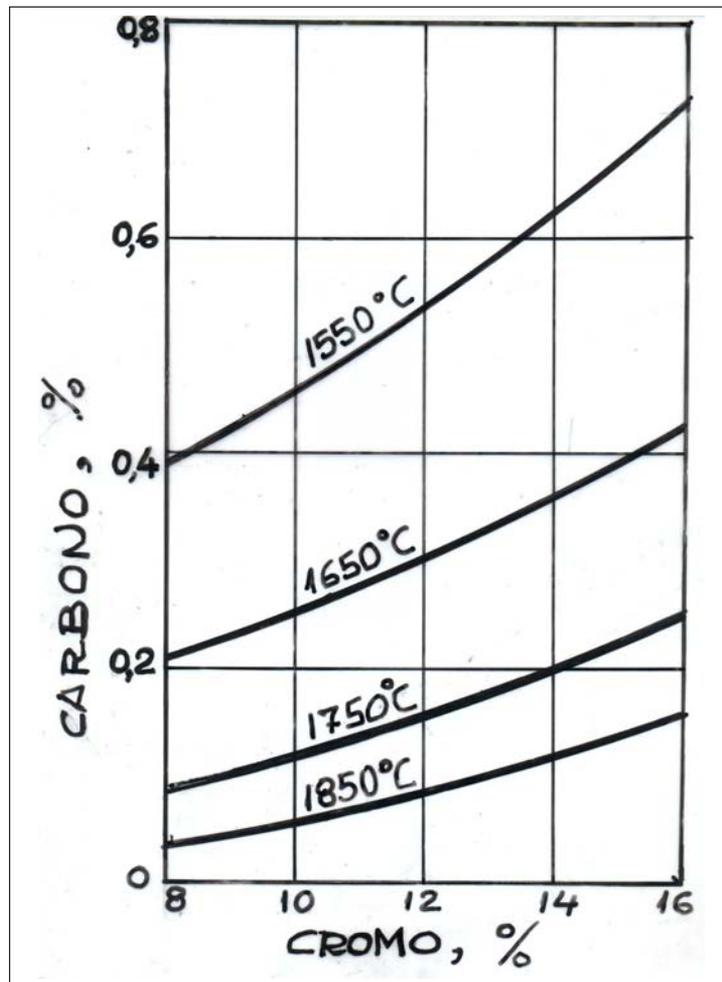


Figura 4.10: Influencia del cromo y la temperatura sobre el carbono

$$\log \text{Si} - \frac{3}{2} \log \text{Cr} + \frac{1873}{T} (0,42\text{C} + 0,142\text{Si} - 0,01\text{Cr} + 0,014\text{Ni}) - \log a_{\text{SiO}_2} + \frac{1}{2} \log a_{\text{Cr}_3\text{O}_4} + \frac{3050}{T} + 0,675 = 0 \quad (4.9)$$

Este equilibrio silicio-cromo, en dependencia del contenido de carbono del fundido, se expresa en las gráficas de la figura 4.11 para 1550 ° C y 1850 ° C, respectivamente. Un descenso de la temperatura, asociado a un aumento de la basicidad de la escoria, desplaza el equilibrio hacia valores más elevados de cromo.

3) Equilibrio carbono-silicio

Este equilibrio viene expresado mediante las ecuaciones:



$$\log K = -\frac{26960}{T} + 15,11 \quad (4.11)$$

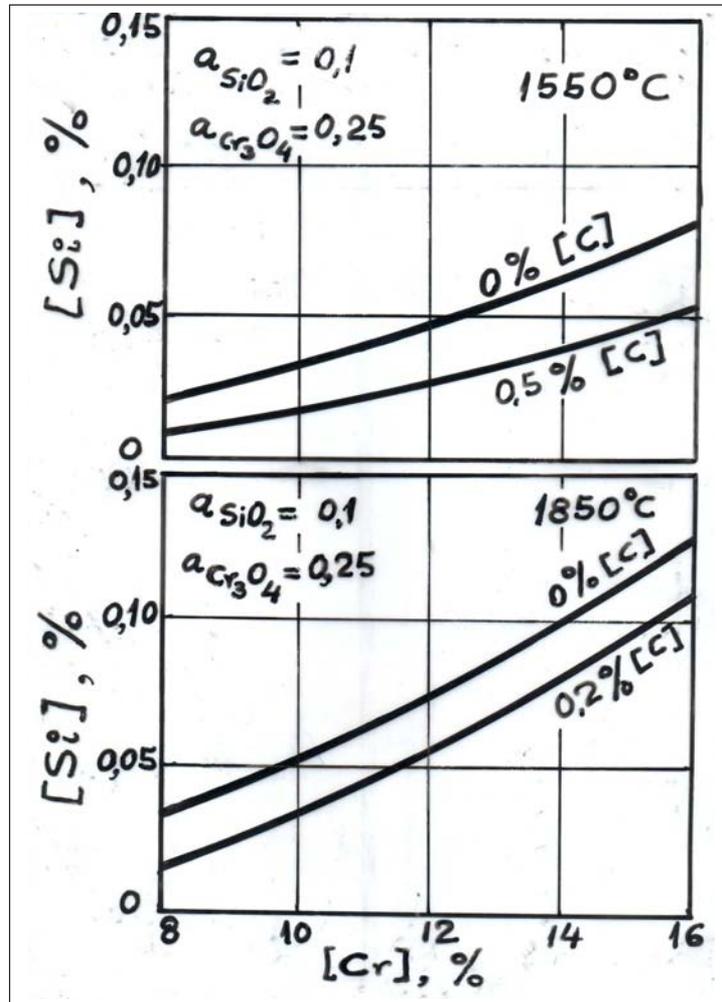


Figura 4.11: Influencia del carbono y temperatura sobre el equilibrio Si-Cr

Para empleo en ordenador se deduce la siguiente ecuación:

$$\log Si - 2 \log C - \frac{1873}{T} (-0,20C - 0,105Si + 0,038Cr - 0,016Ni) +$$

$$+ 2 \log P_{CO} - \log a_{SiO_2} + \frac{26960}{T} - 15,11 = 0 \quad (4.12)$$

El equilibrio carbono-silicio, tal como se calcula mediante la ecuación 4.12, se representa en la figura 4.12 para 1600 °C y 1700 °C, asumiendo que la actividad de la SiO₂ es 0,1 y que la presión parcial del CO es 1 bar. Puede observarse que el aumento de la temperatura y descenso del contenido de cromo desplazan el equilibrio hacia contenidos más elevados de silicio.

Resumiendo; aunque se ha estudiado el período oxidante de la fusión de acero inoxidable en un intento de mejora de la práctica operativa de horno de arco, las ecuaciones deducidas pueden emplearse también, por supuesto, en Metalurgia Secundaria.

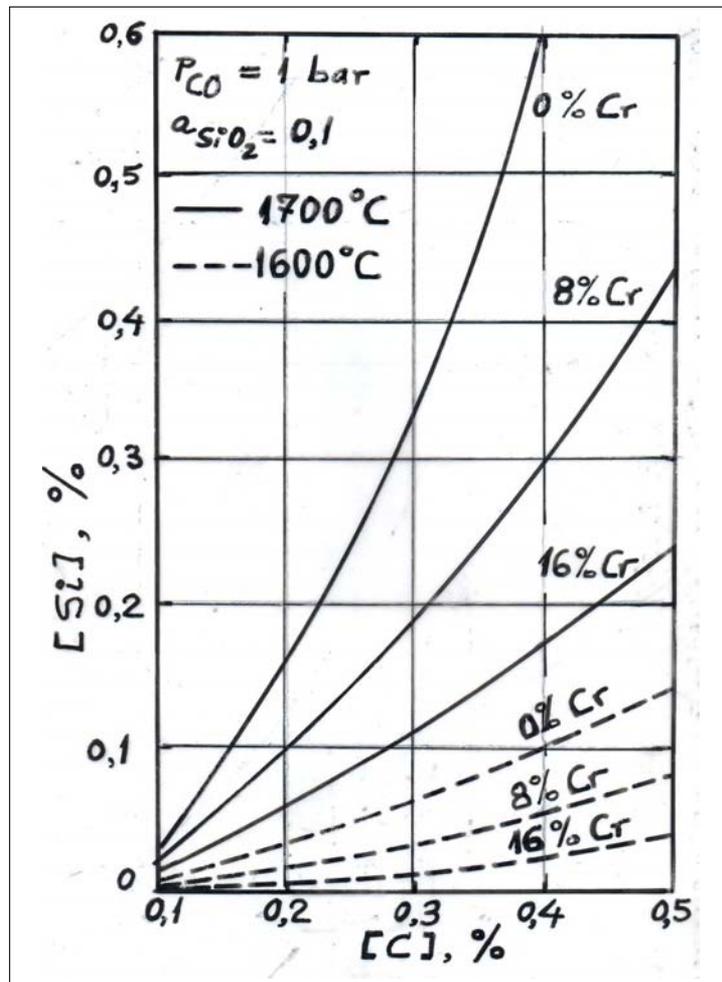


Figura 4.12: Equilibrio carbono-silicio

En la figura 4.13 se comparan los potenciales de operación del horno de arco, AOD y VOD. En ella se dan los contenidos de carbono alcanzables en baños que contienen, respectivamente, 10, 16 y 18% de cromo, en función de la temperatura al final del soplado de oxígeno. A pesar del hecho de necesitarse datos empíricos y termodinámicos mucho más extensos y accesibles para el control del proceso, el método propuesto y las relaciones obtenidas hacen posible la predicción del contenido de cromo del fundido al final del soplado. Los resultados obtenidos pueden considerarse como contribución a la obtención de unas bases racionales de elaboración de prácticas óptimas.

4.7. Desulfuración

Cuando el acero se produce a gran escala el contenido de azufre solamente se puede reducir de forma limitada. Por ejemplo, en el proceso de horno alto sólo se puede realizar económicamente una desulfuración modesta, tras la cual se lleva a cabo una desulfuración externa (figura 4.14) previa a la transferencia del arrabio al convertidor. Para obtener aceros de contenido de azufre extremadamente bajo

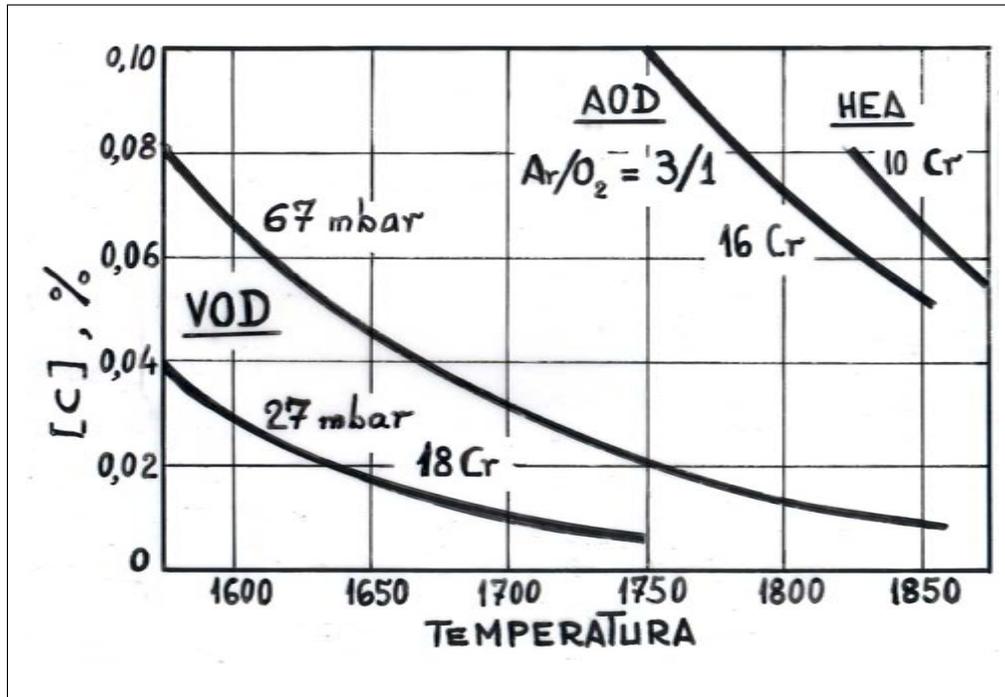


Figura 4.13: Comparación de potenciales operativos de HEA, AOD y VOD

es necesario desulfurar nuevamente el acero en la fase de Metalurgia Secundaria. Lo mismo ocurre en el proceso de horno de arco, ya que la chatarra suele contener cantidades importantes de azufre. La práctica normal es colar el acero líquido del horno eléctrico sin desulfurar y realizar la desulfuración en el horno-cuchara.

El método básico consiste en añadir elementos que tienen gran afinidad por el azufre, normalmente cal o compuestos de calcio, aunque en ocasiones también se utilizan otras tierras alcalinas. Durante este proceso de afinado en el que se trata de conseguir contenidos de azufre del orden de 0,010 % e incluso inferiores, se eliminan también otras impurezas del acero.

La desulfuración se realiza hoy día casi exclusivamente usando la instalación de horno-cuchara, con caldeo eléctrico mediante tres electrodos, para lo cual la cuchara se coloca debajo de una bóveda parecida a la del horno eléctrico de arco, aunque más pequeña, dotada de tres electrodos que permiten calentar el baño de acero. Simultáneamente se realiza la agitación, mediante la inyección a través de tapón poroso de gas argón que permite incrementar las reacciones químicas entre la escoria y el baño de acero.

La desulfuración también se puede realizar durante el vacío, y de hecho los aceristas que tienen instalaciones combinadas de horno cuchara y vacío realizan la desulfuración en el calentamiento y el proceso de desulfuración se completa hasta valores muy bajos durante la operación de vacío. La desulfuración con calcio provoca la formación de productos esféricos de los compuestos de azufre, que en ocasiones son de interesante aplicación para ciertos tipos de aceros.

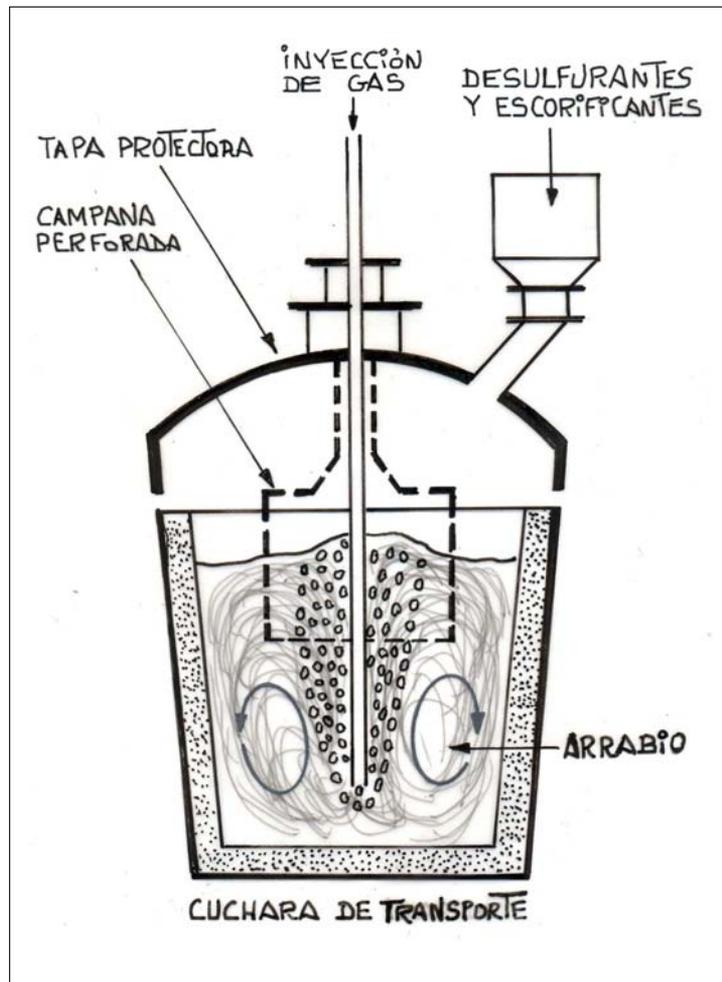


Figura 4.14: Desulfuración de arrabio con gas natural, para agitar y reducir.

Teniendo en cuenta que en el acero el azufre está en forma pirítica, es decir, como sulfuro, la reacción típica de desulfuración es:



La constante de equilibrio de esa reacción es:

$$K = \frac{(\text{CaS}) \times [\text{FeO}]}{[\text{FeS}] \times (\text{CaO})}$$

Cuyo valor a 1600 °C es 4×10^{-2} , valor que decrece al aumentar la temperatura. En consecuencia, termodinámicamente hablando, la reacción se frenaría al crecer la temperatura. No obstante, consideraciones cinéticas hacen que la temperatura creciente favorezca el desarrollo de la reacción. Si se da por hecho que las actividades de la cal CaO y el sulfuro de cal CaS valen 1, la fórmula anterior quedaría como:

$$K_1 = \frac{[\text{FeO}]}{[\text{FeS}]}$$

Esto indica que desulfuración implica la necesidad simultánea de desoxidación a fin de que el sentido de esa reacción se desplace plenamente hacia la derecha. Las figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 muestran gráficamente la influencia de diversos elementos sobre la concentración de oxígeno y, en consecuencia, de azufre, en el baño de acero.

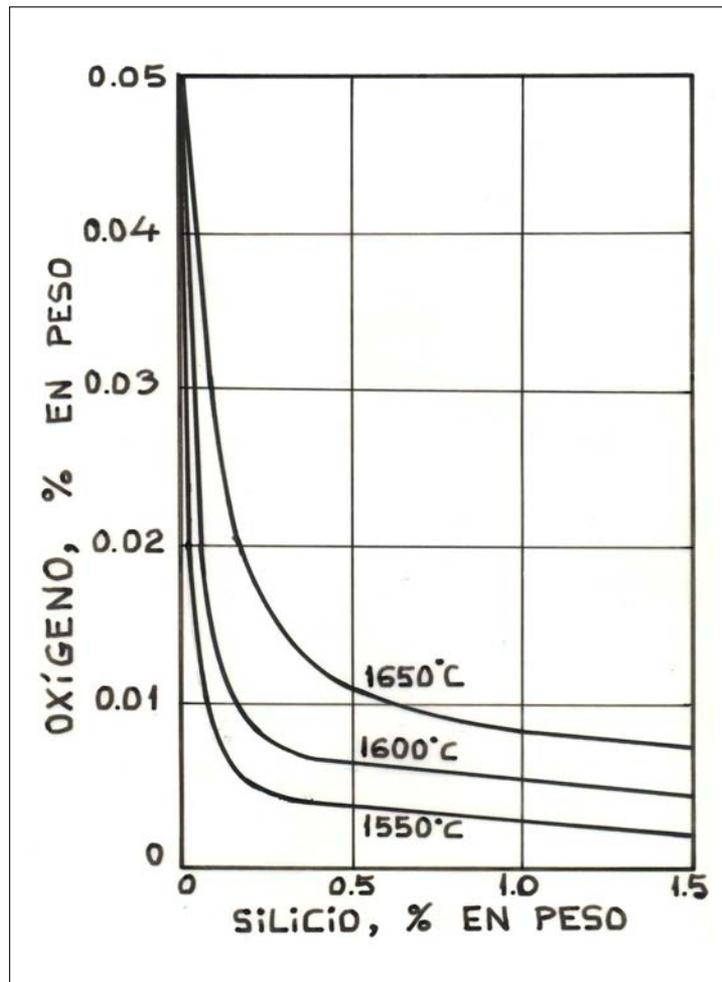
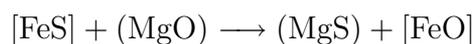


Figura 4.15: Contenidos de silicio y oxígeno en equilibrio, dentro del hierro, con sílice sólida.

El contenido final de azufre en el baño de acero depende de las cantidades relativas de escoria y metal así como del contenido inicial de azufre, pudiendo llegar a alcanzar contenidos de azufre tan bajos como 0,001 %. Puede también asumirse que para ello se precisa alcanzar suficiente contacto entre metal y escoria, así como evitar la entrada de fuentes inesperadas de oxígeno.

El magnesio ejerce una acción ligeramente diferente. Se ha empleado magnesio y mezclas de Mg y CaO para desulfuración de acero, pero el equilibrio MgS-MgO es menos favorable que el CaS-CaO. La reacción es ahora:



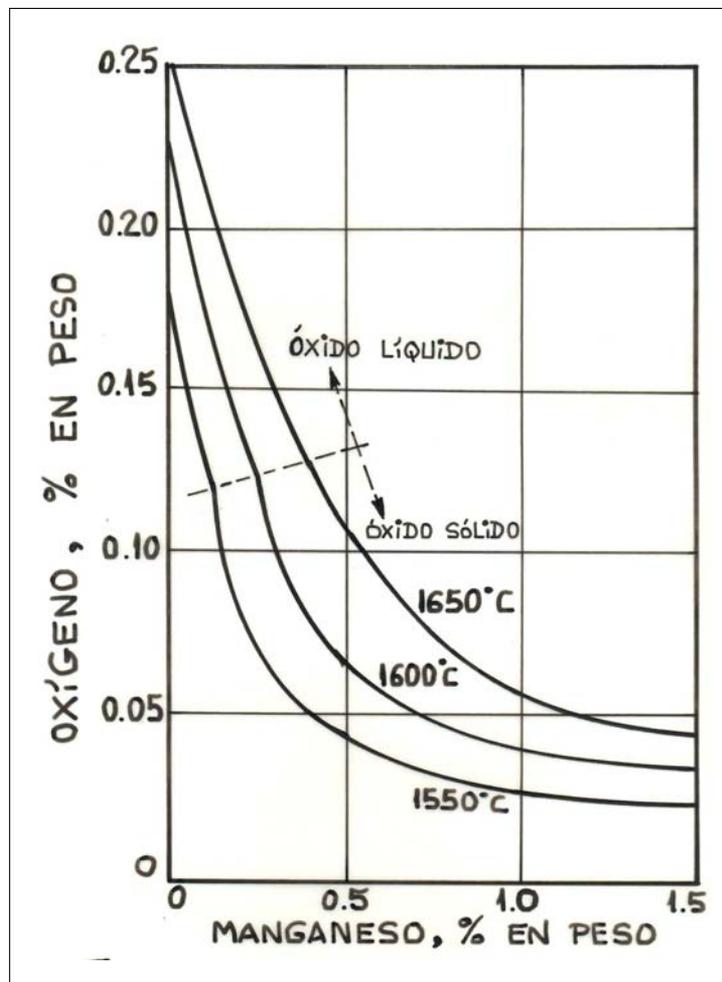


Figura 4.16: Contenidos de manganeso y oxígeno en equilibrio, dentro del hierro, con solución sólida o líquida FeO-MnO.

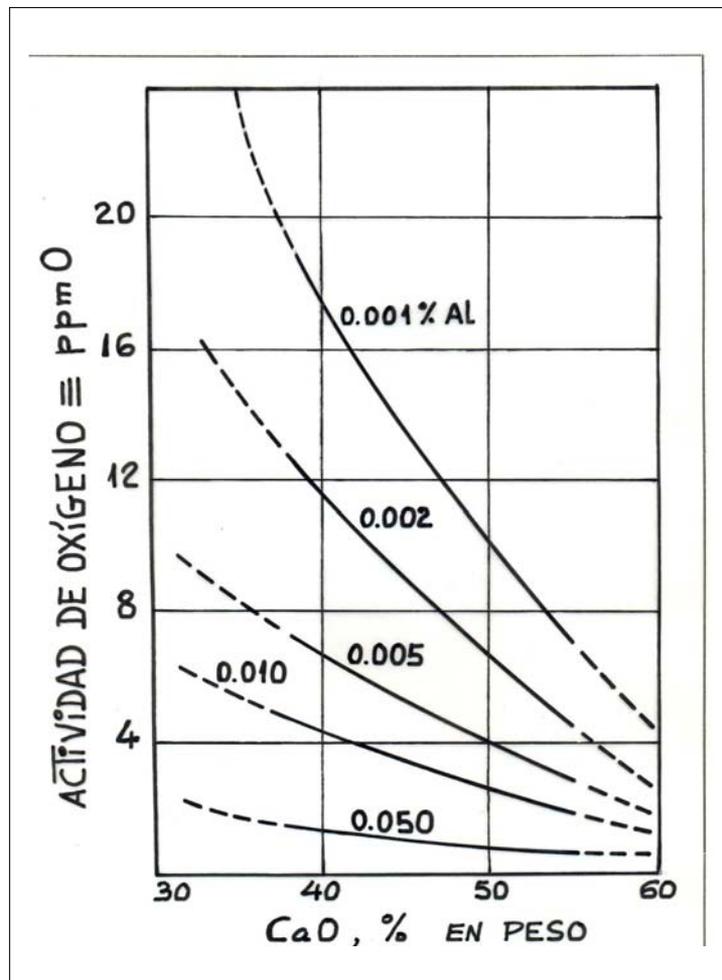


Figura 4.17: Actividad del oxígeno en las aleaciones Fe-Al en equilibrio con escoria $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ a 1600° .

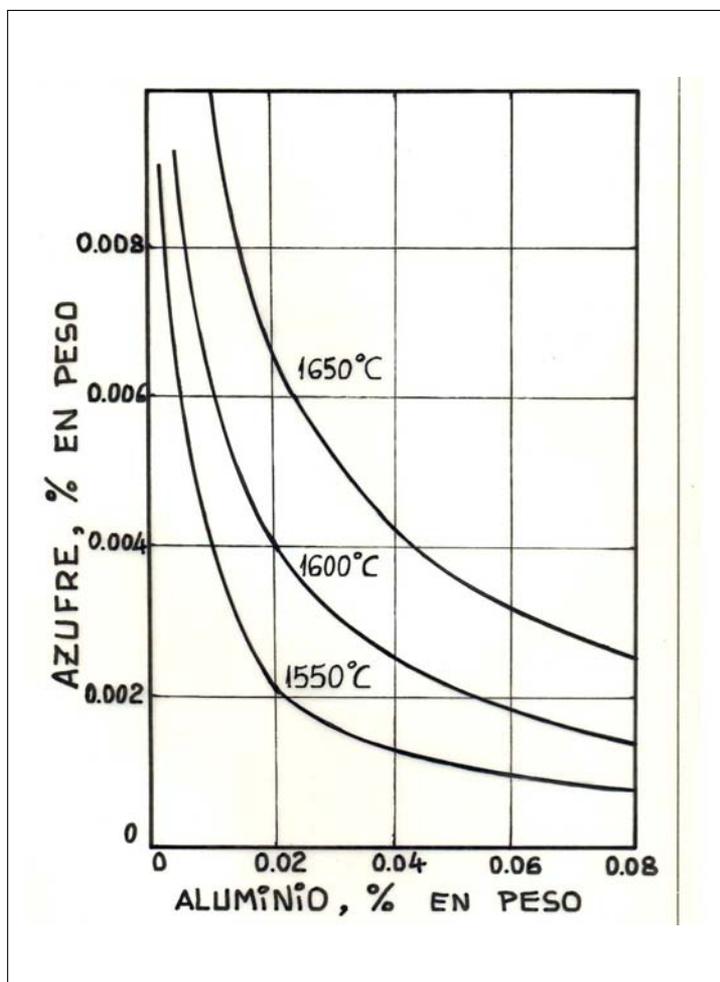


Figura 4.18: Contenidos de S y Al de acero en equilibrio con aluminato cálcico saturado en CaS y CaO.

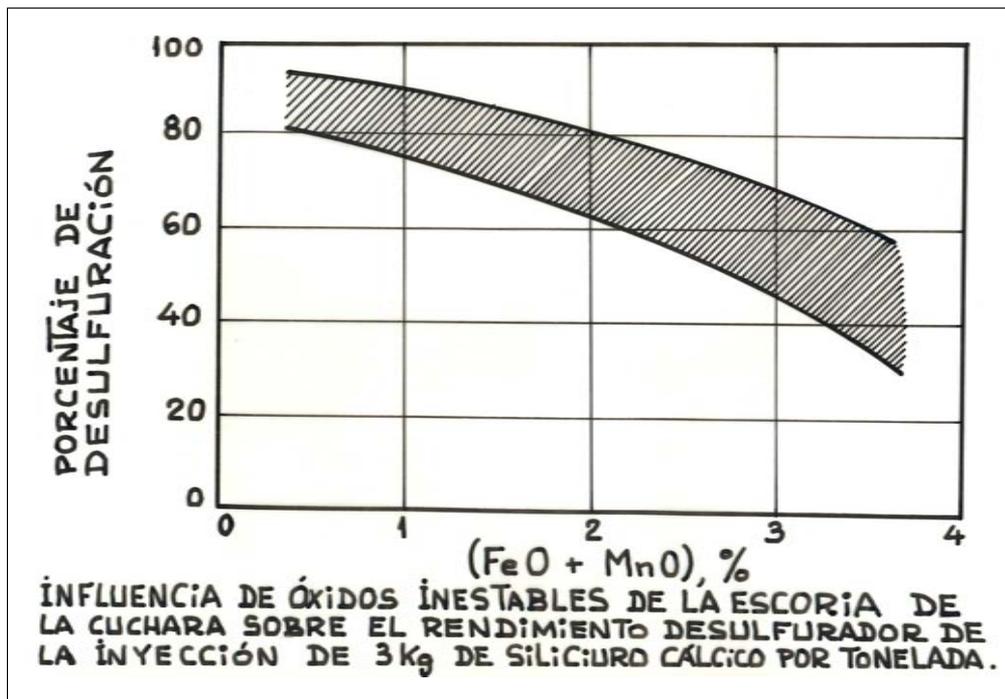


Figura 4.19: Influencia de óxidos inestables.

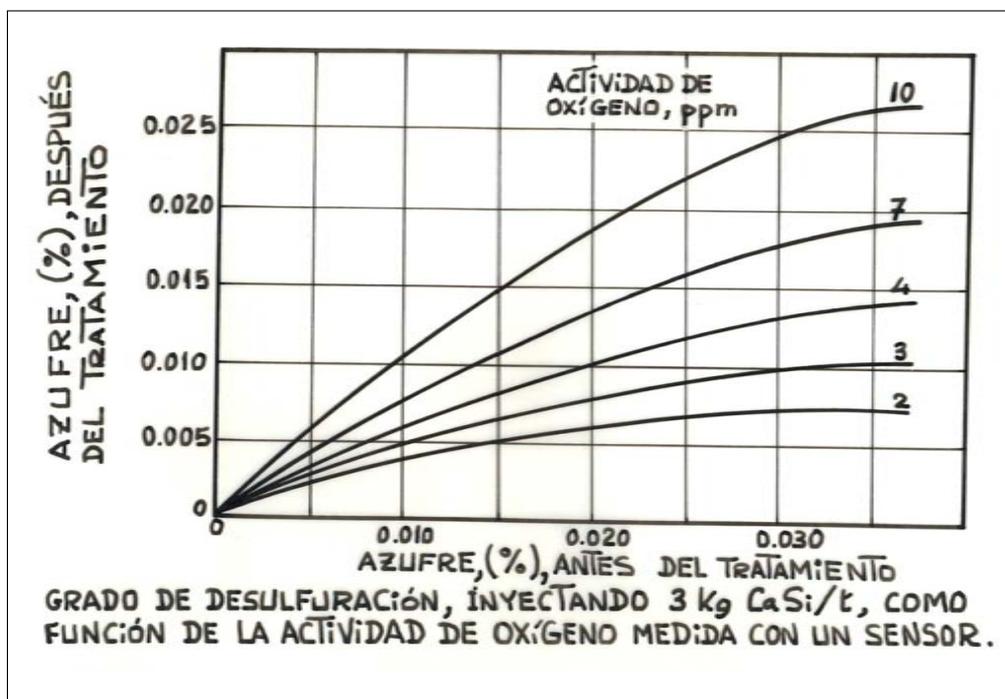


Figura 4.20: Grado de desulfuración.

Si las actividades de MgO y MgS se consideran unidad el valor de la constante de equilibrio es bastante menor que con CaO, lo que indica que la desulfuración de baños de acero basada en magnesio sólo es viable para actividades muy bajas de oxígeno. De ahí su empleo en la desulfuración del arrabio de horno alto, con el que se trabaja a menor temperatura y con potenciales de oxígeno bastante más bajos.

4.8. Modificación de inclusiones

Las inclusiones no metálicas suelen ser de gran dureza, lo que provoca efectos de entalla, fragilidad, pérdida de tenacidad y problemas en la laminación, entre otros. Algunos procesos permiten llegar a una eliminación casi total de las inclusiones formadas en un baño de acero, pero la mayoría de los procedimientos dejan sin resolver satisfactoriamente el problema de la flotación y eliminación de inclusiones.

Una solución alternativa radica en la modificación de la composición y morfología de las inclusiones a fin de que sus efectos sean menos deletéreos para las propiedades y calidad del acero. Los procesos atmosféricos, tanto sin caldeo adicional como con caldeo, están especialmente adaptados para la modificación de las inclusiones, especialmente los que comportan operaciones de inyección.

4.8.1. Control de óxidos

En muchos casos es conveniente modificar la forma de las inclusiones de óxidos. Así, la conversión de inclusiones de alúmina en aluminatos de calcio para mejorar la calidad superficial de los aceros y evitar la obstrucción de buzas en la colada continua. La figura 4.22 muestra la forma y tratamiento de las inclusiones que se forman normalmente en los aceros calmados con aluminio. Si hay Al_2O_3 presente, durante la laminación las dendritas se romperán, dando por resultado la aparición de una inclusión alargada que originaría un serio defecto superficial. En este sentido, es más favorable la formación de aluminato cálcico.

La alúmina está sólida a la temperatura del caldo en colada continua, en cuyas buzas se acumula produciendo obstrucciones. Faulring y otros investigadores han visto que si se forman aluminatos cálcicos líquidos este problema no tiene lugar. Por ello es conveniente que se forme aluminato cálcico que es líquido a las temperaturas de colada. Estas inclusiones son ricas en CaO y se forman con mayor facilidad si se añade al acero calcio puro o una aleación de calcio.

4.8.2. Efecto del calcio en los aceros

El calcio, cuando se añade a un acero calmado al aluminio, puede modificar las inclusiones de óxidos, desulfurar y controlar la forma de sulfuros. Es importante considerar cuáles son las reacciones termodinámicamente preferidas.

En un acero normal calmado al aluminio el calcio comenzará modificando las inclusiones de óxidos. Es termodinámicamente fácil que se formen inclusiones tipo $(\text{CaO})(2\text{Al}_2\text{O}_3)$. Éstas se convertirán en $(\text{CaO})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ y, finalmente, en aluminatos de calcio líquido ricos en CaO. Después, el calcio desulfurará al acero hasta niveles muy bajos. El control efectivo de la forma de sulfuro y la eliminación de la mayor parte del MnS se darán sólo cuando el contenido de azufre quede por debajo de 0,005 %.

Si se añade calcio a aceros resulfurados es posible que el calcio reaccione con azufre para formar CaS antes que haya un control completo de la forma del óxido. Se formará el tipo $(\text{CaO})(2\text{Al}_2\text{O}_3)$ y el CaS puede ser más estable que el Ca o las inclusiones líquidas. El CaS puede estar en solución con Mn en cuyo caso su actividad se ve reducida. En consecuencia, puede formarse una inclusión CaS-MnS a niveles menores de Al y S.

4.8.3. Control de forma de sulfuros

Se ha escrito mucho sobre el control de forma de los sulfuros y su influencia sobre las propiedades. Este tema se ha revisado extensamente en tiempo reciente. En resumen, si un acero se desoxida fuertemente y los niveles de manganeso y azufre son los que se encuentran normalmente, se formarán inclusiones de MnS. Estos sulfuros de manganeso tienen un punto de fusión bajo y se alargan en la dirección de laminación durante el laminado en caliente dando lugar a las inclusiones llamadas «en rosario». Estas inclusiones reducen fuertemente las propiedades mecánicas transversales del acero. Por ejemplo, la ductilidad y la energía necesaria para causar fractura se reducen grandemente cuando este tipo de inclusiones está presente. Por tanto, para aplicaciones críticas estas inclusiones tipo rosario deben ser eliminadas.

Es importante comprender porqué se forma MnS y porqué se forma en los bordes de grano. Cálculos termodinámicos indican que para que se forme MnS debe cumplirse que a las temperaturas de solidificación

$$(\% \text{Mn}) \times (\% \text{S}) > 2$$

Para la mayoría de los aceros los niveles de Mn y S no son suficientemente altos como para formar MnS en la masa de líquido. Sin embargo, cuando solidifica el acero el Mn y el S son rechazados del acero líquido dando lugar a un aumento de su concentración en el líquido remanente; este fenómeno recibe el nombre de enriquecimiento interdendrítico. Este líquido interdendrítico aumenta sus contenidos de Mn y S, y llegando al final de la solidificación se forma el MnS.

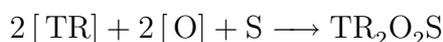
Hay dos métodos comunes de conseguir controlar la forma de los sulfuros. y es la adición de calcio o elementos de las tierras raras. En ambos casos es necesario desulfurar previamente el acero como mínimo hasta 0,008 % y, preferiblemente, hasta 0,006 %. Cuando se adiciona calcio a un acero calmado al aluminio primero se convierten las inclusiones de alúmina en aluminatos de calcio. Si el aluminato de calcio que se forma es muy rico en CaO, la inclusión tiene una gran capacidad de

sulfuro y puede absorber cantidades significativas de azufre. Como se sabe, la concentración de equilibrio de azufre en inclusiones ricas en CaO puede ser muy grande y absorber la mayor parte del azufre remanente después de la desulfuración.

Cuando se enfría el acero la solubilidad del azufre en la inclusión decrece y precipita el CaS, resultando en una inclusión dúplex en la que un anillo de CaS rodea el núcleo de aluminato de calcio, tal como se ve en la figura 4.22. Este calcio remanente puede reaccionar con azufre en la superficie del aluminato de calcio formando una inclusión tipo dúplex. Sin embargo, la solubilidad del calcio en los aceros que contienen oxígeno y azufre es muy baja y la contribución de esta fuente es pequeña. Este tipo de inclusión es esférica, y debido a su elevado punto de fusión no se alarga durante la laminación en caliente.

No siempre es necesario eliminar completamente el Mn de los sulfuros. La adición de algo de CaS y MnS aumenta significativamente la dureza de la inclusión a temperatura alta. Por ejemplo. La adición de 10 moles de CaS por ciento al MnS aumenta por 10 la dureza a 600 °C. Estas inclusiones no se alargarán durante la laminación en caliente.

Cuando se adicionan tierras raras (TR) al acero para formar un óxido, sulfuro o un oxisulfuro:



El cerio es el elemento más abundante en las tierras raras y su química es similar a la de los otros. Si se emplean correctamente tierras raras para control de forma de sulfuros en el enfriamiento se forman continuamente oxisulfuros ($\text{TR}_2\text{O}_2\text{S}$) en una fina dispersión de inclusiones esféricas no deformables que no se alargan durante la laminación. El empleo de las tierras raras se discutirá con mayor amplitud más tarde.

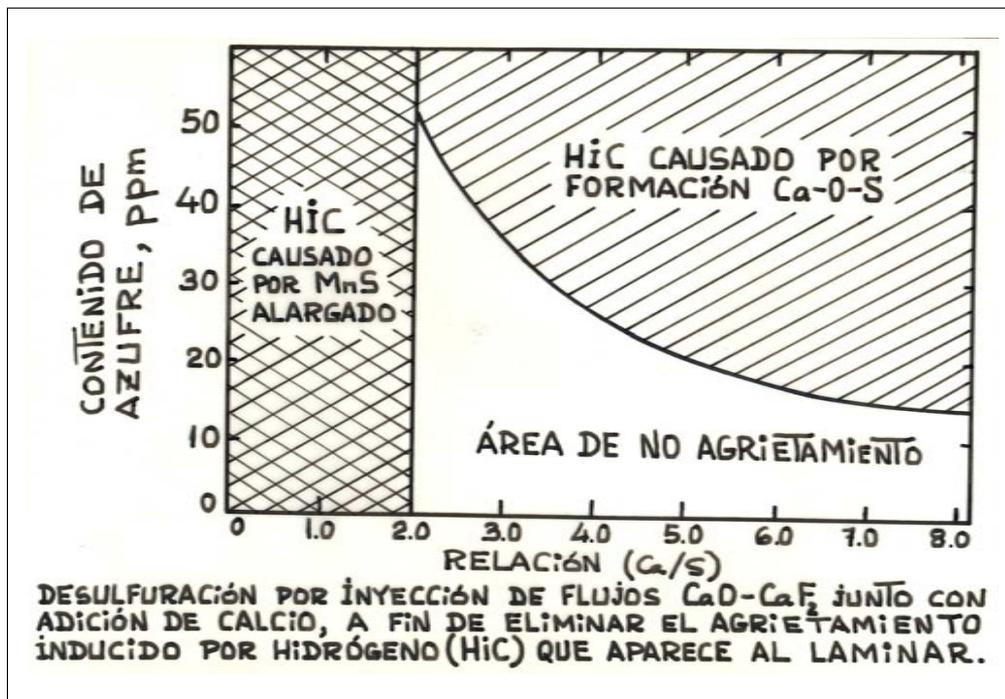


Figura 4.21: Desulfuración por inyección de flujos.

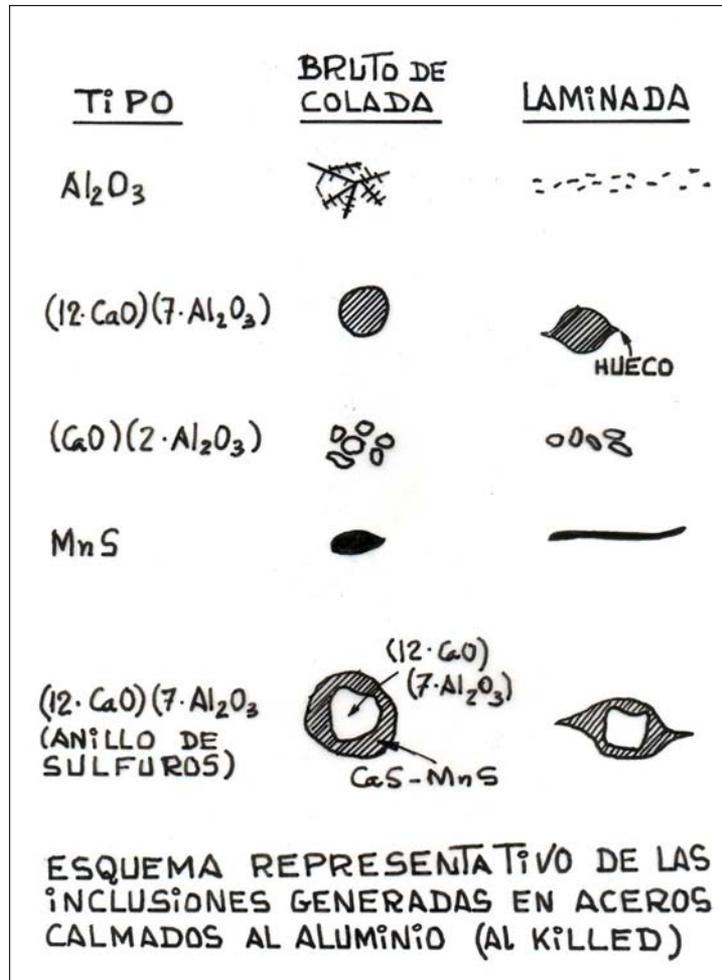


Figura 4.22: Inclusiones.

Capítulo 5

PROCESOS VACÍO SIN APORTACIÓN TÉRMICA

Ha de tenerse en cuenta que todos los procesos metalúrgicos basados en el empleo de vacío no han podido desarrollarse mientras no hubo bombas de vacío adecuadas a los volúmenes a tratar. Hacia 1930, el profesor Korbers, de la fábrica checa Skôda, hizo experimentos de vacío. Sin embargo, aquellas bombas giratorias tipo Gaede no tenían capacidad suficiente y, por otra parte, perdían toda su eficiencia al atrapar partículas de polvo, escoria o metal entre sus elementos móviles. Hacia 1951 se desarrollaron las bombas de vacío por eyectores de vapor que, además de su gran potencia de absorción, presentaban la importante ventaja de carecer de elementos móviles que se pudieran averiar.

A continuación se revisan los procesos de desgasificado en vacío más empleados. Aunque ya se han enlistado anteriormente, los más usuales son:

- Desgasificación estática.
- Desgasificación en chorro.
- Método de elevación intermitente.
- Método de elevación y circulación.

5.1. Desgasificación estática en cuchara (Vacuum Degassing VD)

Es el sistema más sencillo y que primero se empleó. La cuchara llenada en el horno se introduce en una cámara en la que se hace el vacío de unos 30 torr durante 10 minutos. Se origina una ebullición violenta que eleva el nivel del acero en la cuchara 300 o 400 mm de altura, por lo que es obligatorio emplear cucharas relativamente altas.

Previamente al desgasificado hay que eliminar de la cuchara toda la escoria posible para que cuando se haga el vacío el acero esté recubierto por una capa muy

delgada de escoria que no dificulte el escape de los gases.

Este método estático tiene cuatro desventajas principales:

- El derrame producido por el violento desprendimiento de gases antes citado.
- La presión ferrostática impide la formación de burbujas, excepto cerca de la superficie, y de aquí que sólo se desgasifique el metal inmediatamente debajo de ésta.
- El proceso debe ser corto para evitar excesiva pérdida de temperatura que dificultaría la colada posterior de moldes, lingoteras o colada continua.
- La debilidad de la difusión y convección impide alcanzar una buena homogeneización del metal.

Con el fin de paliar estas dificultades, especialmente la segunda y cuarta, se han puesto a punto varios sistemas de agitación del metal líquido. La primera es la introducción forzada, a través de tapón poroso (figura 5.1) o lanza de inmersión, de un gas inerte que elimina los gases en solución por un efecto mecánico de barrido. La máxima purificación tiene lugar en los primeros cinco minutos, pero los aceros calmados requieren por lo menos seis minutos para alcanzar una efectiva desgasificación.

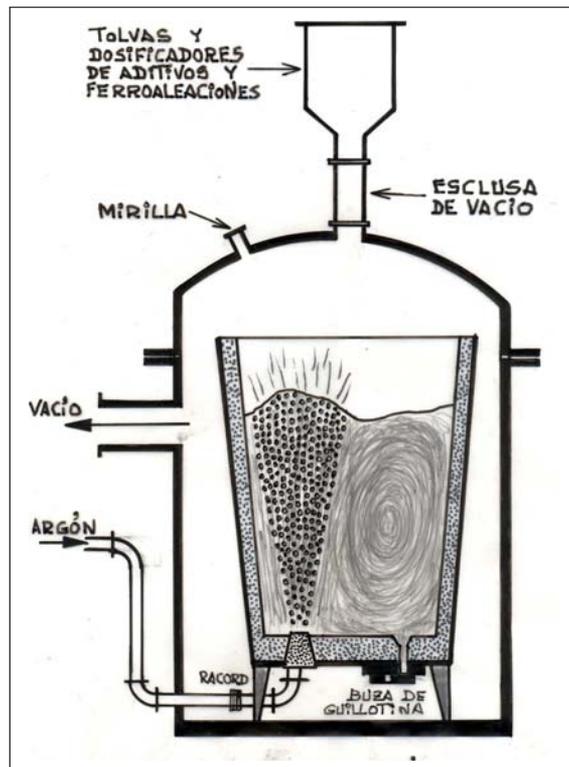


Figura 5.1: Desgasificado estático en cámara de vacío con barboteo de argón

La inducción electromagnética es otro procedimiento de agitación ideado por Hammarlund y llevado a la práctica por Harper. Este sistema sustituye la cuchara

por un horno de inducción sobre el cual se vierte el acero procedente del horno de arco o convertidor. Una bobina de inducción rodea el crisol de aquél y produce corrientes de convección en el baño que facilitan su desgasificación.

Este sistema inductivo tiene inconvenientes. En primer lugar es caro de instalación y engorroso de operación. Por otra parte, está restringido a tratamiento de cantidades pequeñas de acero. Hoy día sólo existe el sistema de agitación por gas a través de tapón poroso.

Si se analizan los gases de salida en la desgasificación se deducen conclusiones interesantes. Si lo que se desgasifica es un acero sin desoxidar (oxidado, no calmado) el monóxido de carbono representa un 83% del total de gases desprendidos. Si el acero a desgasificar se ha calmado previamente (5.2) el CO sólo representa el 33%, siendo 39% el hidrógeno, 25% el nitrógeno y 3% el CO_2 .

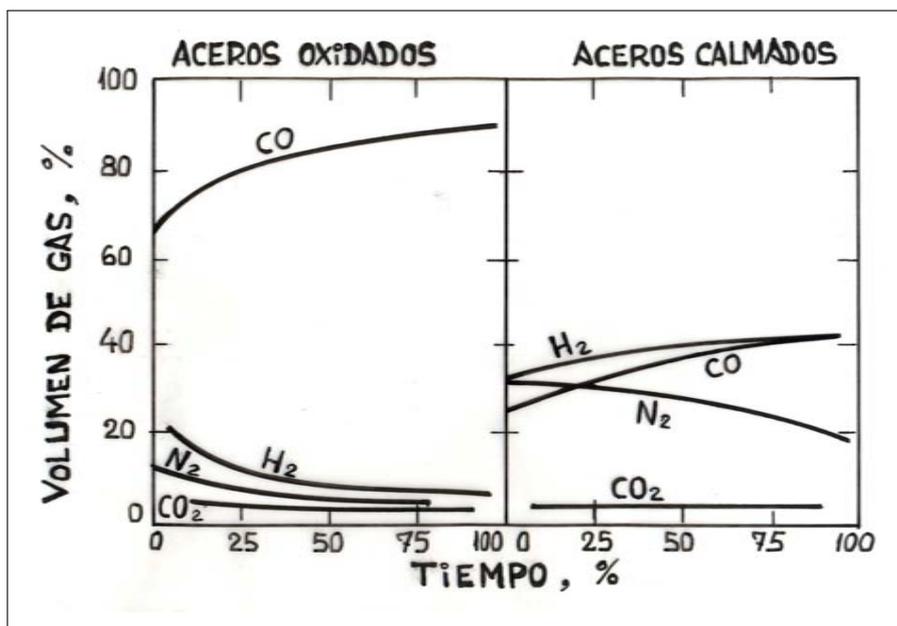


Figura 5.2: Composición de los gases en la desgasificación del acero

Esto tiene una explicación lógica, que ya se ha tratado anteriormente. El acero calmado tiene gran parte de su oxígeno fijado como óxidos de manganeso, silicio y aluminio, quedando poco oxígeno para dar CO con el carbono. Esos óxidos son fases sólidas y forman inclusiones no metálicas difíciles de eliminar en el desgasificado.

5.2. Desgasificación en chorro (Bochümer Verein AG, BV)

Al término de la Segunda Guerra Mundial se comenzó a experimentar en este sentido, que se proyectó para el colado de grandes lingotes en cámara cerrada, inicialmente para evitar «copos» en grandes piezas forjadas, aunque posteriormente se ha adoptado el procedimiento de desgasificación en cuchara cerrada, que lleva un

recipiente en la tapa en forma de pequeña cuchara que recibe el acero al bascular el horno sobre ella.

El peligro de defectos de hidrógeno en lingotes de acero aumenta con la sección y peso de los mismos. Estos lingotes de gran tamaño son, precisamente, los destinados a la obtención por forja de grandes piezas de alta responsabilidad. No sólo es necesario, en consecuencia, desgasificar, sino también evitar posterior contaminación del acero por los gases del aire mientras se cuela al molde o a la lingotera.

El fundamento del proceso es la desintegración espontánea que sufre un chorro de acero cuando es vertido a una cámara de vacío. La rapidísima formación de finísimas gotas de acero en el interior de la cámara de vacío facilita el inmediato desprendimiento de los gases. La gran superficie que representan las gotas de acero pulverizadas facilita mucho el desgasificado.

Todos estos métodos se basan en que el chorro de acero se fragmenta en pequeñas gotitas; cualquier burbuja de gas en una de estas gotitas necesita recorrer una distancia muy pequeña para liberarse, lo que garantiza la eficiencia del tratamiento. Los momentos en que puede realizarse el tratamiento son:

- Del horno a la cuchara, que actúa como cámara de vacío. La cuchara tiene una tapa con cierre hermético por medio de junta (figura 5.3). Esta tapa tiene una boca ancha que, por medio de una tubería fuerte pero flexible le comunica con el sistema extractor de vacío. En algunos casos puede tener también una tolva y esclusa para adición de escorificantes y ferroaleaciones. Sobre la tapa, y unida herméticamente a ella, hay una cuchara intermedia pequeña (cuchara "pony") en la cual vierte el horno la colada. En este sentido ha resultado muy favorable la sustitución de la buza-tapón con accionamiento por vástago y palanca por el sistema corredera-guillotina, ya que se simplifican extraordinariamente todos los equipos de aislamiento-vacío. La cuchara sirve como equipo desgasificador pero también realiza la colada de los moldes, lingoteras o máquina de colada continua.
- De la cuchara a otra cuchara, que servirá como de colada, emplazada en la cámara de vacío (figura 5.4). Esta cámara, además de la conexión a las bombas de vacío, tiene una tapa con mirillas de observación y control, así como otra abertura con las esclusas y dosificadores de adición de ferroaleaciones y escorificantes. Sobre la tapa, y con sistemas herméticos de sellado, se coloca la cuchara intermedia que se llenará con el caldo del horno. Esto implica un enfriamiento, que se ve en la gráfica de la figura 5.5.
- De la cuchara a una gran lingotera situada en una cámara idéntica a la descrita en el párrafo anterior (figura 5.6). Al entrar en la cámara de vacío el chorro de la cuchara superior se fragmenta y cae desgasificado en la lingotera. Este método permite obtener piezas forjadas de gran calidad y libres de cualquier defecto.

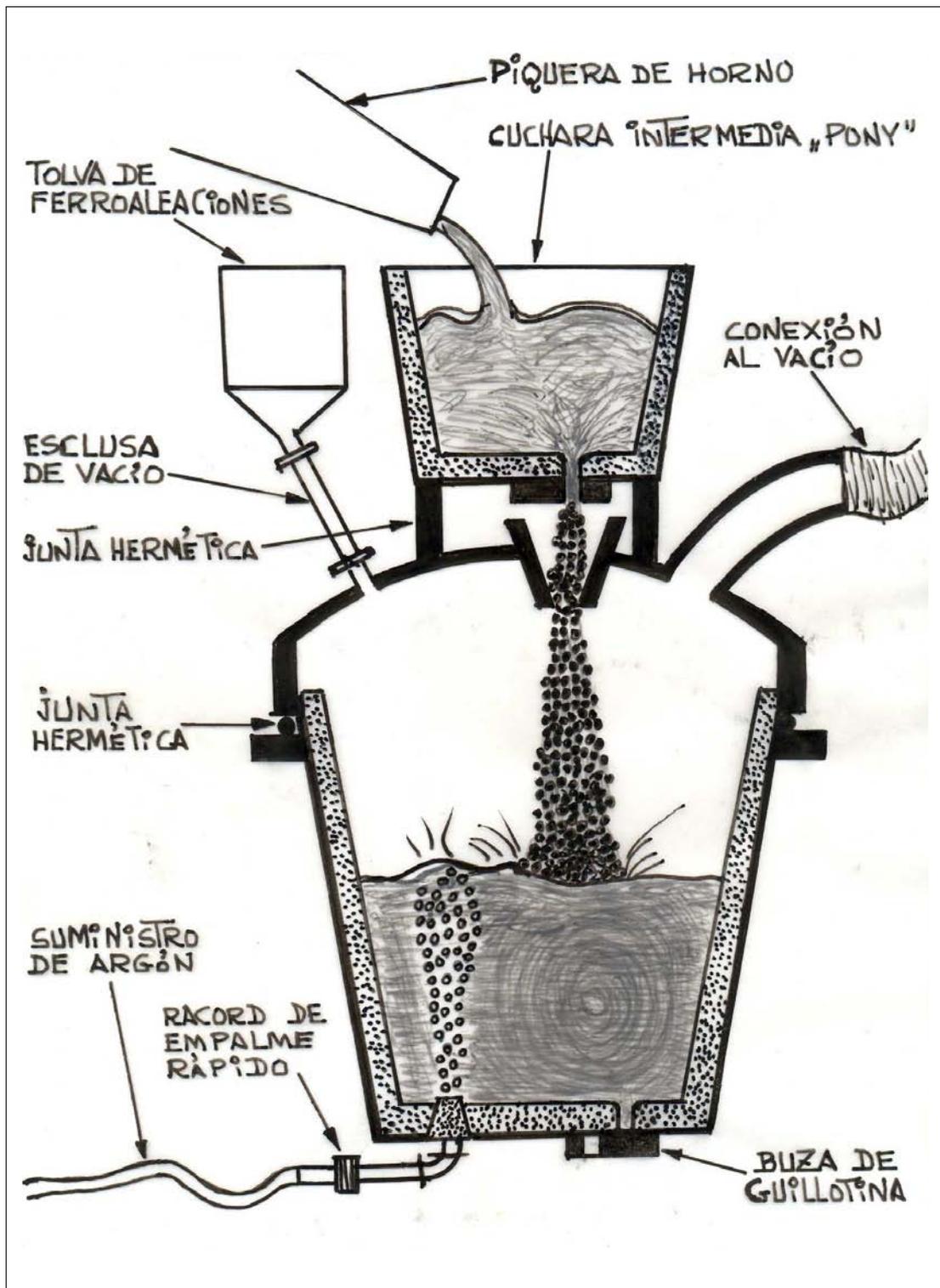


Figura 5.3: Desgasificación durante el llenado de la cuchara desde el horno

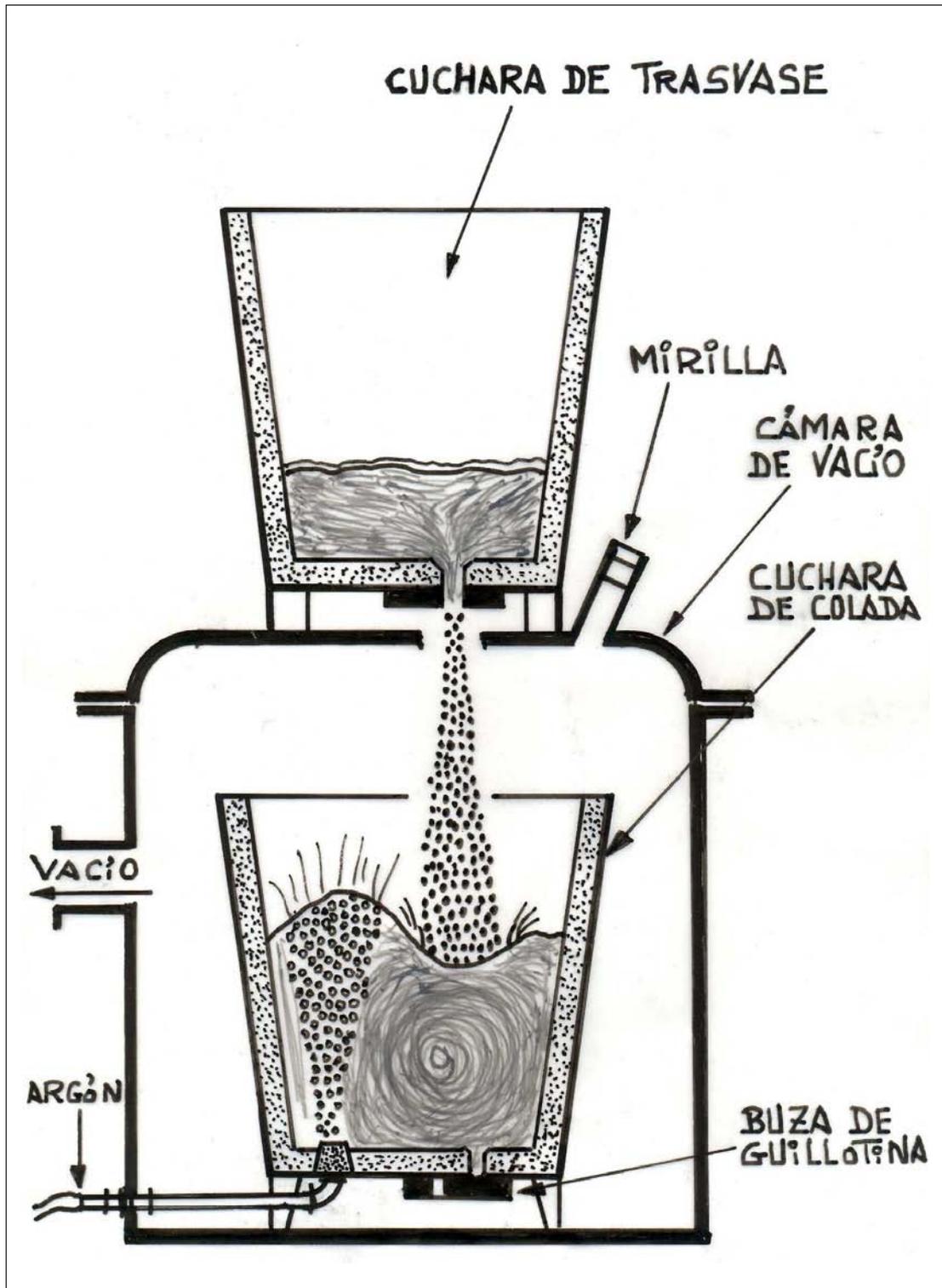


Figura 5.4: Desgasificado de cuchara a cuchara en cámara de vacío

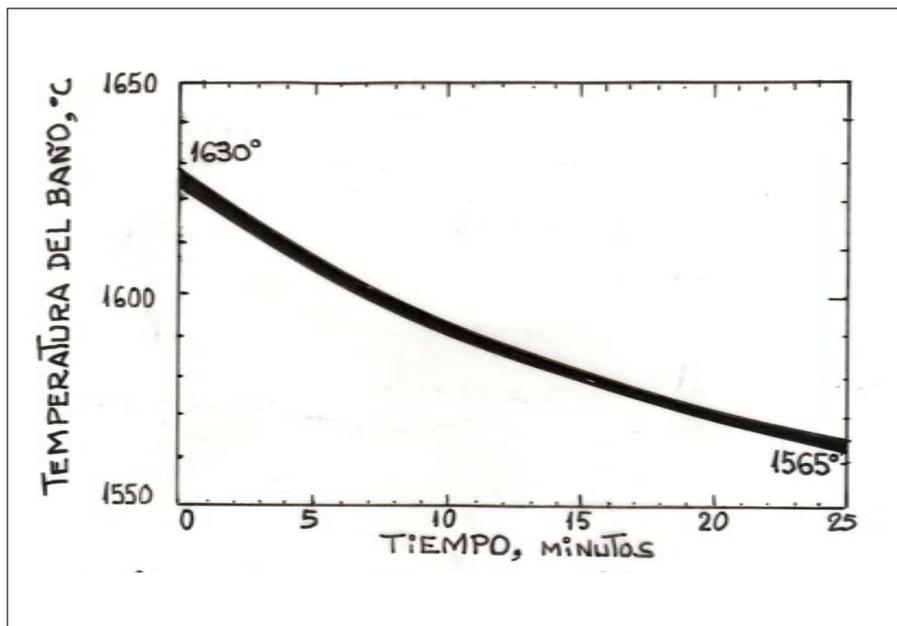


Figura 5.5: Enfriamiento del acero en función del tiempo en un desgasificado en el chorro de cuchara a cuchara

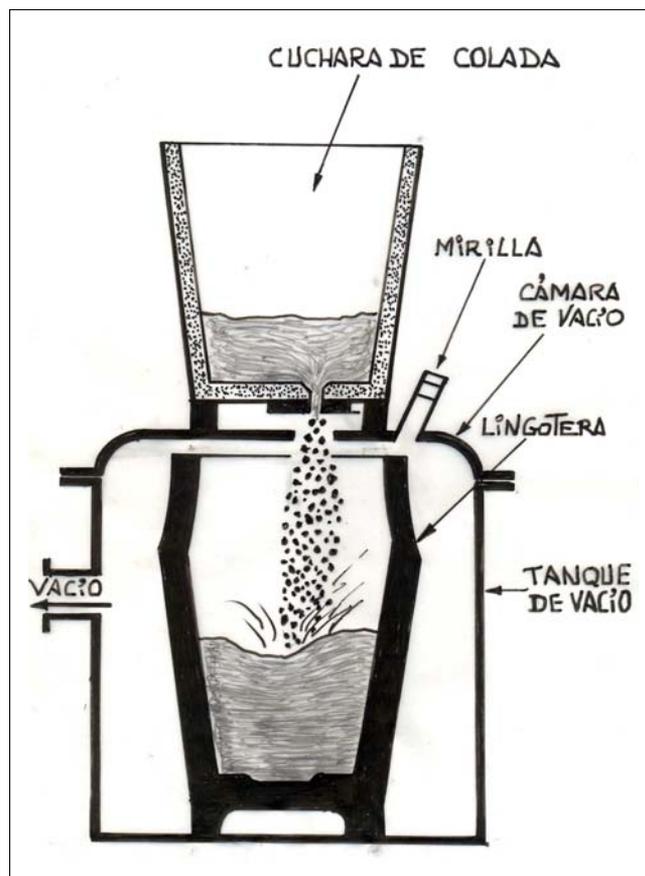


Figura 5.6: Colada en tanque de vacío de lingotes para grandes forjas

5.3. Elevación intermitente (Dortmund-Hörder Hüt- tenunion AG, DH)

Este procedimiento, como el RH que se verá después, se basa en tomar porciones de acero líquido, casi siempre oxidado, de la cuchara y someterlas a vacío hasta que toda la masa de acero contenida en la cuchara ha sido estadísticamente desgasificada. Se hace el vacío en un recipiente cilíndrico (figuras 5.7 y 5.8) del que sobresale un tubo en forma de trompa («snorkel») que se introduce por debajo de la línea de flotación de escoria de la cuchara de colada. Este tubo se equipa con una lámina protectora de aluminio para evitar entrada de escoria a la cámara de reacción en el momento de la inmersión.

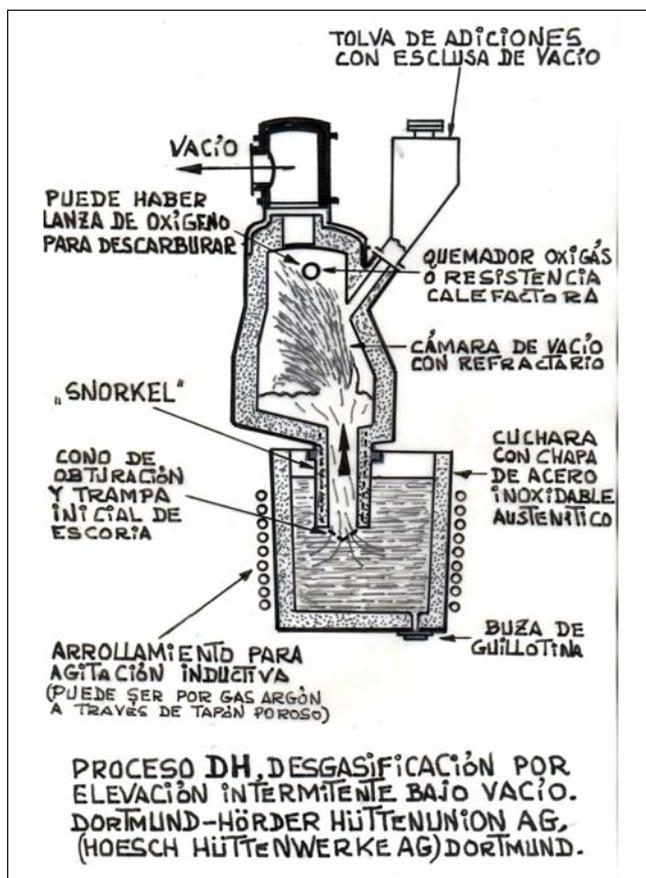


Figura 5.7: Proceso DH

5.3.1. Descripción del equipo DH

La parte fundamental es la cámara de reacción. Es un recipiente hermético revestido de refractario, la duración del cual suele ser de 1500 operaciones. Está conectado mediante una tubería de unos 500-600 mm de diámetro a bombas de vacío que trabajan mediante eyectores de vapor; se trata normalmente de bombas de 3 o 4 etapas que pueden llegar a conseguir vacíos de hasta 1 torr. A la salida del reactor DH se

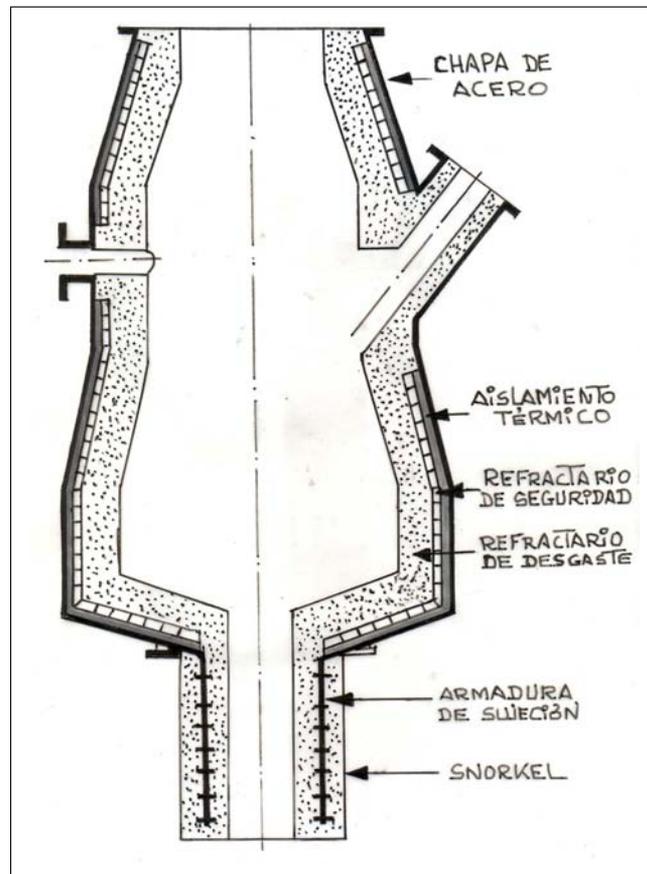


Figura 5.8: Revestimiento DH

instala un sistema enfriador de los gases de salida.

La cámara está conectada también a las tolvas y dosificadores automáticos mediante esclusas de presión. Cuenta con un sistema de calentamiento inicial que puede ser por electrodo calefactor, quemador de oxígeno o sistema aluminotérmico, aunque esta última alternativa ha de tomarse con precaución por el riesgo de inclusiones de alúmina. También hay un orificio para inyectar gases, especialmente oxígeno descarbonador.

En la parte inferior la cámara está unida a la trompa («snorkel»), que está también protegida por un revestimiento refractario cuya duración suele ser de unas 800 operaciones. Incrustado en el refractario de la trompa hay un armazón de hierro que le confiere resistencia mecánica. Al comenzar una operación se pone en el extremo del snorkel una tapa de chapa de aluminio para evitar la entrada de escoria en el momento en que el snorkel penetra en el acero líquido de la cuchara. Después esa chapa se funde y deja paso libre al acero.

Las cucharas tienen revestimiento básico para garantizar mejor calidad de producto obtenido y duración más larga. En el caso de tener agitación por gas tienen uno o más tapones porosos de inyección. Si la agitación es inductiva la chapa de la

cuchara ha de ser, lógicamente, de acero inoxidable austenítico amagnético.

5.3.2. Operación del equipo DH

La operación se inicia cuando el tubo de aspiración (snorkel), que sobresale por la parte inferior de la cámara de vacío, es introducido en el acero líquido que se encuentra en la cuchara. Si en esta primera fase del proceso la cuchara es fija (no sube ni baja), es la cámara de vacío la que se mueve con la grúa y sube o baja hasta colocarla en su lugar.

Inmediatamente después de introducir el tubo de aspiración en el acero de la cuchara se ponen en funcionamiento las bombas de vacío y, debido a la diferencia de presión que se alcanza entre la cámara de vacío y la atmósfera o ambiente exterior, el acero líquido sube a través del tubo de aspiración. Con un vacío de 1 torr se consigue elevar una columna de acero de una altura aproximada de 1,30 m.

Al entrar el acero en la cámara de vacío se puede observar una fuerte efervescencia con proyección de partículas de acero dentro de la cámara, y entonces se produce un fuerte desgasificado de las gotas emergentes. Cuando se ha dado por terminado el primer desgasificado del baño que se elevó a la cámara, se disminuye la intensidad del vacío, con lo que el acero cae de nuevo a la cuchara.

Una vez vaciada la cámara, se vuelve a repetir la operación y, entonces, la depresión aspira y eleva una nueva cantidad de acero líquido que se desgasifica inmediatamente. Se repite la operación unas 20 o 30 veces, consiguiéndose al final un grado de desgasificado muy aceptable. La permanencia del acero en la cámara de vacío dura unos 30 s. Cada vez pasa por la cámara un 15 %, aproximadamente, de la totalidad del baño; al final del proceso puede considerarse que todo el acero ha pasado 3 o 4 veces por la cámara de vacío.

Cifras típicas de resultados son, por ejemplo: El contenido de hidrógeno pasa de ser 4 cm³ por cada 100 g de acero a sólo 1,5 cm³. En cuanto al oxígeno, un acero de 0,45 % de carbono pasa de 0,010 % de oxígeno a 0,004 %, es decir, una merma del 60 %; en un acero de 0,20 % de carbono el descenso es desde 0,024 % a 0,006 %.

Durante la operación se observa que cada aspiración va acompañada de un violento desprendimiento gaseoso que provoca un cierto aumento de la presión, pero al paso del tiempo el contenido en gases baja progresivamente y al final no se observa prácticamente ningún desprendimiento gaseoso. El grado de vacío que se observa en cada ciclo es cada vez mayor (la presión es menor), y la menor que se alcanza depende de la eficiencia de las bombas o eyectores utilizados; suele variar de 1 a 0,1 torr.

5.3.3. Ventajas e inconvenientes del proceso DH

Una de las ventajas de este procedimiento, que también la tienen otros, es que se pueden añadir con gran facilidad al baño de acero elementos de aleación y que con esas adiciones se consiguen muy altos rendimientos, superiores al 95 % por realizarse estas adiciones a un baño de acero que ya está desoxidado. Después, al alcanzarse el desgasificado deseado, se hacen las adiciones.

Inmediatamente después de introducir el tubo de aspiración en el acero de la cuchara se ponen en operación las bombas o eyectores de vacío. Por la acción del vacío el acero líquido asciende e irrumpe en el recipiente reactor hasta una altura de unos 1400 mm, con lo que una gran superficie líquida queda expuesta al vacío. Se puede observar una fuerte efervescencia con proyección de partículas de acero dentro de la cámara, facilitando el desgasificado. Una vez desgasificada esa porción se eleva el recipiente, con lo que una parte sustancial de esa porción de acero líquido se reintegra a la cuchara. Se baja de nuevo (en algunas instalaciones la cámara desgasificadora está fija y es la cuchara quien sube y baja) y se repite el proceso más de 30 veces, con lo que se consigue que todo el acero de la cuchara pase dos o tres veces por la cámara, desgasificándose.

Como se puede suponer, el proceso puede acelerarse si se produce agitación en la cuchara, la cual puede efectuarse por inyección de gas inerte vía tapón poroso o de forma inductiva; para esto último la cuchara (cuya chapa debe ser de acero inoxidable austenítico amagnético) está rodeada por una bobina inductora por la que circula una corriente alterna de baja frecuencia.

Para una carga de 80 t se tratan en cada ciclo unas 12 t, durando la totalidad del proceso unos 20 min. La presión baja desde 100 torr al principio hasta quedar en 1 torr al final del tratamiento. En algunos casos este movimiento de subida y bajada se hace hasta 36 veces, lo que trae consigo un acusado descenso de la temperatura del acero, que puede superar los 85 °C, lo que se compensa con quemador oxigás o electrodos.

La figura 5.9 muestra la variación de contenidos de carbono y oxígeno de varios aceros sometidos a desgasificado DH. En la figura 5.10 se aprecia la disminución de inclusiones obtenida por este procedimiento.

Las instalaciones DH son caras, y la necesidad de tener que subir y bajar la cámara de vacío aumenta la complicación y costo de la operación.

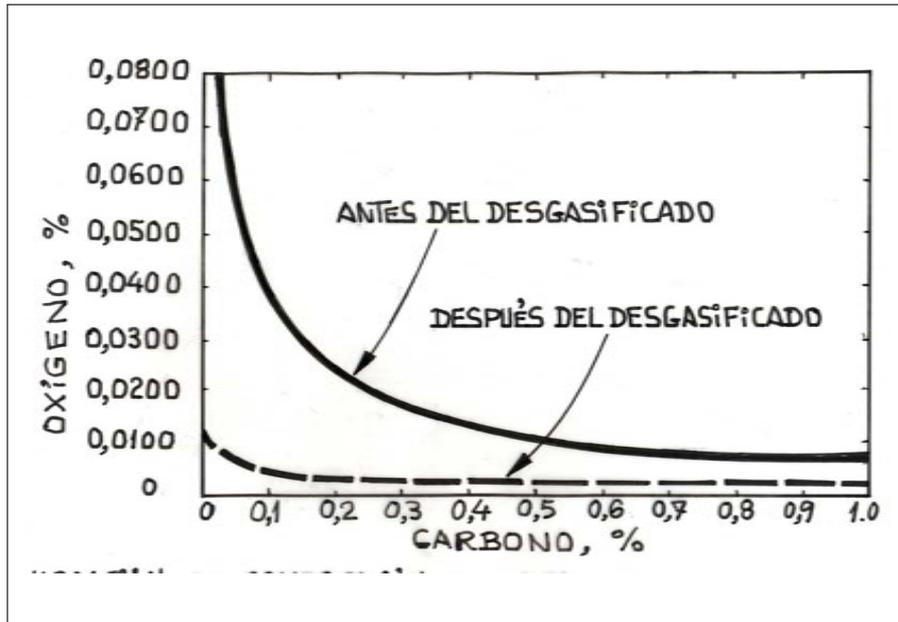


Figura 5.9: Variación de composición de varios aceros oxidados después de ser sometidos a un desgasificado DH

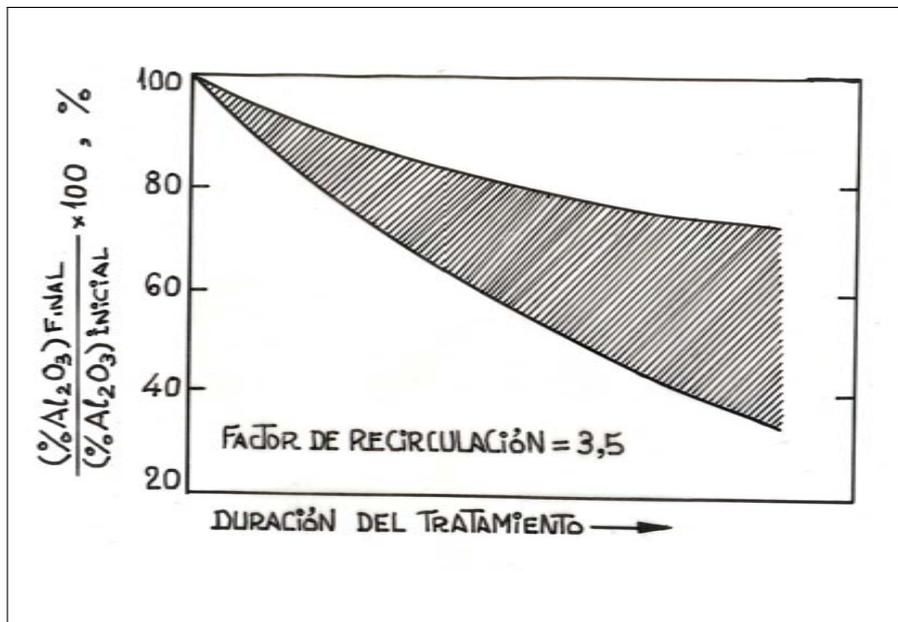


Figura 5.10: Eliminación de inclusiones de alúmina en un acero mediante un desgasificado según el proceso DH

5.4. Elevación y recirculación (Ruhrstahl-Heräus AG, RH)

Es parecido al proceso DH, cambiando el sistema de elevación-descenso del acero a la cámara del reactor.

5.4.1. Descripción del equipo RH

En este proceso, desarrollado en colaboración por la acería Ruhrstahl AG y la empresa de equipos de vacío Heräus hay una cámara de vacío (figura 5.11) que, a diferencia del DH tiene dos snorkels en lugar de uno.

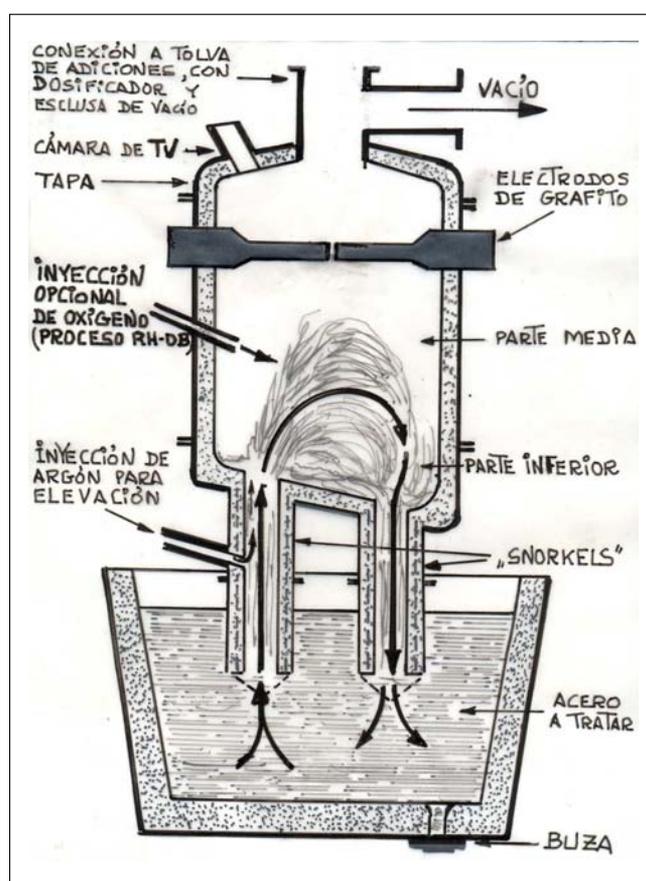


Figura 5.11: Esquema del reactor RH con sistema «GAS LIFT» de recirculación del baño de acero

Es uno de los procesos más utilizados. Puede tratar el acero de cualquier cuchara normal, introduciendo ferroaleaciones durante el tratamiento de vacío. Consiste, como el DH, en un recipiente en el que se realiza el vacío, pero a diferencia del anterior, éste tiene dos trompas inferiores que se sumergen a la vez en el acero de la cuchara. De las dos trompas que se introducen en el acero, una recibe la inyección de un gas inerte, con lo que la densidad del acero es menor en esta trompa, y se produce en ella un movimiento ascendente del acero que luego desciende por la segunda («gas

lift»).

La cámara y los conductos se suelen construir de ladrillos de alto contenido de alúmina (70 a 90 %), que sufren menos la erosión por la acción del hierro líquido que los refractarios silicoaluminosos de 40 % de alúmina (figura 5.12).

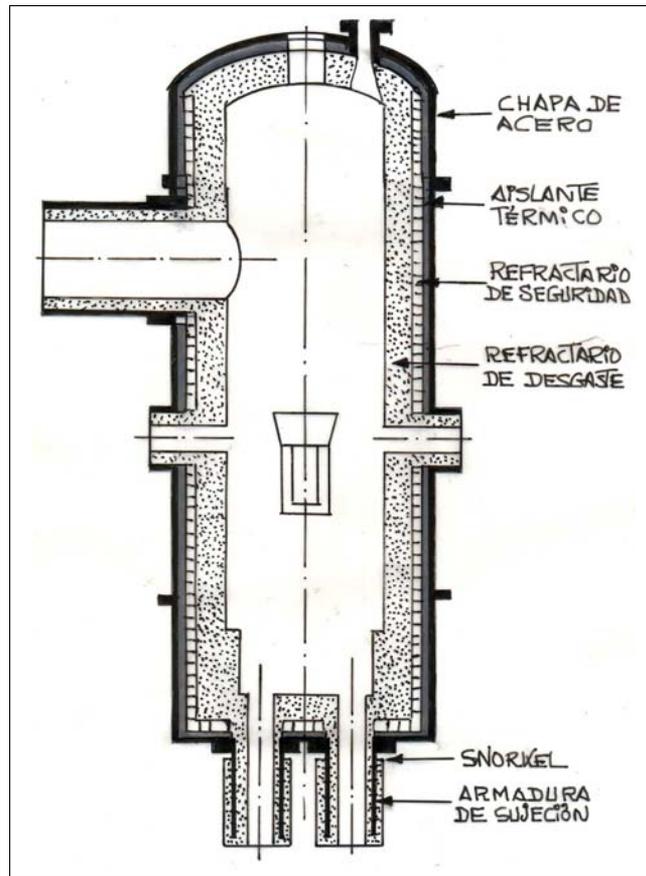


Figura 5.12: Revestimiento RH

Existe una alimentación de escorificantes, aditivos y ferroaleaciones, que suele estar compuesta por una colección de tolvas y dosificadores. El conjunto se conecta al reactor mediante una junta de cierre hermético o esclusa de vacío. La conexión a las bombas de vacío se hace también con cierre hermético. Entre el reactor y las bombas de vacío se intercala un sistema refrigerante de los gases de salida del reactor que también capta el polvo contenido en los mismos.

Las bombas son de eyectores de vapor. En siderúrgicas integrales las calderas de vapor se calientan mediante los gases de batería o de horno alto generados en la propia planta. En acerías eléctricas se hace por quemadores de gas natural con comburente oxígeno puro o aire.

Como en el DH, existe un sistema de calentamiento basado en quemadores, aluminotermia o resistencias o electrodos de grafito.

En cuanto a los snorkels, ambos están protegidos por refractario; uno de ellos es de elevación del acero y entrada en la cámara; el otro constituye la salida del acero para su descenso de nuevo a la cuchara.

Para evitar la caída de temperatura se suele calentar la cámara de vacío por varios procedimientos, tal como se vió en epígrafe anterior. En ocasiones, el calentamiento se hace por llama producida al quemar gas-oil o gas en la propia cámara de vacío. También se puede realizar el calentamiento mediante resistencia eléctrica calefactora; en este caso se utiliza un electrodo de grafito colocado horizontalmente en la parte superior de la cámara. El calentamiento eléctrico tiene la ventaja de que puede realizarse durante el tratamiento de vacío.

En una de las trompas se inyecta argón. Como ya se ha mencionado anteriormente, la combinación del vacío de la cámara y la inyección de argón hace que el acero sea elevado hasta el interior del reactor; es lo que se llama "gas lift". Algunas instalaciones tienen un sistema de bobina inductiva rodeando el tubo, de forma que son las fuerzas magnéticas las que elevan el caldo; es el sistema llamado «induction lift», «thermoflow» o «proceso Stokes» (en realidad se trata de bombas electromagnéticas) (figura 5.13).

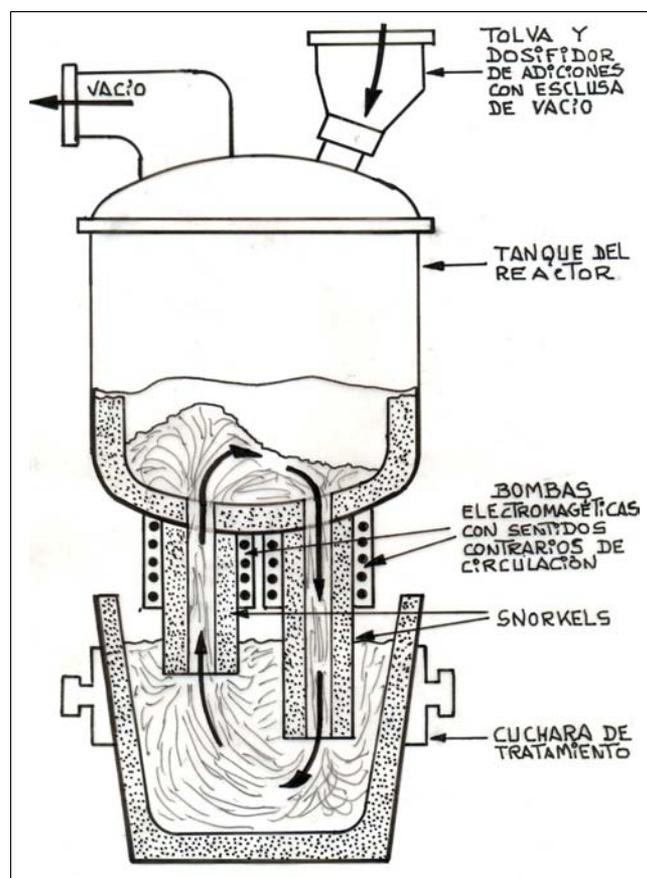


Figura 5.13: RH Thermoflow (Induction lift)

5.4.2. Operación del equipo RH

El proceso puede acelerarse agitando el baño de la cuchara. Como en el DH visto anteriormente, la agitación puede hacerse mediante inyección de gas inerte o inductivamente. También en las trompas se aplican bobinas (bombas electromagnéticas), una en cada trompa, que producen campos inductivos de sentidos contrarios entre sí, de suerte que en una trompa el acero es forzado a subir y en la otra a bajar (figura 5.13).

El desnivel resultante origina un movimiento de circulación del acero fácilmente regulable, actuando sobre la potencia de las bombas. La ausencia de gas inyectado permite fácilmente alcanzar una presión de tratamiento muy reducida, lo que favorece la desgasificación.

5.4.3. Posibilidades metalúrgicas del reactor RH

1. Como aparato desgasificador:

- Permite: Deshidrogenación, desnitrogenación y desoxidación.
- Aplicable a: Chapa, varilla, aceros de alta aleación.

2. Como aparato de afino:

- Permite: Desoxidación, desulfuración y, por lo tanto, eliminación de inclusiones.
- Aplicable a: Chapa, varilla, aceros de alta aleación.

3. En su versión RH-OB:

- Permite: Descarburación.
- Aplicable a: Acero inoxidable, acero para fleje eléctrico, sustitución de efervescentes (embutición profunda).

4. Como controlador:

- Permite: Ajuste de temperatura y composición.
- Aplicable a: Mejora de funcionamiento de colada continua.

5.4.4. Fabricación de acero dulce al vacío

En la acería clásica el acero de muy bajo carbono, de alta ductilidad y maleabilidad («hierro dulce») se fabricaba en horno de arco con una sola escoria oxidante. Era lo que se llamaba «acero efervescente», por la ebullición que se formaba durante la colada y solidificación en las lingoteras.

Es decir, que a diferencia de los aceros calmados (escoria oxidante + desescoriado + escoria reductora) el acero se colaba oxidado a la lingotera y la clave del proceso estribaba en el control (siempre empírico) del grado de oxidación (grado de efervescencia) y del contenido de azufre; ambos parámetros se controlaban mediante adiciones, casi mágicas, de ferromanganeso. Aún más difícil resultaba la cosa si el acero se elaboraba en convertidor en lugar de horno eléctrico de arco.

La aparición y difusión de las máquinas de colada continua añadió nuevas dificultades a la obtención correcta de este acero. Sin embargo, la Metalurgia Secundaria al vacío, con la posibilidad que aporta de descarburar desgasificando, ha resuelto el problema. En lo que sigue se describen los pasos a realizar para la fabricación de chapa de embutición profunda en una acería integral:

1. Soplado en convertidor LD. Los controles a realizar son:

- Punto final constante para carbono medio (0,10%).
- Estabilización de bajo nivel de oxígeno en el punto final.
- Disminución de contenido de Fe total en la escoria.

2. Tratamiento en reactor RH. Los controles a realizar son:

- Descarburación según proceso RH-OB. Débil aumento del oxígeno libre en el acero líquido durante el soplado de oxígeno en el reactor RH.
- Desoxidación al vacío mediante ligero tratamiento RH.
- Minimización y estabilización del contenido de oxígeno del acero líquido en el momento de la adición de aluminio.
- Estandarización de la adición de aluminio en función del oxígeno libre en el acero.

3. Fase

a) Colada continua. Extracción del slab. Los controles a realizar son:

- Alta velocidad de extracción.
- Velocidad constante en toda la colada (ningún cambio de la velocidad de colada durante el cambio de cuchara mediante empleo de artesa mayor).

b) Colada continua. Protección contra la reoxidación y anormales condiciones de colada. Los controles a realizar son:

- Uso de buza larga ("buza sumergida") entre cuchara y artesa para evitar reoxidación.
- Para el acero líquido garantía de cantidad suficiente en la artesa en la colada secuencial.
- Evitar que caiga escoria de la cuchara a la artesa.

4. Fase

- a) Preparación de slabs. Método de preparación. Los controles a realizar son:
- Ninguna preparación superficial.
 - Carga caliente (unos 700°C) de slabs al horno de recalentamiento.
- b) Preparación de slabs. Garantía de calidad. Los controles a realizar son:
- En caso de operación anormal el método de acondicionamiento y la utilización del producto final se modifican mediante el empleo de ordenadores.
 - Utilización de aparatos para verificación de la calidad de los slabs producidos.

5.5. Mezclado pulsatorio (Pulsating Mixing, PM)

El equipo está instalado en un pescante giratorio, bajo el cual se posiciona la cuchara que es transportada por el carro porta-cuchara. La tolva de adiciones, apoyada en el pescante, está emplazada directamente sobre el "snorkel" (figuras 5.14 y 5.15), el cual está conectado a la bomba de vacío a través de un control por válvula solenoide y válvula de control de flujo y a la entrada de gas inerte (o nitrógeno) también controlada por válvula solenoide y válvula de control de flujo.

Más que un sistema de desgasificación se trata de un equipo para mezclado y homogeneización de las adiciones, especialmente las ferroaleaciones. Una vez introducida la trompa en la cuchara se hacen las adiciones mediante apertura del sistema adicionador-dosificador correspondiente. Después se abre la conexión a la bomba de vacío, con lo que el acero líquido ascenderá. Se cierra esta conexión y se abre la comunicación con el gas inerte; el acero descenderá y pasará, junto con las adiciones, a la cuchara, en la que se produce la fusión y mezclado. Se vuelve a aspirar y el acero líquido asciende por la trompa. Se comunica con el gas inerte y el líquido volverá a la cuchara. Y así sucesivamente, el número de veces que se juzgue necesario para una completa fusión y mezclado de las adiciones.

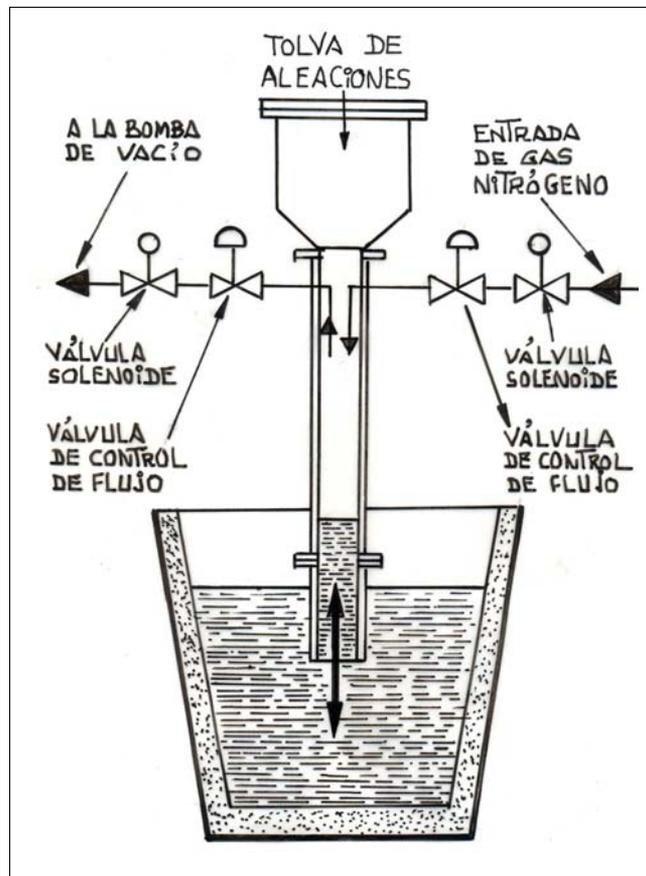


Figura 5.14: Mezclado pulsatorio (P.M.)

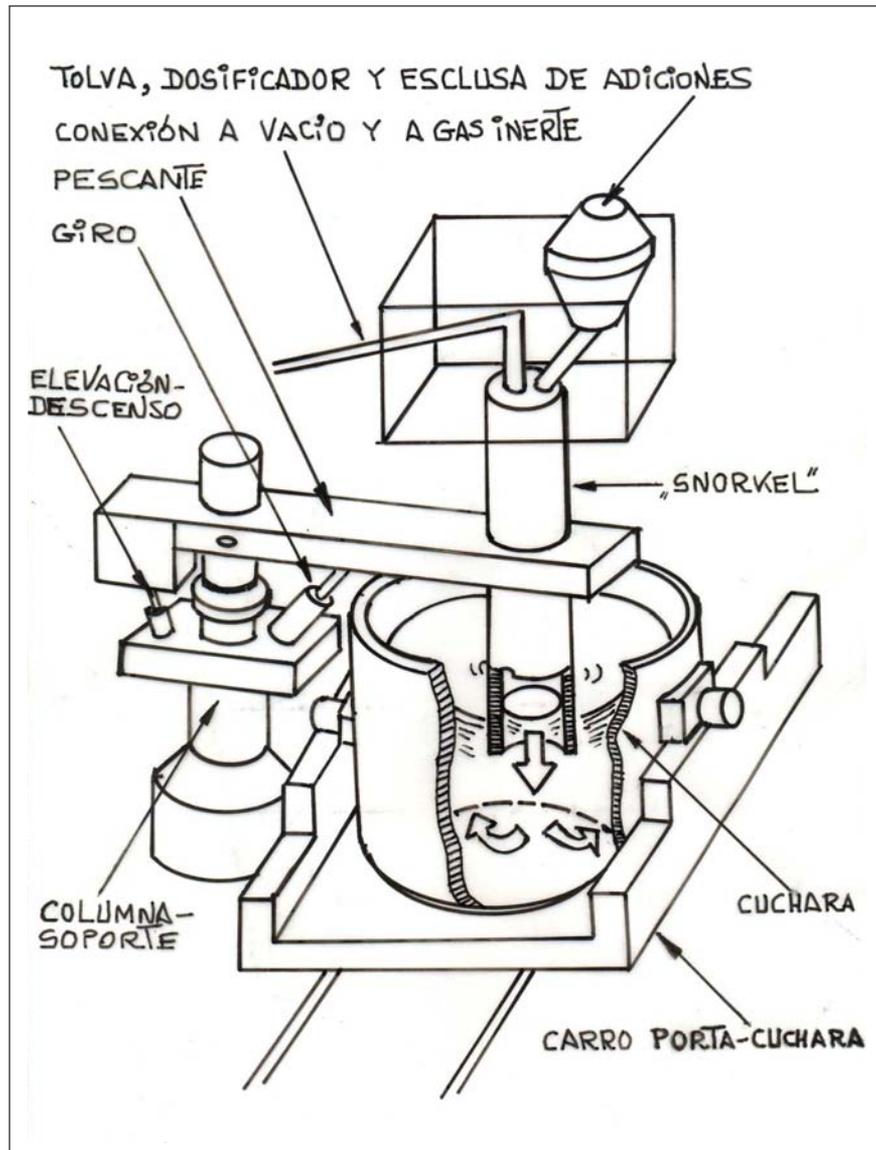


Figura 5.15: Mezclado pulsatorio (P.M.)

Capítulo 6

PROCESOS VACÍO CON APORTACIÓN TÉRMICA

Como ya se mencionó en su momento, todos los procesos de desgasificado, sean estáticos o dinámicos, implican un enfriamiento acusado que en algunas ocasiones puede ser prohibitivo. Por ello nació la segunda generación de procesos vacío, la que introduce calentamiento adicional, el cual puede ser eléctrico o por inyección de carburante de oxígeno. Se comenzará por los procesos eléctricos.

6.1. Proceso ASEA-SKF

Este proceso se desarrolló en Suecia, en un proyecto conjunto entre ASEA (equipos siderúrgicos) y SKF (rodamientos) en un intento de mejorar el rendimiento y duración de los rodamientos fabricados por SKF.

6.1.1. Descripción general

Puede tratar acero bruto procedente de horno de arco (normal o de cuba doble), horno de inducción de crisol o canal, horno Siemens-Martin y convertidores LD normales, Kaldor o similares. A pesar de lo dicho, este proceso está prácticamente enfocado para tratar acero oxidado (descarburado y defosforado) procedente de un horno eléctrico de arco de ultra-alta potencia UHP.

El equipo ASEA-SKF puede realizar los siguientes tratamientos (figura 6.1):

- Desgasificación.
- Desoxidación.
- Desulfuración.
- Ajuste de temperatura.
- Ajuste de composición.
- Descarburación en vacío.

- Eliminación de inclusiones.
- Modificación de inclusiones.

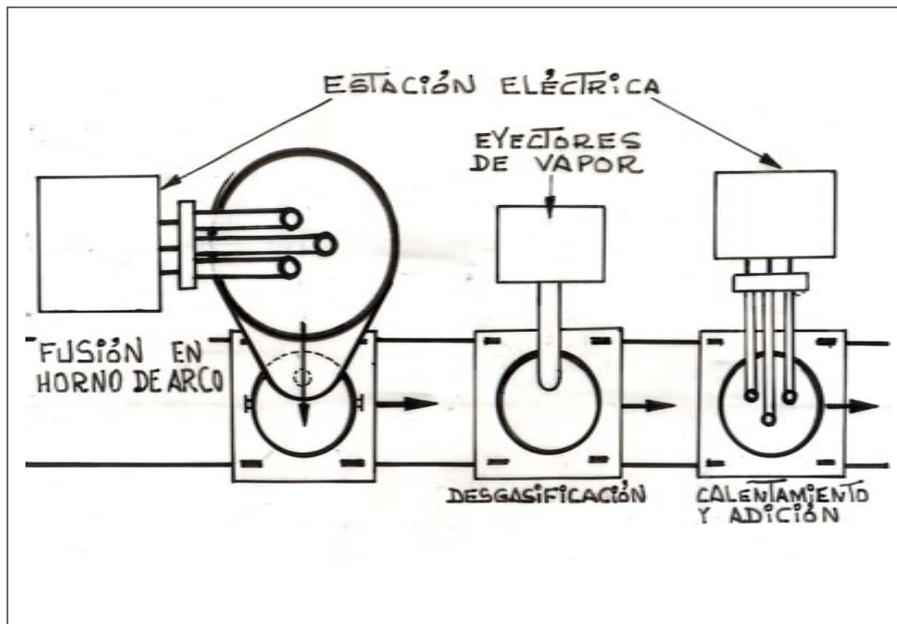


Figura 6.1: **Instalación ASEA-SKF**

Después de la fusión primaria y oxidación en el horno UHP el baño de acero se somete a las siguientes operaciones (figuras 6.2 y 6.3):

1. Llenado de la cuchara y transporte a la estación de tratamiento.
2. Desgasificado y agitación inductiva y/o por gas inerte.
3. Calentamiento por arco eléctrico y adición de ferroaleaciones.
4. Colada a molde, lingotera o a máquina de colada continua.

El equipo para hacer el vacío suele estar constituido por eyectores de vapor que en general son más rápidos, potentes y seguros que las bombas rotativas empleadas en los primeros tiempos. Además, son insensibles a las partículas en suspensión que suelen contener los gases aspirados, en contraste con las bombas, que exigen filtros para eliminarlos.

La agitación se logra por bobinas de inducción, que someten al baño de acero contenido en la cuchara a un movimiento circular constante que produce efectos muy favorables, acelerando la evacuación de gases y generando interfases que aceleran las reacciones metalúrgicas. El agitador de inducción puede estar montado en el carro o ser estacionario. El convertidor estático suministra energía al agitador, con una frecuencia de 1 a 2 Hz.

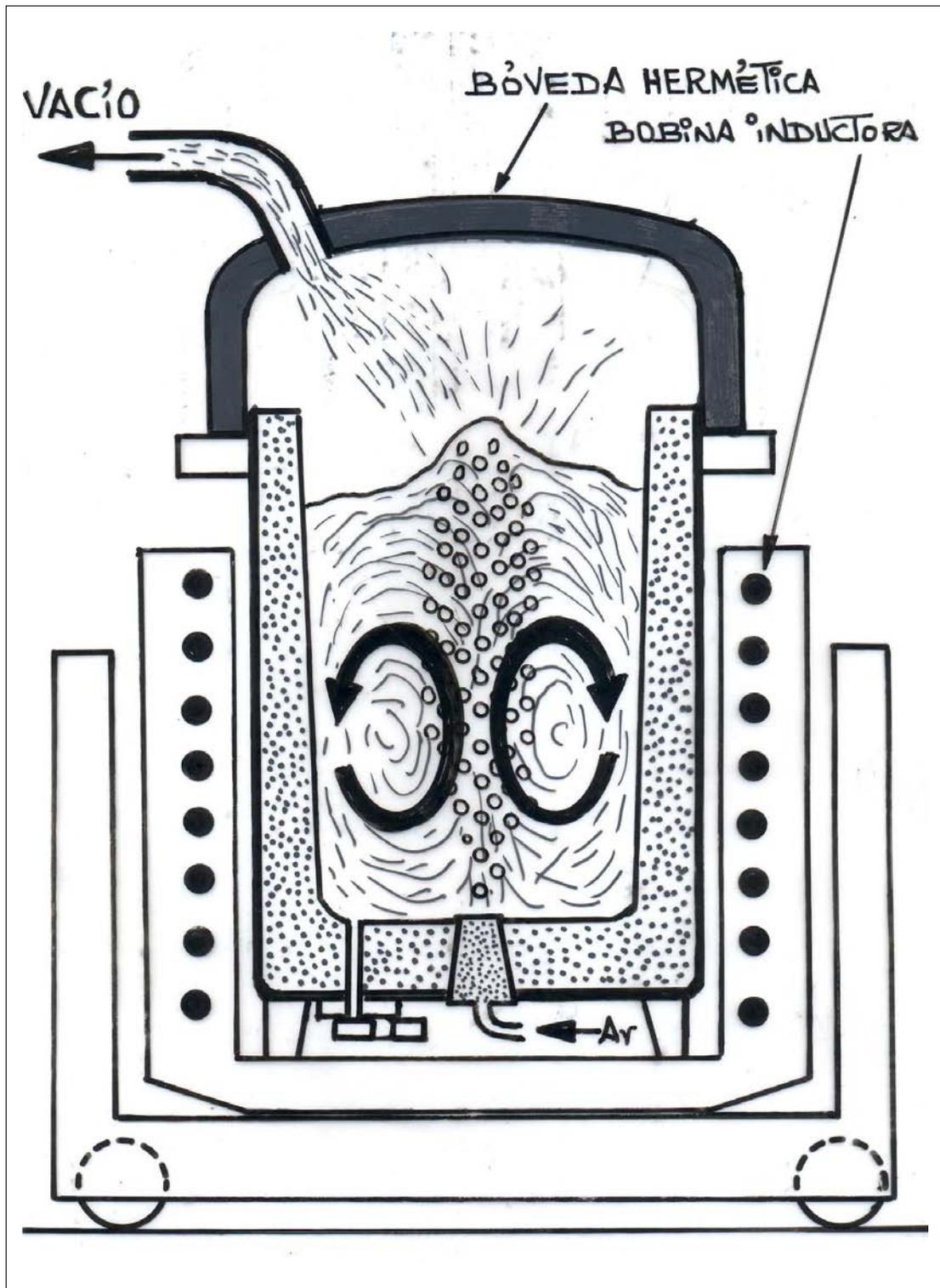


Figura 6.2: Proceso ASE-SKF. Fase 1ª: Desgasificación

Con el fin de que el flujo magnético penetre en el baño y no quede confinado en la chapa de la cuchara, la parte cilíndrica superior de la cuchara es de acero inoxidable austenítico (amagnético) y la cuchara tiene una altura algo mayor que la usual con el fin de disponer del espacio necesario para una agitación intensa y evitar

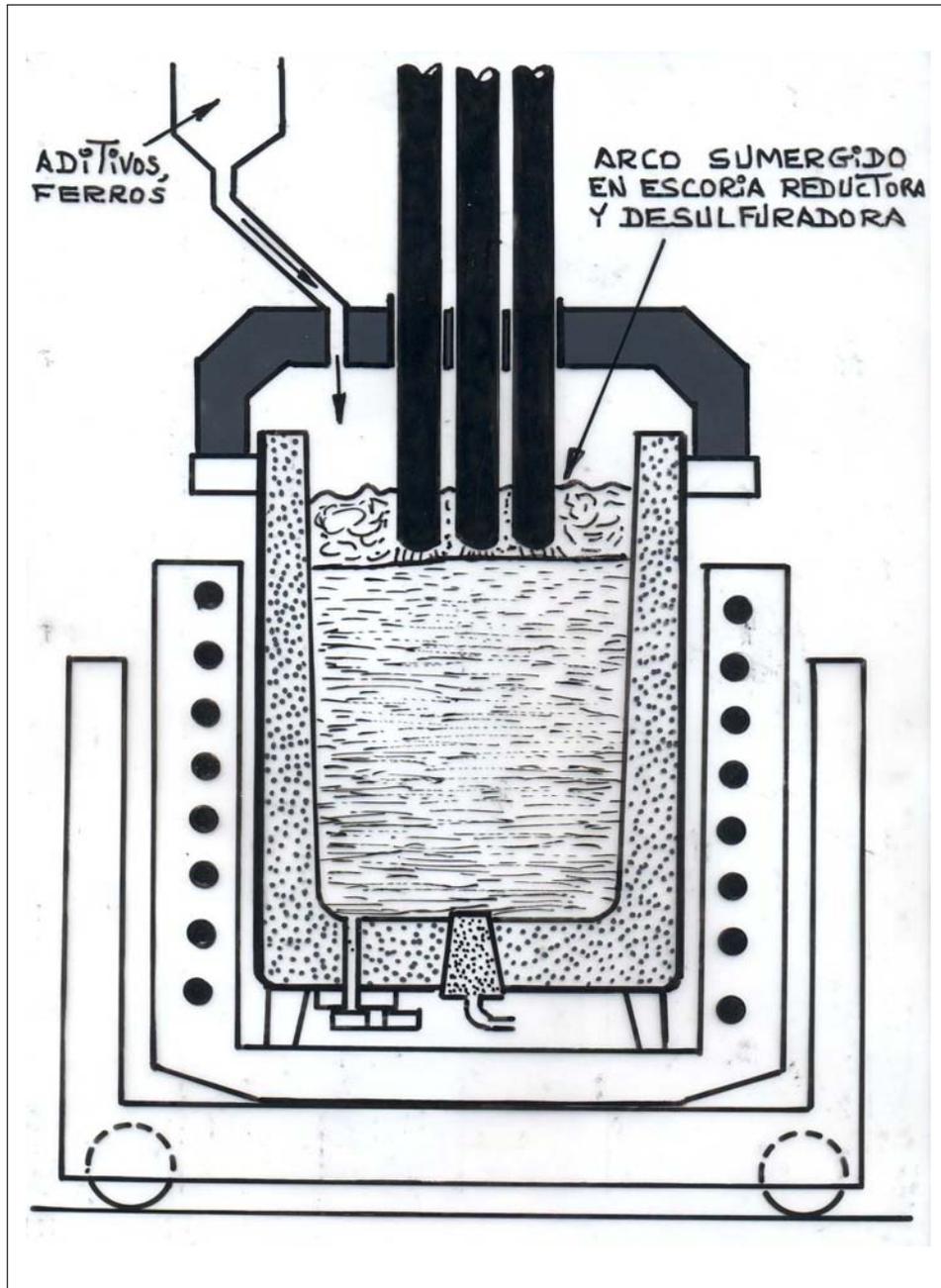


Figura 6.3: Proceso ASEA-SKF. Fase 2ª: Calentamiento

que se desborde el baño de acero en movimiento. El fondo y la tapa superior, así como la campana de vacío, suelen ser de acero para recipientes a presión. La parte superior es de pared doble, y la brida de cierre hermético tiene refrigeración por agua.

Normalmente la cuchara está montada, como se ha dicho anteriormente, sobre un carro de transporte, y tiene mangueras para elevarla mediante puente grúa. En el fondo de la cuchara hay una boquilla. Durante la colada el vástago del tapón es accionado eléctricamente. Modernamente, las cucharas están equipadas de válvulas de compuerta.

En algunos equipos la bobina inductiva agitadora está adosada lateralmente en lugar de rodear totalmente a la cuchara (figura 6.4).

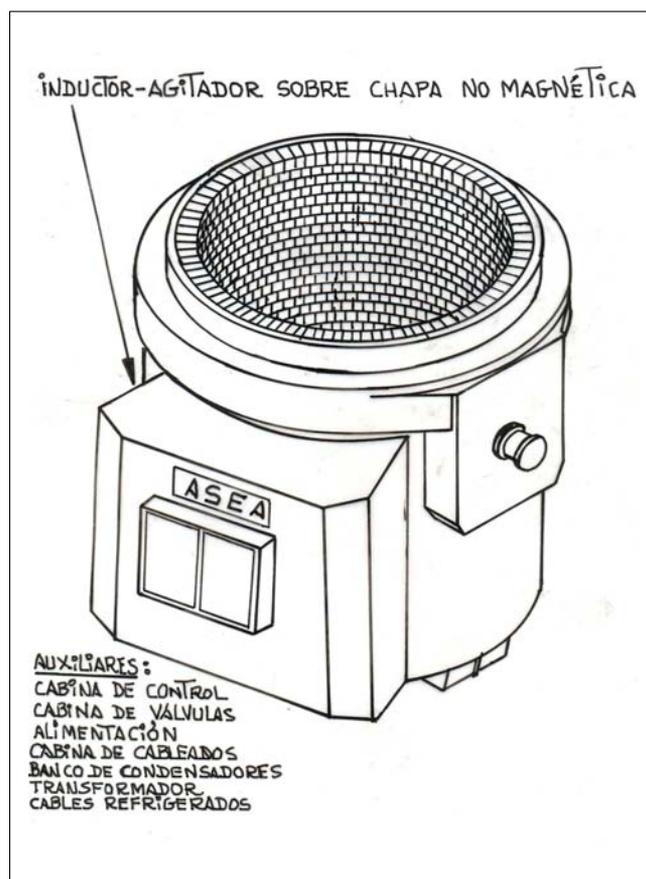


Figura 6.4: Cuchara ASEA de agitador lateral

En la mayoría de las instalaciones la agitación magnética se simultanea con barboteo de argón a través de tapón poroso emplazado en el refractario del fondo de la cuchara.

Para conseguir un vacío perfecto, después de colar el acero del horno a la cuchara se pone en ella una tapa con junta de goma, con la que se consigue un cierre muy hermético. La aspiración para hacer el vacío se hace a través de una boca colocada en la tapa.

El calentamiento, fase (3), posterior al desgasificado se efectúa quitando la tapa estanca, colocando sobre la cuchara (que en esta operación actúa como cuba del horno) una tapa o bóveda con tres electrodos, muy similar a la bóveda de un horno eléctrico de arco. Como esta fase de calentamiento y elaboración suele ser de mayor duración que la desgasificadora, algunas instalaciones cuentan con dos bóvedas de calentamiento en lugar de una sola. De esta forma son dos las cucharas que alternativamente son desgasificadas. Las dos estaciones de tratamiento son fijas y es la cuchara la que se desplaza entre ellas sobre el carretón transfer.

6.1.2. Esquema del proceso

El proceso comienza cuando el horno primario de fusión, generalmente un horno UHP, cuela el acero a la cuchara, donde el baño de acero ha de quedar recubierto por sólo una pequeñísima cantidad de escoria. Luego, se pasa la cuchara, mediante un carretón transfer, a la estación ASEA-SKF de desgasificado, en la cual se realiza la desgasificación en vacío con movimiento simultáneo del baño por los medios descritos anteriormente.

Después del desgasificado, el carretón con la cuchara se traslada a la estación de calentamiento del acero, para alcanzar la temperatura adecuada de colada, ya que debido al proceso de desgasificado anterior se ha producido una importante pérdida de temperatura.

La primera fase de trabajo se realiza colocando la cuchara sobre el carretón, en el interior de un conjunto de bobinas (que es una especie de segundo horno de inducción), que servirán para mover el baño en el momento oportuno por medio de corrientes inducidas. Respecto a éstas ha de señalarse que cuanto menor es la frecuencia de estas corrientes mayor es el grado de agitación que producen. Cuando está dispuesta la cuchara en el interior de las bobinas, se coloca la tapa de hermeticidad y se comienza a hacer el vacío.

Se hace pasar la corriente eléctrica por las bobinas inductoras concéntricas a la cuchara (en algunas instalaciones son laterales), que crean corrientes inducidas en el baño que mueven y agitan el acero fundido. Debido al alto vacío y al movimiento del acero, se consigue una eliminación muy eficaz de los gases.

Cuando se considera terminado el desgasificado, se quita la tapa de cierre hermético y el conjunto de cuchara y bobina se traslada debajo de la instalación eléctrica de calentamiento constituida por bóveda y tres electrodos de grafito que se adaptan perfectamente a la cuchara. Luego se hace saltar el arco que calienta el caldo que se había enfriado por la agitación inductiva y barboteo de gas.

Paralelamente al calentamiento se hace la adición automática de ferroaleaciones, reductores y escorificantes. Se forma una escoria sintética que cubre el baño y envuelve a los electrodos. Con ello, éstos trabajan según sistema de arco sumergido, evitándose pérdidas térmicas, oxidación y ataque a los refractarios. Las corrientes inducidas por las bobinas favorecen la asimilación de las adiciones y la homogeneización de composición y temperatura.

Finalmente, cuando se han alcanzado y verificado las magnitudes prefijadas, se elevan los electrodos y bóveda, se desplaza el carretón de su vertical, se extrae la cuchara del conjunto carretón-bobinas y se va con la cuchara a colar en la máquina de colada continua.

6.1.3. Ventajas y posibilidades

Con este proceso se alcanza un elevado grado de desgasificación, ya que el movimiento del acero en la cuchara por medio de corrientes inducidas es de gran interés, en especial en la fase en que se hace el vacío, ya que favorece mucho la eliminación de los gases. Ha de tenerse en cuenta que cada burbuja de gas que intenta escapar del baño ha de vencer la presión ferrostática de la columna líquida que tiene sobre ella; la agitación solventa ese problema y acelera extraordinariamente el proceso.

Por otra parte, la pérdida de temperatura que se produce en la operación se compensa en la última fase con el calentamiento por el arco eléctrico. Esta circunstancia hace que no sea necesario calentar fuertemente el acero en el horno UHP de fusión primaria para compensar la pérdida de temperatura originada por el desgasificado. Así se reduce el consumo eléctrico y el desgaste de refractarios.

Instalando, en serie con un horno de arco, un conjunto ASEA de desgasificación, se puede conseguir, además de desgasificar el acero, mejorar la productividad del horno. Con estas instalaciones se pueden realizar las últimas fases del afino y encaje de colada en el conjunto ASEA, que al disponer además de electrodos, es un verdadero horno eléctrico con capacidad de realizar las últimas fases de fabricación. En realidad puede decirse que el procedimiento ASEA-SKF no es meramente una técnica de desgasificado, sino que es un proceso de fabricación de acero entre cuyas operaciones unitarias se encuentra el desgasificado.

En el horno de fusión primaria se funde la carga de chatarra, se defosfora y decarbura y se calienta hasta una temperatura de unos 1600 °C. Entonces se cuela a la cuchara y todo el resto del proceso de fabricación se realiza en el equipo ASEA-SKF, con lo cual, parte del tiempo que en el proceso clásico ocuparía el afino puede emplearse en fundir otra nueva carga en el horno primario.

Por disponer de los elementos de calentamiento necesarios, pueden realizarse las adiciones (ferroaleaciones) que sean precisas, en cantidades prácticamente ilimitadas, con rendimientos muy elevados que en la mayor parte de los casos sobrepasa el 99 %, a la vez que se controla con gran exactitud la temperatura de colada. Factores notables de calidad son, entre otros:

- Pequeño contenido de oxígeno, como resultado de la agitación por inducción, así como de la desoxidación por aluminio, con carbono o combinación de ambas.
- Pequeño contenido de hidrógeno, como consecuencia de la desgasificación y agitación inductiva simultáneas.
- Pequeño contenido de azufre, si se desea, mediante la agitación por inducción y la eficiente desoxidación durante el calentamiento por arco sumergido (figura 6.5).

- Escasez de inclusiones de escoria como resultado de la agitación por inducción y del control exacto de la temperatura, con la consiguiente limpieza y calidad superficial de los lingotes y palanquillas.

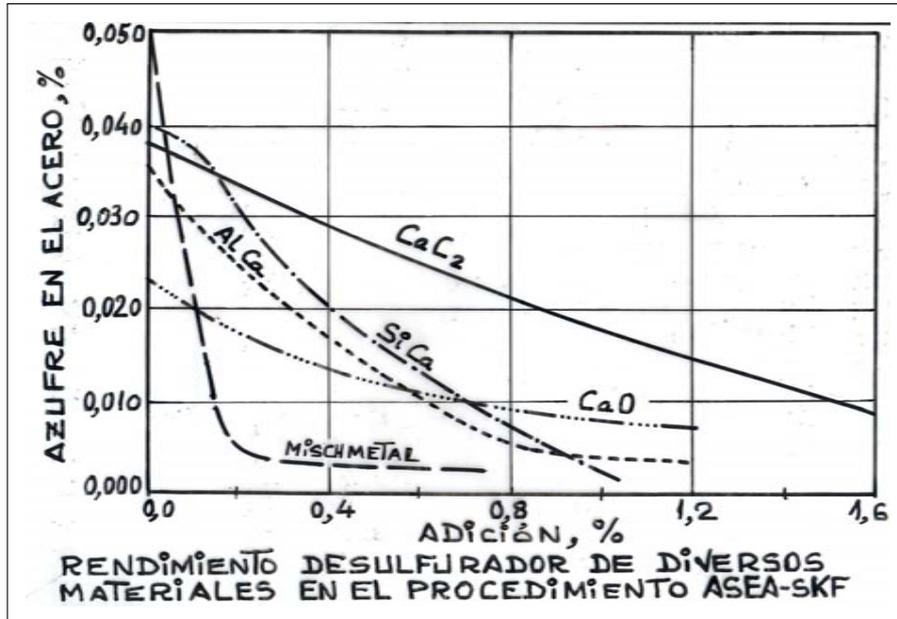


Figura 6.5: Rendimiento desulfurador

El acero afinado en este proceso, en coladas de 15 t en adelante, puede destinarse posteriormente a:

- Colada de lingotes para piezas forjadas.
- Colada en máquina de colada continua.
- Vaciado a presión.
- Llenado de moldes para piezas coladas.

En aceros al carbono, de baja aleación o de alta aleación destinados, entre otros, a las siguientes aplicaciones:

- Acero para temple tenaz.
- Acero para cementación y nitruración.
- Acero para muelles.
- Acero refractario.
- Acero para rodamientos de bolas.
- Acero para cadenas.
- Acero para recipientes a presión.

- Carriles.
- Chapa gruesa y fina.
- Acero de herramientas.
- Acero para pernos y remaches.
- Acero para embutición profunda.
- Acero inoxidable, etc..

6.2. Procesos similares

Hay otros procesos, también de vacío con caldeo eléctrico, que pueden considerarse derivados o relacionados con el ASEA-SKF. Estos procesos ya se enlistaron en el capítulo correspondiente. En algunos de ellos, como el ASEA, la cuchara hace de cuba del horno (horno-cuchara al vacío) con sistema de tapa hermética de vacío y calentamiento. En el otro grupo la cuchara se introduce en un tanque hermético en el que se realizan las dos operaciones de que consta el proceso, es decir, desgasificación y calentamiento posterior. De todos ellos el que ha tenido más aceptación es el VAD, desgasificación por arco en vacío.

6.2.1. Horno-cuchara Stein Heurtey-S.A.F.E.

Es un desarrollo de Stein Heurtey S.A.F.E Electric Steelworks (Midland Ross) que puede calentar el acero y hacer el vacío. El sistema tiene una tapa hermética con electrodos móviles y posibilidad de disponer una lanza de inyección. La agitación por gas se efectúa por tobera lateral. El sistema está equipado de tolvas de aleaciones con esclusas de vacío. Para cucharas de 60 t, el transformador tiene una potencia de 10 MVA.

Como puede verse (figura 6.6) se trata, al igual que el ASEA, de un horno cuchara, es decir, en que toda la química del proceso se efectúa en la cuchara que se llena en el horno de arco primario. Hay una simplificación en comparación con el ASEA, y es que en lugar de una tapa hermética de desgasificación por vacío a la que se añade una bóveda de horno-cuchara con los electrodos de calentamiento, aquí hay una sola tapa.

Esta bóveda única tiene el cierre hermético con la cuchara, la toma de conexión con el equipo de vacío, la tolva de adición de escorificantes y ferroaleaciones con sus esclusas de vacío y el paso sellado de los electrodos de calentamiento a través de esa bóveda. Es decir, que las dos operaciones del afino (desgasificación y calentamiento) se hacen en una sola estación sin que la cuchara tenga que moverse.

Hay una posible dificultad, cual es el mantenimiento de hermeticidad en el paso de los electrodos a través de la tapa del horno-cuchara, pero esta dificultad se da también en otros procesos.

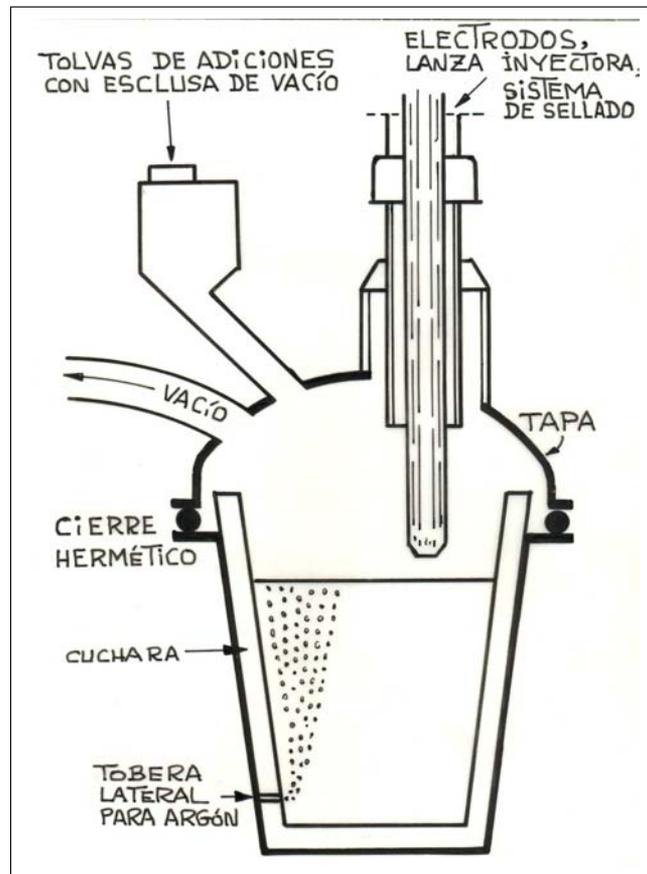


Figura 6.6: Horno-cuchara Stein Heurtey-S.A.F.E. Electric Steelworks (Midland Ross)

En una operación normal, sin desgasificado, el acero se recucharea empleando una cuchara con buza de corredera para evitar incorporación de escoria al proceso. El caldo se recalienta a plena potencia durante unos 20 minutos. El acero puede desulfurarse mediante escorias sintéticas agitando lateralmente por gas o mediante inyección de desulfurantes. Si se desea efectuar vacío después del ciclo de calentamiento se retiran los electrodos y se aplica un vacío de 1 Torr o más profundo aún entre 10 y 20 minutos. Durante el proceso se barbotea argón (2,5 a 4 m³/h). Se consigue disminuir el contenido de hidrógeno hasta quedar en menos de 1,5 ppm.

6.2.2. Hornos-cuchara en cámara de vacío

Hay otros procesos en vacío con calentamiento eléctrico adicional. Se diferencian del ASEA en que la cuchara ya no es parte principal del equipo. Ahora las operaciones se realizan en un tanque de vacío análogo al que se describió en su momento para desgasificación estática en cámara de vacío con paso de argón.

Un proceso muy conocido es el Vakuum Metallurgie (Vacmetal), VM (figura 6.7). Hay una cámara en la que se deposita la cuchara y que está dotada de la conexión a las bombas de vacío, y a las tuberías de gas de agitación (casi siempre argón).

Sobre este tanque, y con su correspondiente junta de hermeticidad, se coloca la tapa que cuenta, como elementos principales, el paso hermético de los electrodos de calentamiento y la conexión, vía esclusa de vacío, con las tolvas y dosificadores de ferroaleaciones, escorificantes y otros aditivos.

Muy parecido a este sistema es el Vacuum Arc Degassing, VAD, desgasificación por arco en vacío, y su variante VAD FINKL-MOHR (figura 6.7). Otro proceso de este grupo es el horno-cuchara DIADO (DAVEY McKEE) cuya mayor peculiaridad reside en que la cámara no está fija en un sitio, sino que puede trasladarse con un carretón sobre raíles.

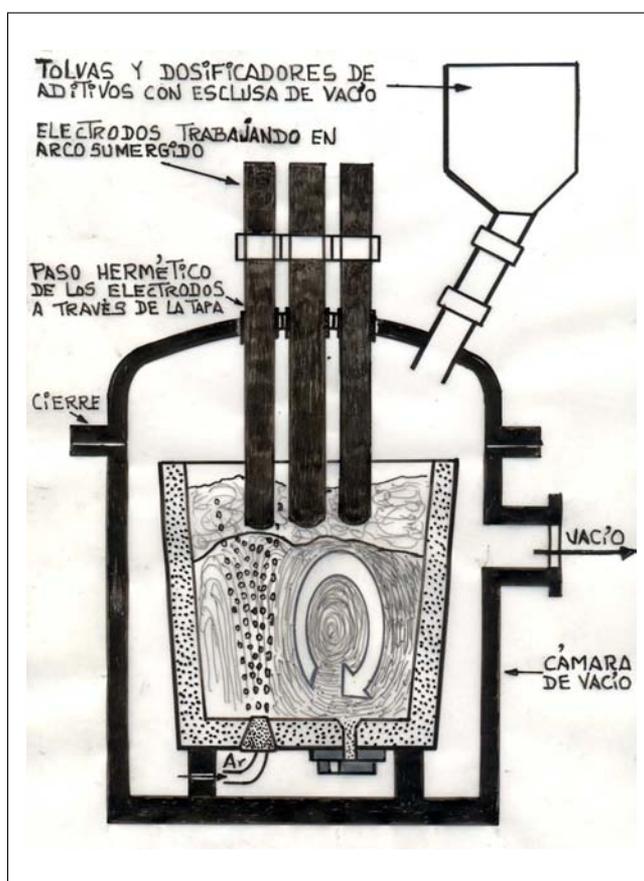


Figura 6.7: Esquema de procesos VM, VAD, VAD FINKL-MOHR y otros similares

Diado Ladle Furnace

Otro sistema normal de refinado en cuchara calentada por arco eléctrico es el Diado Ladle Furnace, desarrollado en 1984. Es un ejemplo típico de sistema con agitación por gas (figura 6.8). Cuando se hace desulfuración o tratamiento de vacío se retiran los electrodos y se coloca un cierre hermético especial en la parte superior de la cubierta.

El sistema tiene tres electrodos de grafito que trabajan según arco sumergido, con un rendimiento eléctrico de transferencia de energía al baño del 50-75%. Para una

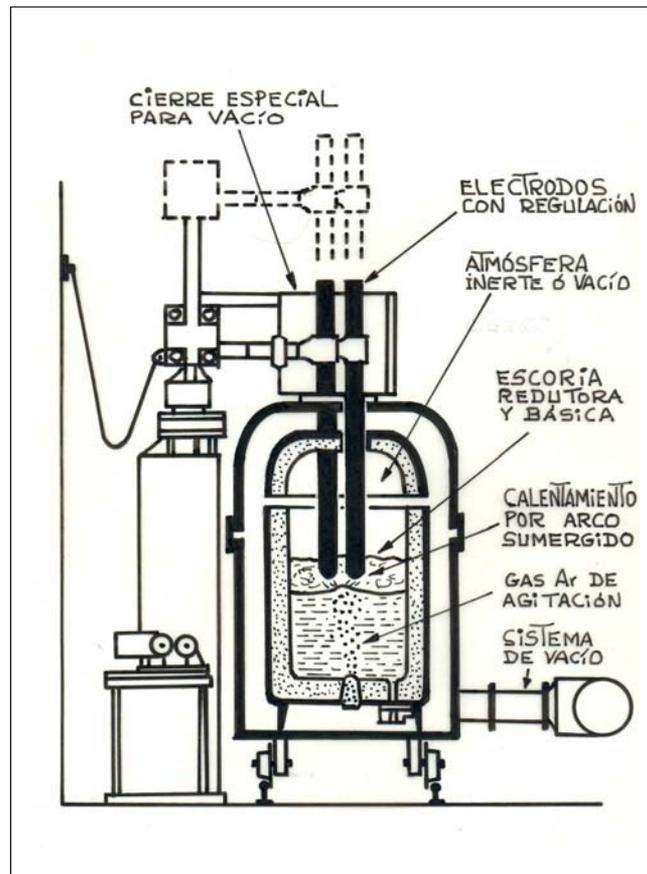


Figura 6.8: Horno-cuchara DIADO (Davey McKee)

cuchara de 250 t se emplea un transformador de 30 MVA. Parece que no se produce absorción de carbono de los electrodos por el baño. La velocidad de calentamiento es de unos 3,5 - 4,0 °C por minuto. El proceso permite que la temperatura de colada del horno de arco primario a la cuchara sea 75 °C más baja que la necesaria en desgasificado RH. Durante el calentamiento en el horno cuchara el baño se agita por gas a través de tapón poroso a razón de 1,8 metros cúbicos por minuto.

Estos hornos se han utilizado para simple recalentamiento, con tratamiento al vacío, y también para refinado con escoria. La operación dura 40 - 75 minutos, según la complejidad del proceso. Por ejemplo, para producir un acero de bajo carbono con menos de 30 ppm de azufre, 20 de oxígeno y 2 de hidrógeno, la operación demanda 10 minutos para desescoriado, 20 de vacío y 15 de refinado con escoria sintética, a los que se añaden otros 30 de ciclo de calentamiento.

La composición de la escoria sintética para desulfuración es 50 - 55% de CaO, 5 - 10% de SiO₂ y 30 - 40% de Al₂O₃. El grado de desulfuración alcanzada es del 75% gastando 1,8 Nm³/min de argón. El coeficiente de reparto escoria/metal para el azufre aumenta con la duración del soplado de argón. Por otra parte, si el contenido (FeO + MnO) de la escoria pasa de ser 2% a ser 1% el coeficiente de reparto citado se triplica (figura 6.9). Trabajando con cuidado se puede llegar a contenidos muy

bajos de azufre, del orden de 10 ppm.

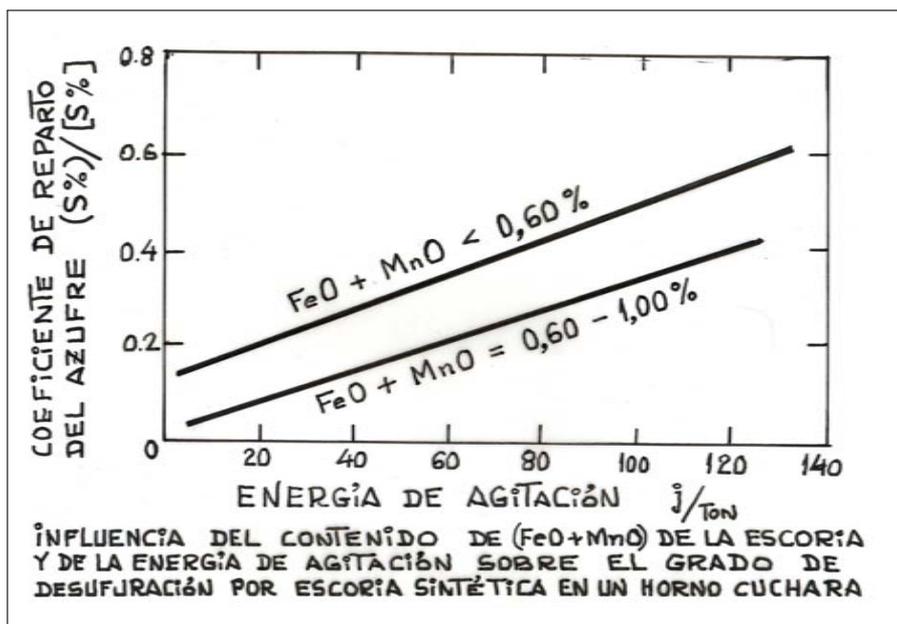


Figura 6.9: Influencia sobre el grado de desulfuración

Para desgasificado al vacío hay que emplear el cierre sellado de la tapa. El tratamiento de desgasificación se mejora soplando argón simultáneamente. Es normal disminuir el contenido de hidrógeno que era de 4 - 5 ppm dejándolo en 0,5 - 1,5 ppm, con una eliminación de hidrógeno del 75%. También se produce un 20% de eliminación de nitrógeno.

Finkl - Mohr

El horno cuchara Finkl-Mohr fue uno de los primeros procesos económicamente exitosos que emplearon el desgasificado por arco en vacío (VAD). El sistema puede tener la cuchara en tanque de vacío o con electrodos de grafito que pasan a través de cierres especiales en la cubierta del tanque (figura 6.10). Durante el calentamiento se establece un vacío parcial de 200 torr. Se barbotea argón a través de tapón poroso. Una vez completado el ciclo de calentamiento se levantan los electrodos y la presión se hace bajar hasta ser de 1 torr o menos sin dejar de barbotar argón. El sistema puede emplear escorias sintéticas para desulfuración y contar con una lanza de inyección.

Un horno VAD típico de 50 t emplea tres electrodos de 350 mm de diámetro con un transformador de 15 MVA que aportan una velocidad de calentamiento de 3 °C por minuto a un vacío de 200 torr. Durante el proceso se soplan 4-5 m³/h de argón por minuto a través del tapón poroso. Después se desgasifica el acero durante unos 30 minutos a 0,5 torr de presión. Empleando una escoria sintética adecuada, y con vacío. Se pueden producir aceros con menos de 10 ppm de azufre, 20 ppm de oxígeno, y 1,5 ppm de hidrógeno.

El proceso puede alterarse ligeramente para trabajar como descarburación por

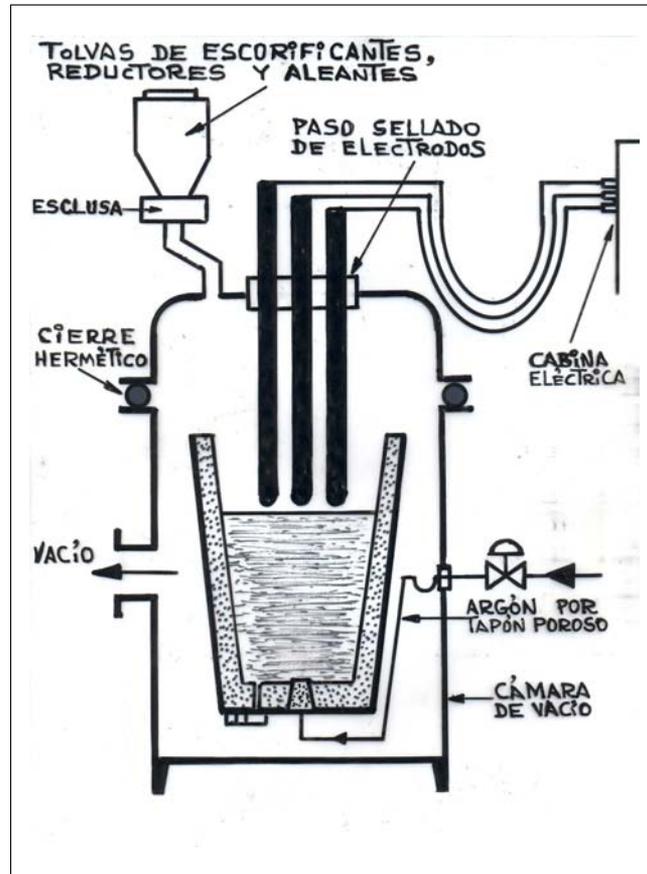


Figura 6.10: Instalación FINKL-MOHR

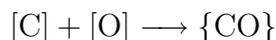
oxígeno en vacío (VOD) para obtener aceros inoxidable y de bajo carbono en general. Según esta variante, para un horno de 50 t, se inyectan 14 - 17 m³ de oxígeno a 70 torr de presión, seguido de un tratamiento al vacío a presiones menores.

6.3. Vacuum Oxygen Decarburisation VOD

El proceso VOD/LD VAC ha sido desarrollado por Edelmetallwerk Witten AG con la colaboración de Republic Steel. Se sopla oxígeno por una lanza introducida por la cubierta de la cámara o cuchara de desgasificado y a una temperatura de 1600 - 1650 °C. Se emplean cucharas de buza corredera. Durante la operación se inyecta en el fondo de la cuchara argón que produce un agitado del baño. Después del afinado y de eliminar el vacío se añade una escoria reductora para recuperar el cromo hasta el 98 - 99%. Se hacen las adiciones finales y se ajusta la temperatura colándose el acero a continuación. El control de la temperatura se hace partiendo de la temperatura del acero al iniciar la operación y de su composición. Generalmente hay una subida de 100 °C de temperatura que hay que compensar, si es preciso, con una agitación de argón o adición de chatarra.

6.3.1. Objetivo y fundamento

Este procedimiento, como otros de Metalurgia Secundaria, ha nacido para fabricar aceros extrabajos en carbono y azufre, especialmente inoxidable. Se basa en que el soplado de oxígeno, en condiciones de vacío elevado, sobre una cuchara de acero situada en una cámara hermética permite que se realice la reacción de descarbonación

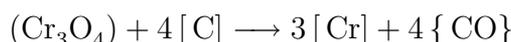


en lugar de la oxidación del cromo y paso a la escoria del óxido de cromo formado



Esto es lógico dado que la situación de vacío favorece la reacción en la que se genera un gas, CO, que escapa del baño, en lugar de la otra, en que se forma un óxido líquido, Cr_2O_3 , que pasa a la escoria.

Los procesos descarbonadores se basan en la reacción:



cuya constante de equilibrio es:

$$K_1 = \frac{A^3Cr \times p_{CO}^4}{A^4C \times A_{Cr_3O_4}}$$

En cuya ecuación A significa actividades y p presiones parciales. Si se toma la actividad del óxido crómico Cr_3O_4 como la unidad y expresando las otras actividades en términos de concentraciones en porcentaje de peso, la fórmula de equilibrio puede escribirse como sigue:

$$K_2 = \frac{(\%Cr)^3 \times p_{CO}^4}{(\%C)^4}$$

Y en consecuencia, el contenido de carbono queda así:

$$\%C = \frac{1}{K_3} (\%Cr)^{3/4} p_{CO}$$

En la que K_1 , K_2 y K_3 son funciones de la temperatura. Por lo tanto, se ve que a una temperatura dada el contenido de carbono en equilibrio será proporcional a la potencia 3/4 del contenido de cromo y a la presión parcial del monóxido de carbono.

Esta presión parcial puede reducirse aplicando vacío (procesos vacío) o diluyendo el oxígeno inyectado con un gas inerte (procesos atmosféricos, que se tratarán mas adelante).

6.3.2. Descripción del equipo

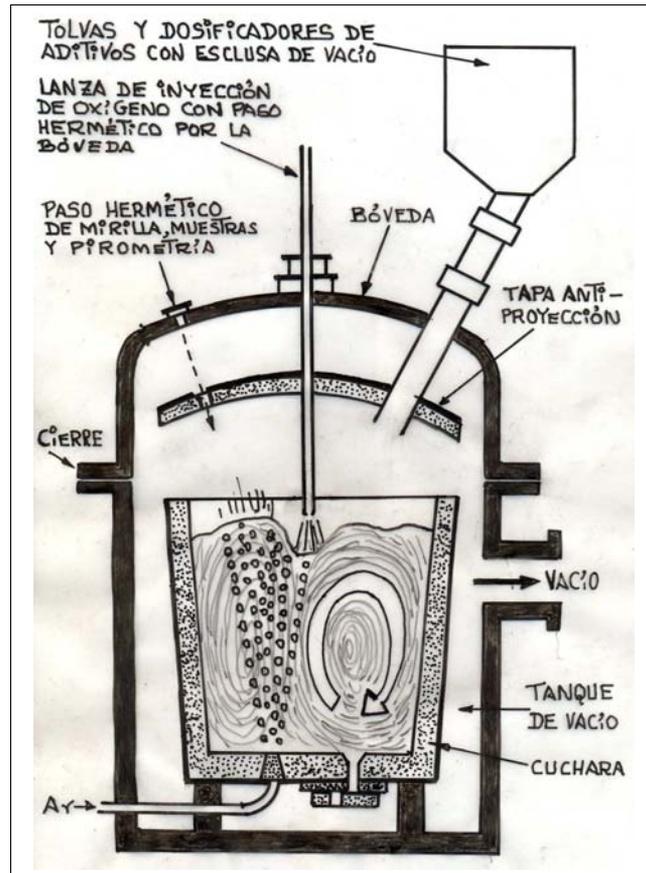


Figura 6.11: Esquema VOD

El equipo VOD consta, en esencia, de un tanque hermético en el que se introduce la cuchara que procede del horno de arco o convertidor. Este tanque se conecta a una o varias bombas de vacío de eyectores de vapor. A través de la tapa hermética pasa la lanza de soplado de oxígeno (figura 6.11). En general, hay los siguientes elementos:

- Control de temperatura del caldo.
- Toma de muestra de análisis.
- Tolvas y dosificadores automáticos de escorificantes y ferroaleaciones a presión atmosférica.
- Tolvas y dosificadores automáticos de escorificantes y ferroaleaciones con esclusa de vacío intermedia.
- Tolvas y dosificadores automáticos de chatarra refrigerante.
- Inyectores de alambre de aluminio y adiciones encapsuladas (cored wire).
- Cuarto y equipos de control con mando manual y automático.

- Cuchara de tratamiento, casi siempre con revestimiento básico, equipada de uno o varios tapones porosos para inyección de gas de agitación. La cuchara y/o la cámara cuentan también con tapas o pantallas que protegen a la bóveda y equipos auxiliares de radiación y proyecciones.

6.3.3. Práctica operativa

Las figuras 6.12, 6.13 y 6.14 dan idea resumida de la marcha del proceso que es, en líneas generales:

1. Se funde en el horno eléctrico de arco una carga formada principalmente por chatarra de inoxidable, ferrocromo carburado y con silicio, ferromanganeso carburado y, eventualmente, níquel.
2. Dentro del horno se efectúa una oxidación incompleta, que no llegue a oxidar el cromo, con lo que el carbono pasa a CO gas y el silicio se convierte en sílice SiO_2 que pasa a la escoria.
3. El acero, que ha quedado con aproximadamente 0,50 % de carbono y está a unos 1580 ° C se cuela a la cuchara. Durante la basculación se adiciona cal CaO para escorificar la sílice formada en la oxidación anterior.
4. Se introduce la cuchara en el tanque VOD de vacío, se cierra la tapa y se conectan los sistemas de soplado, adiciones y control. Se ponen en marcha las bombas de vacío hasta llegar a una presión de 70 torr. En ese momento se inicia el soplado de oxígeno (unos 800 a 1000 Nm^3/h). Simultáneamente se inyecta a través de los tapones porosos del fondo de la cuchara el gas de agitación. Ese gas suele ser argón, aunque para algunos aceros puede ser más interesante el nitrógeno. Al final de esta fase de tratamiento el acero queda a 1690 °C y con menos de 0,10 % de carbono.
5. Desgasificación en vacío. En este momento el baño de acero está fuertemente saturado en oxígeno. Se detiene el soplado a la vez que se intensifica el vacío, quedando la presión en el tanque a menos de 5 torr. Se mantiene el barboteo de gas de agitación por el fondo de la cuchara. Todo ello provoca un fuerte hervido. que enfría algo el caldo. El acero queda a unos 1650 °C y con 0,03 % de carbono y 0,05 % de azufre.
6. Ajuste final. Una vez completada la descarburación al vacío, y sin detener el barboteo de gas, se añaden las ferroaleaciones, escorificantes y fundentes a través de las esclusas de vacío, ajustando la escoria y la composición química del baño. Si es necesario se añade chatarra refrigerante (algunos equipos tienen un sistema VAD adicional por si hubiera que hacer calentamiento final). El acero está a unos 1580 ° C y con sólo 0,001 % de azufre.

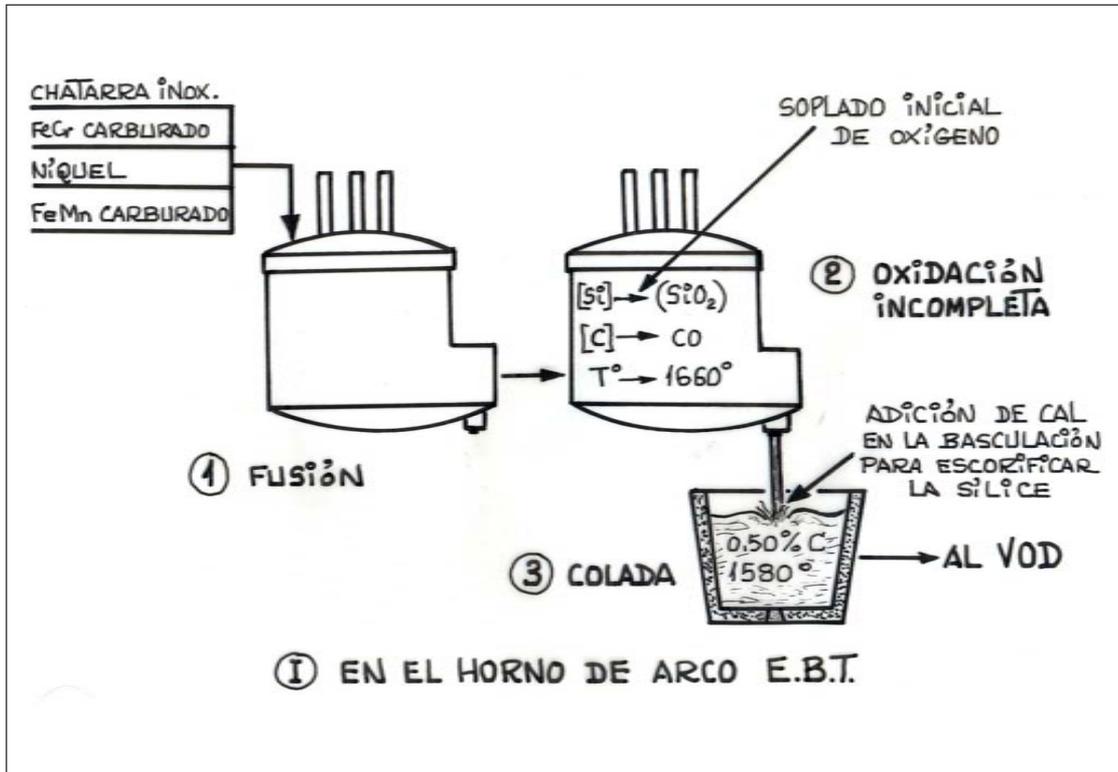


Figura 6.12: Etapas del proceso V.O.D. (1)

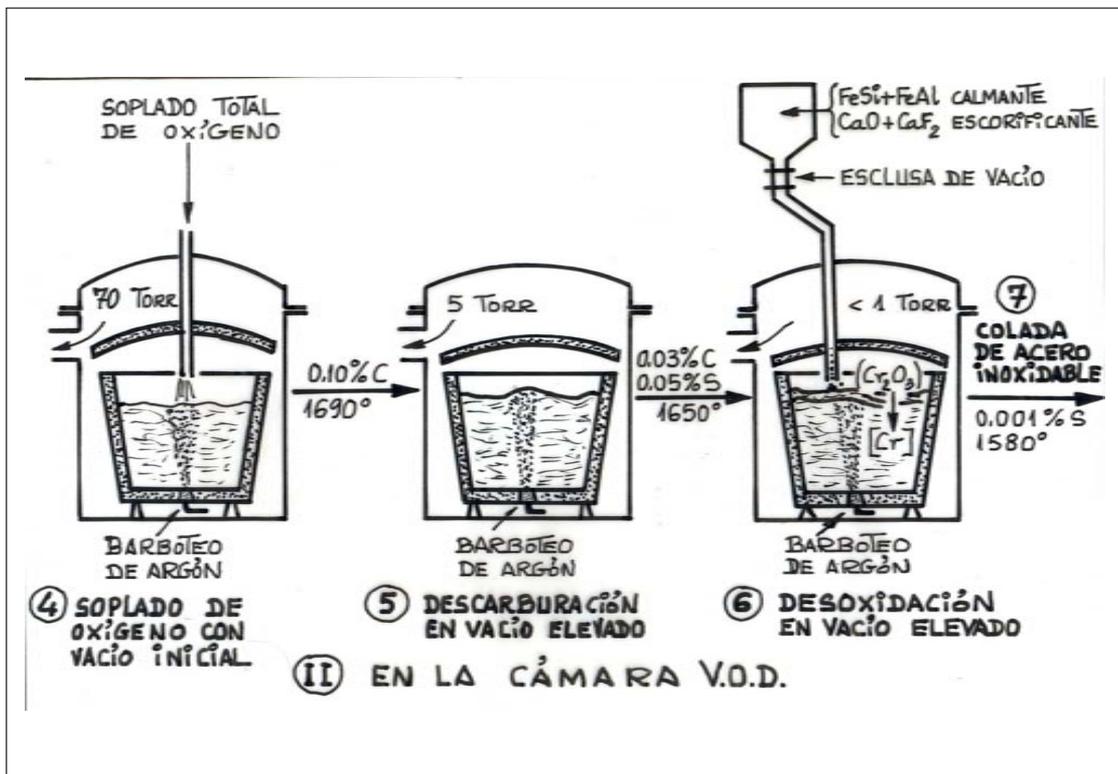


Figura 6.13: Etapas del proceso V.O.D. (2)

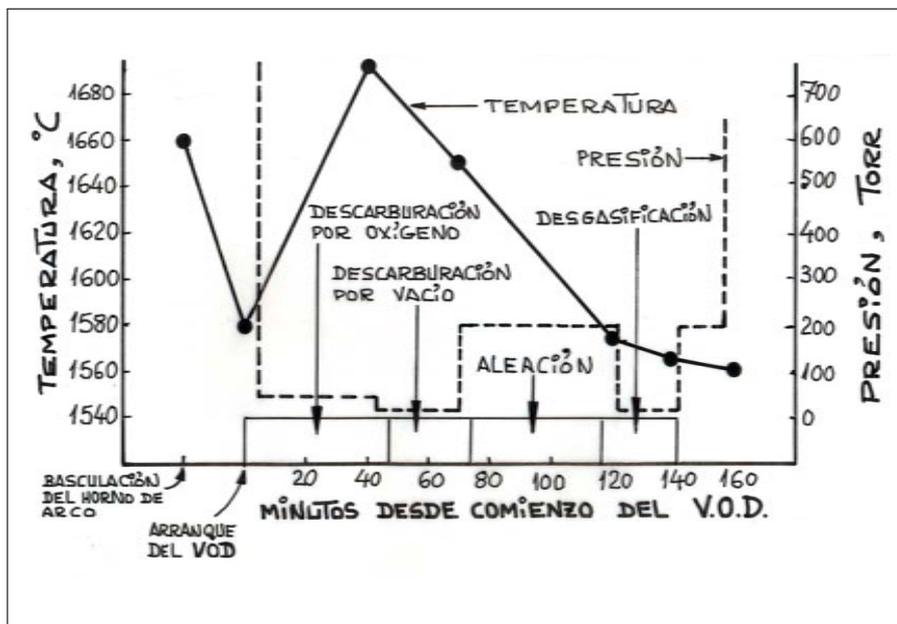
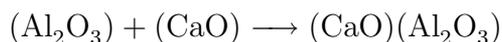
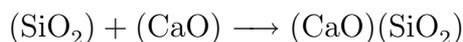


Figura 6.14: Cronología de una operación en el V.O.D.

Como calmante se añade una mezcla de ferrosilicio y ferroaluminio. Éstos reducen el óxido de cromo Cr_2O_3 que pasó a la escoria:



Los óxidos formados se combinan con la cal añadida y pasan a la escoria como silicatos y aluminatos:



El cromo retorna al baño y se recupera casi totalmente. La adición de cal se hace para escorificar la sílice y alúmina formadas en las reacciones anteriores. El espato flúor, CaF_2 actúa como fluidizante. El empleo del espato origina una ventaja adicional, y es que en el VOD una escoria de alto contenido de espato ($>15\%$) permite alcanzar una elevada tasa de defosforación de más del 90%, con lo que el acero queda con menos de 20 ppm.

6.4. Procesos derivados del VOD

Los sistemas ASV y V-R. derivados del VOD, utilizan sistemas de desgasificado clásico en los que se dispone una simple inyección de oxígeno en el vacío con algún medio para agitar el baño si éste se mantiene en la cuchara. Normalmente el medio de agitación es el argón que se muestra aquí más efectivo que las bobinas de inducción.

Los métodos de trabajo se diferencian en las presiones de oxígeno y vacío utilizados, que suele ser de 20 torr, pero se puede trabajar a 10 torr para acero de muy bajo carbono. En todos ellos el caldo a afinar y descarburar ha de llegar a la instalación de desgasificado con un contenido de carbono que no ha de ser superior a 0,5 - 0,9 %, aproximadamente.

6.5. Proceso Allegheny Vacuum Refining (AVR)

Allegheny comenzó a utilizar una instalación ASEA/SKF que posteriormente ha modificado (figura 6.15). Consiste en inyectar oxígeno por debajo de la superficie del acero. La lanza es consumible revestida con refractario. Dispone de 5 tubos de 12,5 mm de diámetro interior, dispuestos en espiral en 45° para proporcionar una distribución de oxígeno sobre el metal y también para disminuir las salpicaduras del acero.

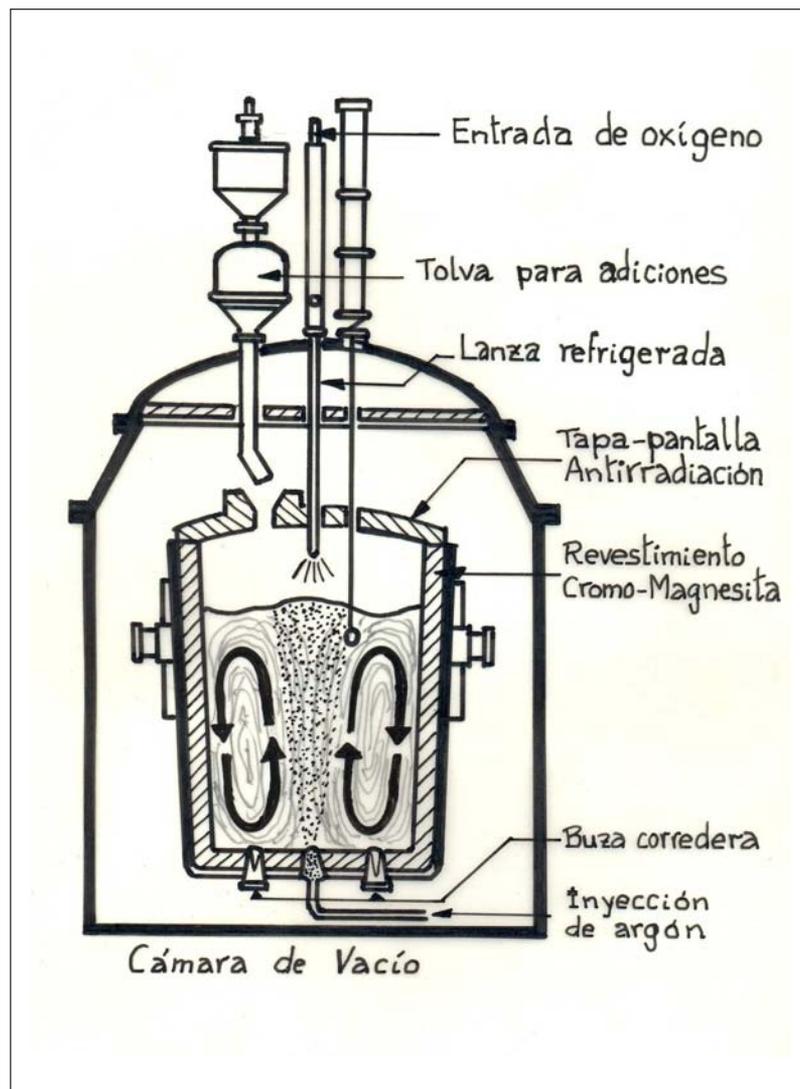


Figura 6.15: Procesos ASV y V-R

6.6. Proceso RH-OB

6.6.1. Generalidades

Este proceso, como los otros, consta de dos etapas. En la primera se funde una carga de chatarra de inoxidable en un horno de arco UHP o se obtiene arrabio en un horno alto de Siderurgia Integral. Los caldos obtenidos se tratan en estaciones desgasificadoras de vacío RH descritas en epígrafe anterior. En ellas se realiza el desgasificado, descarburación y desoxidación.

6.6.2. Descripción del equipo RH

La idea fundamental del método RH-OB consiste en colar el acero en una cuchara normal de colada. El proceso RH ya se describió suficientemente en capítulo anterior, por lo que no se explicitan excesivos detalles. De la cuchara, el acero es elevado en continuo hasta una cámara cerrada donde se hace el vacío y que se ha colocado encima de la cuchara. La aspiración se hace a través de un conducto vertical («snorkel¹») dispuesto en la parte inferior de la cámara de vacío, y que llega a introducirse en el acero líquido de la cuchara (véanse las figuras 5.11, 5.12 y 5.13 en el apartado 5.4.1). Con este equipo se consiguen ventajas metalúrgicas como:

- Descarburar y desoxidar, gracias a la reacción Vacher-Hamilton en vacío.
- Eliminar inclusiones, ya que al desoxidar no queda oxígeno para reaccionar con silicio, aluminio o cromo.
- Eliminar nitrógeno.
- Homogeneizar temperatura y composición, aumentando la fiabilidad de los controles y análisis.

La cámara se hace descender hasta que los extremos de ambos tubos están introducidos en el acero de la cuchara. Una vez sumergidos ambos tubos, se inyecta por uno de ellos, llamado tubo de elevación que está ligeramente inclinado, un chorro de gas inerte (argón casi siempre) a la vez que comienza a hacerse el vacío en la cámara.

Al cabo de unos minutos, cuando se ha alcanzado en la cámara un cierto vacío, el acero sube por la rama a la que se inyecta argón («gas lift»). La inyección del gas sirve para facilitar la aspiración del acero por esa rama que lo conduce a la cámara en la que irrumpe, sufre una fuerte atomización y se desgasifica.

En algunas unidades la elevación se hace mediante bobinas inductivas («Proceso Stokes», «induction lift») en lugar de la inyección de argón. El acero cae por gravedad a través del segundo tubo y pasa a la cuchara, estableciéndose una circulación continua del acero al pasar por la cámara, donde se desgasifica.

» ¹Recibe el mismo nombre que el tubo que permite a los submarinos de propulsión Diesel-eléctrica el intercambio de gases de combustión con el exterior

En esta operación suelen pasar a la cámara de desgasificación unas 15 t de acero por minuto. Si se utilizan cucharas de 120 t la operación suele durar unos 20 minutos. La pérdida de temperatura con cucharas de 100 t es de unos 25 °C. Con cucharas más pequeñas, de 40 t, el descenso es de unos 45 °C. En cuanto al tamaño de la cámara de desgasificado o reactor RH, es bastante menor que el de la cuchara de colada.

En este procedimiento, los elementos de aleación pueden añadirse a la cuchara después del desgasificado. La circulación se mantiene algún tiempo a continuación de las adiciones para asegurar una repartición adecuada.

El consumo de argón es de unos 200 l por tonelada de acero.

6.6.3. Descripción del proceso RH-OB

Las figuras 6.16, 6.17 y 6.18 representan esquemáticamente el proceso tal como fué desarrollado por la Nippon Steel Corporation.

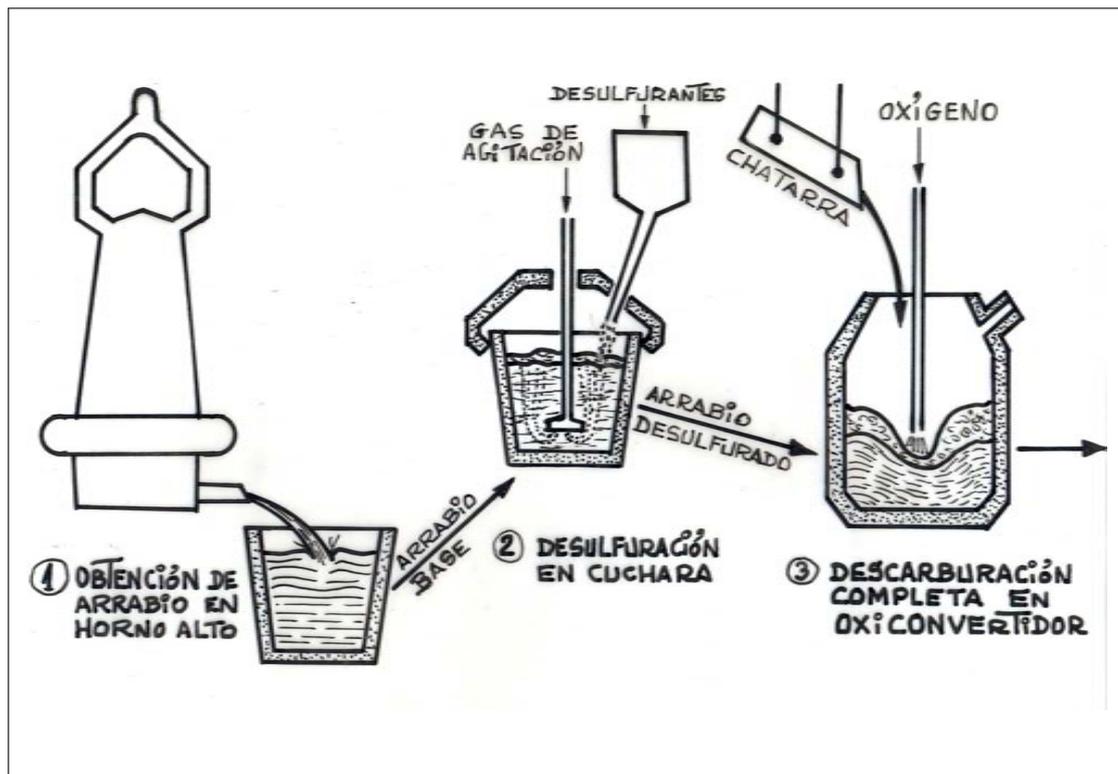


Figura 6.16: Etapas del proceso RH-OB (1)

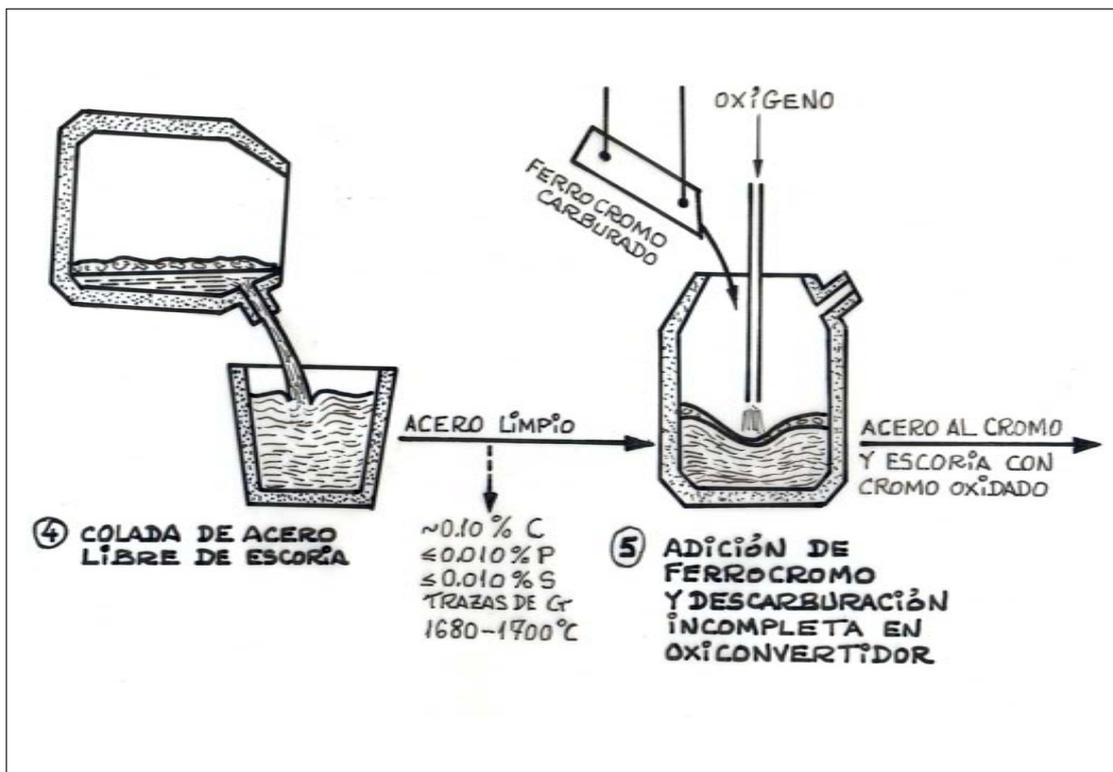


Figura 6.17: Etapas del proceso RH-OB (2)

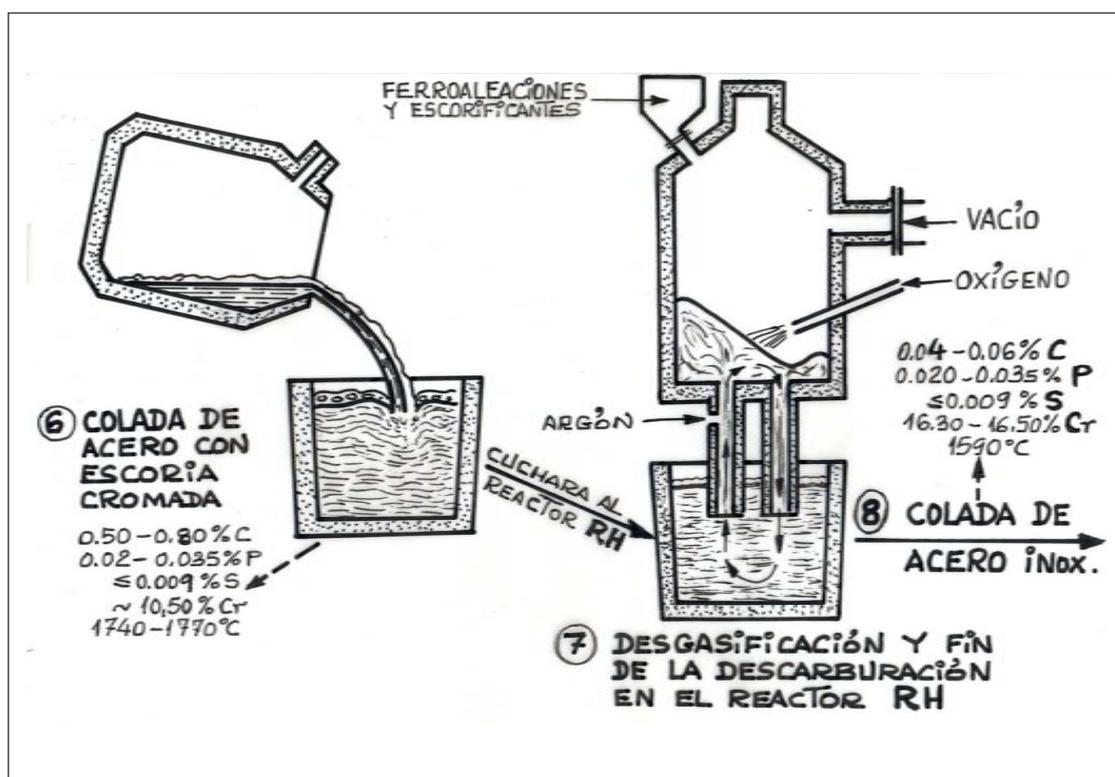


Figura 6.18: Etapas del proceso RH-OB (3)

Este proceso, en síntesis, es como sigue:

1. Se «pincha» el horno alto y se saca una cuchara de arrabio.
2. La cuchara se pasa por una estación de tratamiento en la que se le somete a una desulfuración según el proceso KR (6.19 y 6.20).
3. Se pasa el caldo de la cuchara, junto con chatarra refrigerante, a un convertidor LD. Allí se sopla oxígeno hasta completar descarburación. Al final del soplado el metal tiene la siguiente composición:

$$\begin{array}{l} \approx 0,100 \%C \quad < 0,010 \%P \quad < 0,010 \%S \\ \text{Trazas de Cr} \quad \text{Temperatura} = 1680 - 1700 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

4. Se cuela el acero, libre de escoria, a la cuchara. Para ello el líquido se saca del convertidor por la piqueta de colada normal.
5. Se bascula el convertidor hacia el lado contrario para extraer la escoria oxidada y fosforada que se formó en la operación anterior. Después se devuelve el caldo de la cuchara al convertidor, haciendo también la adición fría de ferrocromo carburado de acuerdo a la especificación prevista de este elemento. A continuación se vuelve a soplar oxígeno para oxidar parcialmente el carbono del baño. Como es lógico suponer, parte del cromo se habrá oxidado y pasa a la escoria como Cr_2O_3 .
6. Se bascula nuevamente el convertidor a la cuchara. Esta vez no se hace por la piqueta de metal sino al contrario, a fin de no perder la escoria y su contenido de óxido de cromo. Las características del baño ahora son:

$$\begin{array}{l} 0,50 - 0,80 \%C \quad 0,020 - 0,035 \%P \quad < 0,009 \%S \\ \approx 10,50 \%Cr \quad \text{Temperatura} = 1740 - 1770 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

7. Se lleva la cuchara hasta el reactor RH, en el que, en condiciones de vacío se sopla con oxígeno hasta descarburación total. Se produce la desgasificación y se hace la adición del resto de los reductores, escorificantes y ferroaleaciones. En estas condiciones, el óxido de cromo se reduce y el metal contenido en él retorna al baño de la cuchara. El acero contenido en ella tiene ahora las siguientes características:

$$\begin{array}{l} 0,040 \% - 0,060 \%C \quad 0,020 - 0,035 \%P \quad < 0,009 \%S \\ 16,30 - 16,50 \%Cr \quad \text{Temperatura} = 1590 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

8. El acero inoxidable obtenido se lleva a colada en lingoteras o en máquina de colada continua.

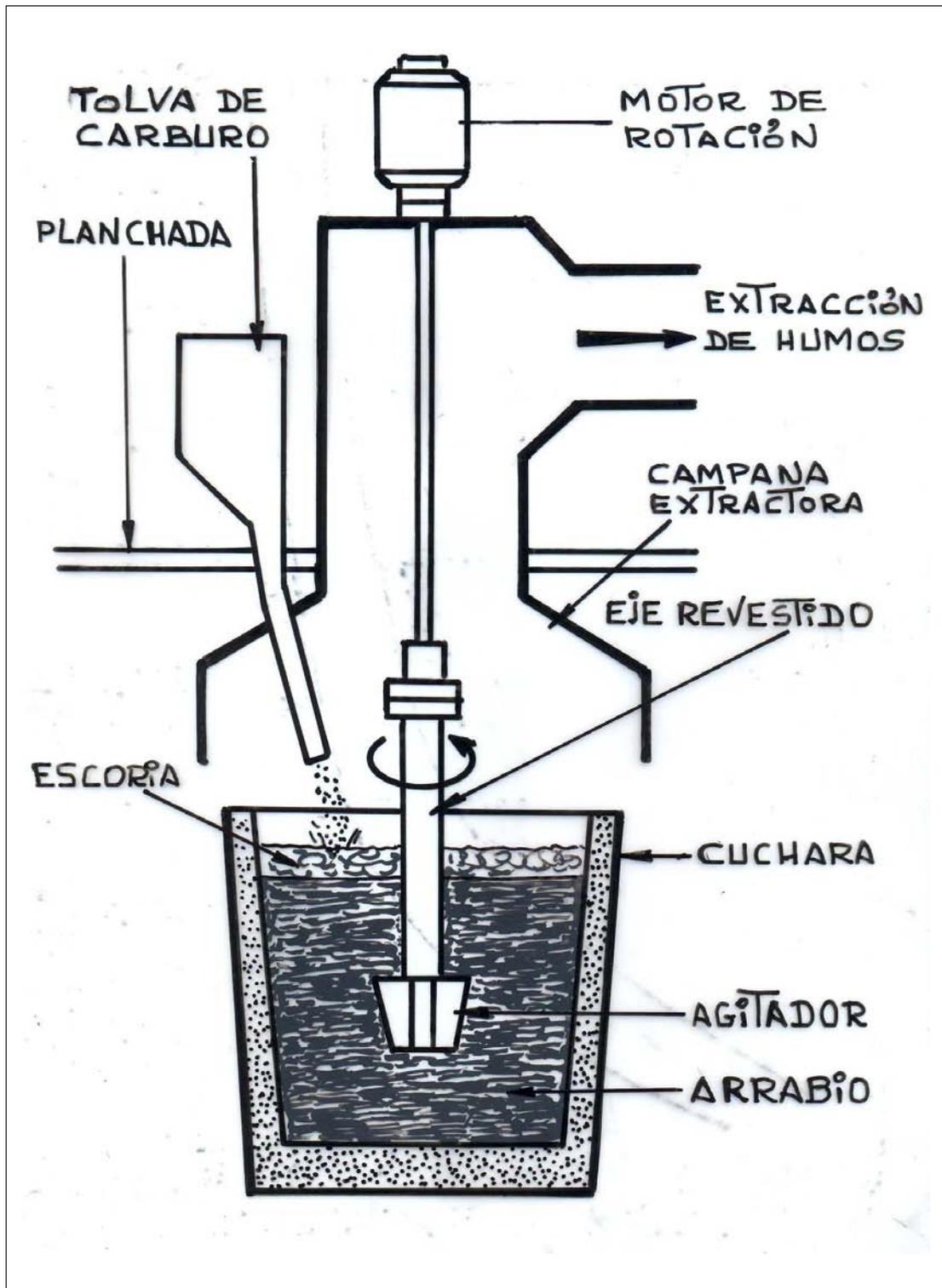


Figura 6.19: Desulfuración KR (Nippon Steel) de arrabio con carburo cálcico

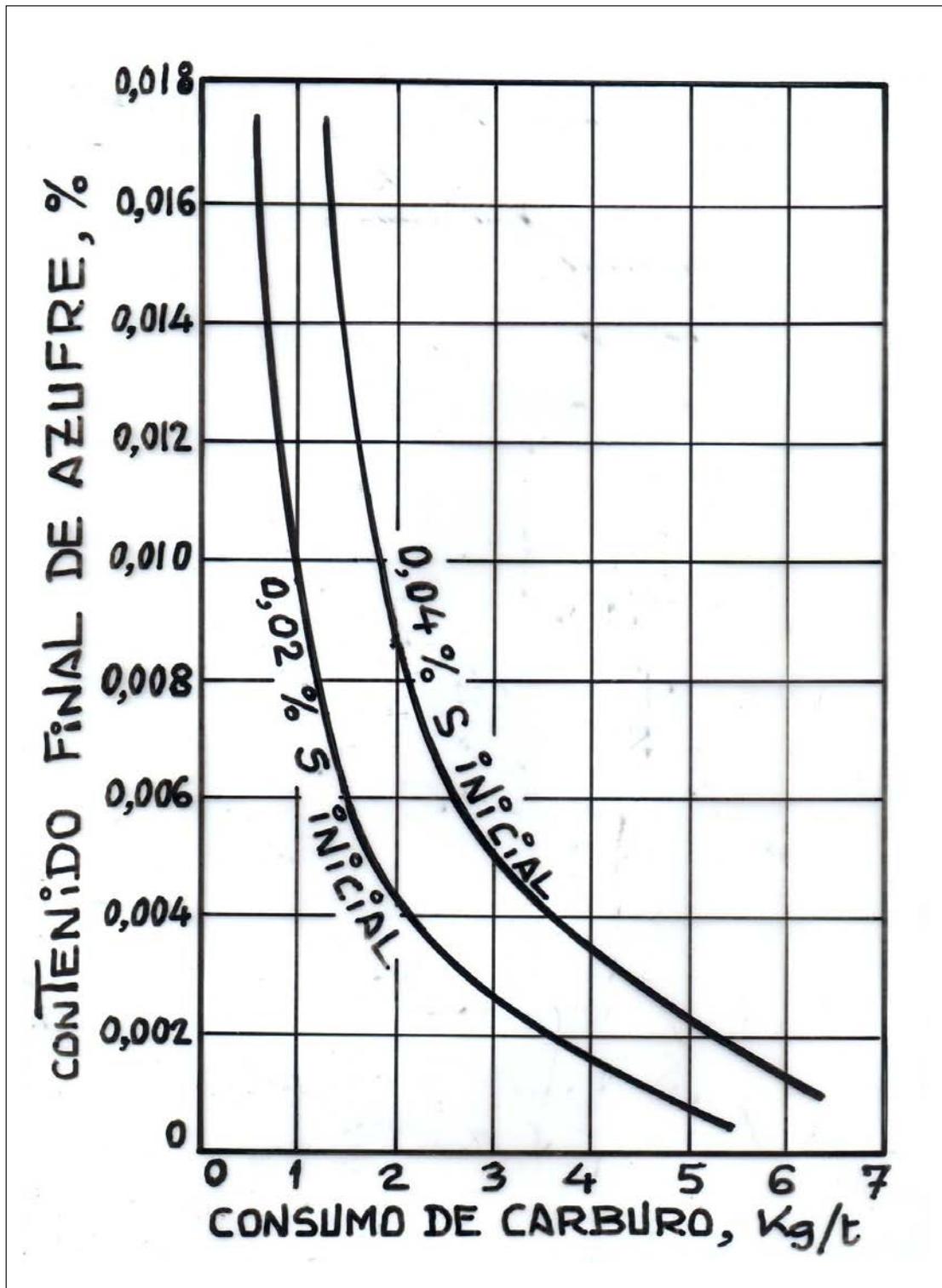


Figura 6.20: Eficiencia del carburo cálcico en la desulfuración de arrabio por el proceso KR-Rheinstahl

Capítulo 7

PROCESOS ATMOSFÉRICOS SIN APORTACIÓN TÉRMICA

7.1. Generalidades

Hay una serie de procesos de Metalurgia Secundaria, realizados a presión atmosférica, de los que se podría decir que son menos ambiciosos en sus objetivos que los procesos al vacío. Sin embargo su costo es bastante inferior. Por ello son muy favorables en acerías que persiguen mejorar la calidad de sus productos sin realizar inversiones fuertes, tanto en equipos como en la propia operación. Estos procesos que podrían denominarse como "modestos", tienen en común varias características:

- Se realizan a presión atmosférica.
- Todas las operaciones en la misma cuchara.
- Comportan inyección y barboteo de argón.

Ahora se revisan las ventajas, limitaciones y consideraciones especiales de estos procesos de metalurgia en cuchara. Es indudable que cualquiera que sea el proceso implica un enfriamiento que ha de compensarse con la obtención de temperaturas de colada superiores, lo que comporta algunas desventajas como:

- En convertidores de Siderurgia Integral obliga a disminuir la adición de chatarra y aumentar proporcionalmente la de arrabio líquido.
- En hornos de arco hay mayor consumo eléctrico y de electrodos, con mayor duración de colada.
- Sea cual fuere el proceso hay mayor desgaste de refractarios.
- Las temperaturas elevadas frenan la defosforación.

Otras circunstancias que son ventajosas se tratan a continuación:

1. Mejor desoxidación. El primer elemento, y uno de los más críticos en metalurgia en cuchara es llevar a cabo una desoxidación eficiente. Ésta puede alcanzarse empleando escorias adecuadas de cuchara y nuevas técnicas de adición de aleaciones, empleo de sensores de oxígeno, correcto barboteo de argón para flotación de inclusiones y empleo de buzas sumergidas o protegidas especialmente en la colada continua. Puede haber algún problema en la colocación de buzas y tapones de barboteo.
2. Retención de escoria. En la mayoría de los procesos es preciso minimizar la cantidad de escoria que escapa del horno a la cuchara. Esto es esencial para desulfurar y para obtener aceros extra-limpios.
3. Agitación por gas. Vía lanza o tapón poroso homogeneiza composición y temperatura y provoca la flotación de las inclusiones. Puede hacerse uso de ella para acelerar las reacciones metal-escoria tales como la desulfuración con escorias sintéticas. Para homogeneización es importante emplear bajos caudales de flujo, terminando siempre con un soplado suave. Los beneficios de la agitación con gas compensan sobradamente sus desventajas y deben ser tenidos en cuenta para la mayoría de los aceros.
4. Procesos con escorias sintéticas. Pueden adicionarse escorias sintéticas para ayudar a la eliminación de inclusiones y llegar a desulfurar hasta menos de 0,006 %. Todo ello con la ventaja de necesitar una inversión de capital relativamente modesta y sin equipos especiales. Para desulfuración sintética ha de tenerse en cuenta:
 - Mayor temperatura de colada.
 - Eficiente retención de escoria oxidada.
 - El acero puede absorber hidrógeno.
 - Puede haber resultados inconsistentes debidos a procesos o escorias sintéticas no uniformes.
 - No se obtiene control de forma de sulfuros.
5. Metalurgia de inyección. La inyección de reactivos tales como CaSi y flujos (fundentes) especiales reduce los niveles de azufre hasta 0,002 % o menos y permite alcanzar control de forma de óxidos y sulfuros. Algunas desventajas son la obligación de colar a mayor temperatura, necesidad ineludible de retención de escoria, posibilidad de captación de hidrógeno y necesidad de equipo especial. Las necesidades de implementación de equipo son función de los tipos de aceros a producir y de la técnica de colada empleada.
6. Cucharas calentadas por arco. Estos sistemas pueden satisfacer todas las necesidades del acerista, menos el costo. Este proceso elimina la necesidad de temperaturas altas de colada y facilita la colada secuencial. Estas unidades están equipadas para agitar, desulfurar, defosforar, descarburar, desgasificar por vacío e inyectar productos en el acero. Presentan las desventajas de tener un costo de inversión relativamente alto, mayor tiempo de afino y limitación de espacio en las naves de acería.

7. Tierras raras. Pueden emplearse especialmente para control de forma de sulfuros. Sin embargo, para que su utilización sea efectiva, los aceros deben desulfurarse hasta quedar con menos de 0,010 % de azufre. Es poco normal que estos aceros se cuele en máquinas de colada continua porque las inclusiones que se forman bloquearían las buzas de colada.
8. Inyección de alambre de calcio. Puede emplearse alambre (o encapsulado) de calcio o CaSi inyectados para controlar forma de óxidos o sulfuros. En particular, en operaciones de colada continua en las que no se dispone de sistema de inyección de CaSi pulverizado, pueden adicionarse pequeñas cantidades de alambre de Ca o CaSi a fin de convertir las inclusiones de alúmina en aluminato cálcico líquido que no atranca las buzas de colada. Estos «alambres» pueden inyectarse también, si se desulfura con escorias sintéticas, para controlar la forma de los sulfuros. Presenta la desventaja de su costo relativamente alto y la aplicación limitada.

7.2. Selección del proceso

Está sobradamente constatado que el problema con el que se encuentra una empresa acerista no es instalar o no un equipo y operativa de metalurgia en cuchara sino qué sistema implantar según sus necesidades y objetivos. Para adoptar una decisión acertada de elección entre los diferentes procesos es preciso conocer los principios básicos, ventajas y limitaciones de todos y cada uno de ellos. Es decir, que antes de seleccionar el proceso deben ponderarse muchas circunstancias, entre las que se encuentran:

1. Conocer los tipos de aceros que se están fabricando normalmente en la acería en cuestión y discernir la influencia de cada proceso en la obtención de ellos.
2. Deben considerarse calidades normales de aceros que no se están fabricando en esa planta pero que podrían producirse si se instalara un equipo de metalurgia en cuchara.
3. Hacer un estudio o previsión del desarrollo de nuevas calidades de acero. Por ejemplo, si aparece mercado para aceros de bajo fósforo o ultrabajo carbono ver qué procesos podrían fabricar esos aceros.
4. Examinar los equipos y prácticas actuales y futuras de la planta en cuestión y discernir cómo se adaptaría a ellas la metalurgia en cuchara. Por ejemplo, si se va a instalar una máquina de colada continua qué proceso en cuchara sería el más adecuado para ella.
5. Cómo afectaría la práctica en cuchara al resto de las operaciones de acería. Por ejemplo, el efecto de aumentar la temperatura de colada en la acería, planificación de coladas y posible necesidad de otros equipos tales como calentadores de cuchara o refractarios especiales.

6. Finalmente, deben considerarse procedimientos metalúrgicos alternativos. Por ejemplo, si se desea llegar a aceros con menos de 0,010 % de azufre, este objetivo puede conseguirse por desulfuración previa del metal líquido (arrabio) o selección de chatarras posiblemente a un costo menor que la desulfuración en cuchara. En la figura 7.1 se representa el proceso Hoesch para desulfuración de arrabio, desarrollado por Vacuum Metallurgie GmbH (Vacmetal).

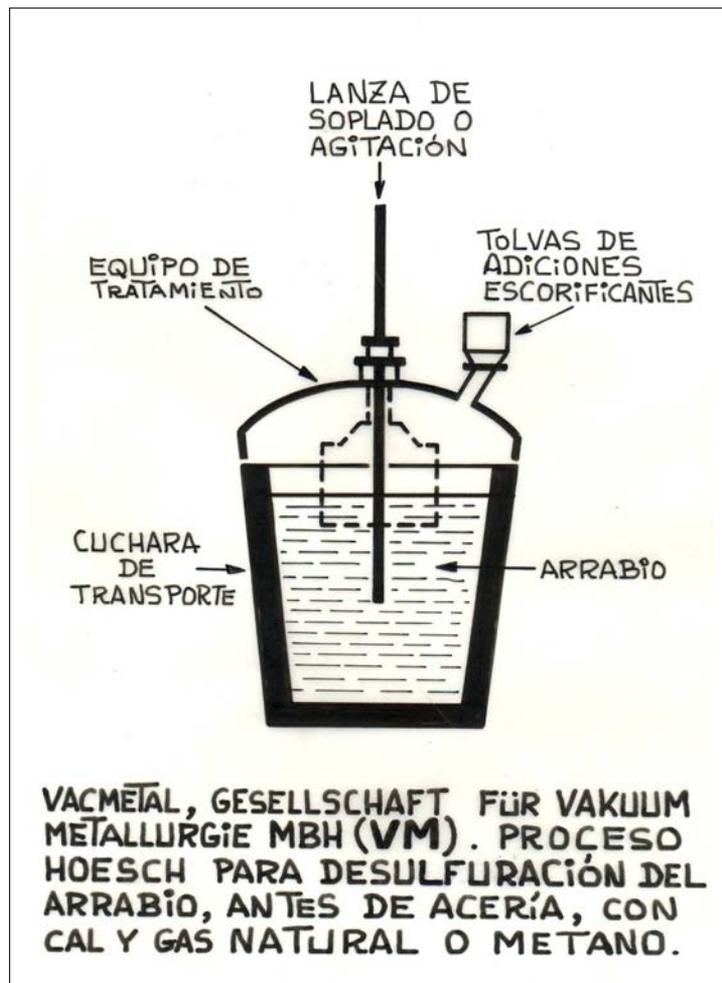


Figura 7.1: Proceso Hoesch.

Algunos procesos atmosféricos sin caldeo adicional se describen a continuación.

7.3. Purga de argón (Argon Purge, AP)

Es el sistema más sencillo y barato con que se cuenta. Consiste, simplemente, en barbotar argón, u otro gas inerte, a través del baño. Este gas se insufla mediante una lanza protegida con refractario (figuras 7.2 y 7.3) o tapón poroso (figuras 7.4 y 7.5). Se pueden añadir reductores para desoxidación, manteniendo sobre el baño una escoria sintética desulfuradora. La reacción entre los desoxidantes, una vez disueltos en el acero, y el oxígeno es muy rápida y se alcanza pronto el equilibrio. Los

productos de la desoxidación (inclusiones) son flotados después hacia la superficie donde son atrapadas por la escoria.

Para garantizar homogeneización de los desoxidantes en el acero y forzar la eliminación de las inclusiones es fundamental el barboteo de argón, sea por lanza o por tapón poroso. Desde el punto de vista práctico es aconsejable mantener un caudal de soplado relativamente alto durante la colada del horno de arco a la cuchara para garantizar homogeneización y un caudal bajo después de la colada para que floten las inclusiones formadas. A partir de ahí, si el caudal es excesivo, las inclusiones podrían volver a sumergirse en el baño; por otra parte, las salpicaduras podrían reoxidar el acero. Así, durante la basculación se soplarían, a una cuchara de 200 t, 25-35 m³/h que después se rebajarían hasta 5-8,5; subiendo a continuación a 10-14.

Ha de tenerse en cuenta la circunstancia técnico-comercial de que muchos de estos procesos fueron desarrollados por la entonces Union Carbide como vehículo de obtención de clientes de gas argón.

La figura 7.6 muestra gráficamente el descenso de contenidos de oxígeno total y disuelto durante esta operación. Barbotar argón más de 8 minutos no produce ya ningún beneficio y, por el contrario, se derivarían excesivas pérdidas de temperatura, posible reoxidación y captación de nitrógeno. Las escorias sintéticas son favorables de cara a la absorción de inclusiones perjudiciales de óxidos; en este sentido, es favorable una escoria basada en CaO-CaF₂.

Eliminar oxígeno implica eliminar inclusiones, como se muestra en la figura 7.7.

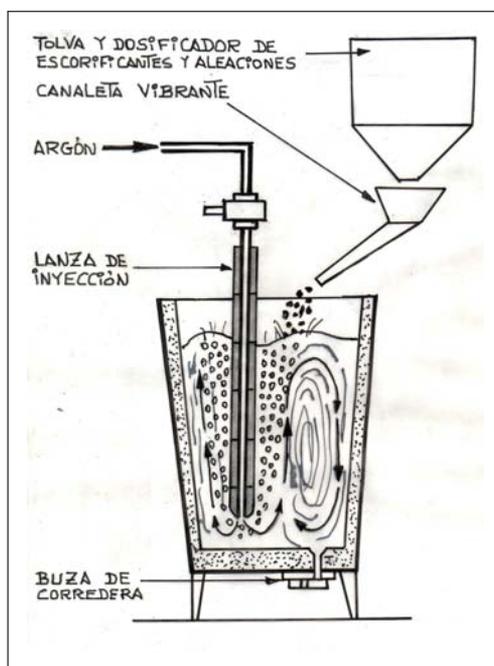


Figura 7.2: Purga de argón con lanza inyectora

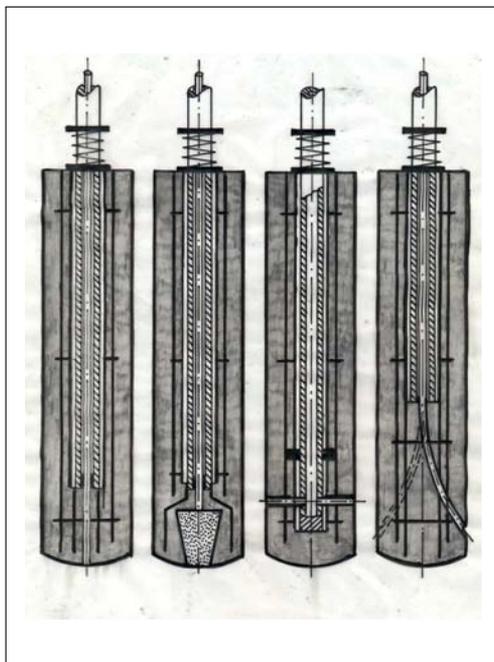


Figura 7.3: Lanzas Didier-Werke para el soplado de gases e inyección de materias pulverulentas



Figura 7.4: Purga de argón a través de tapón poroso A.P.

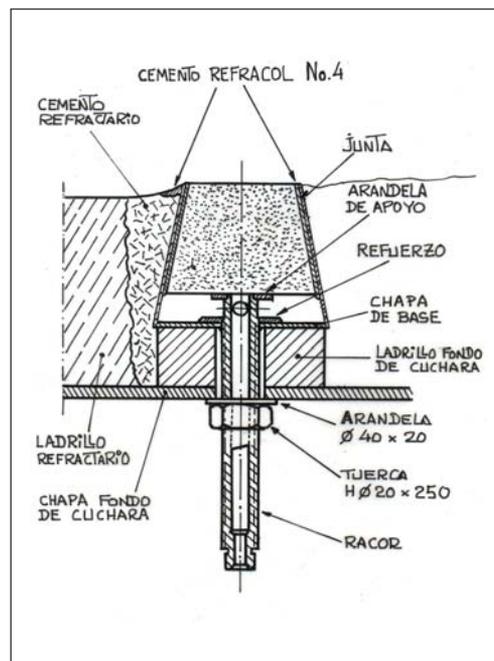


Figura 7.5: Esquema de montaje de ladrillo poroso para borboteo de gas a través de cuchara

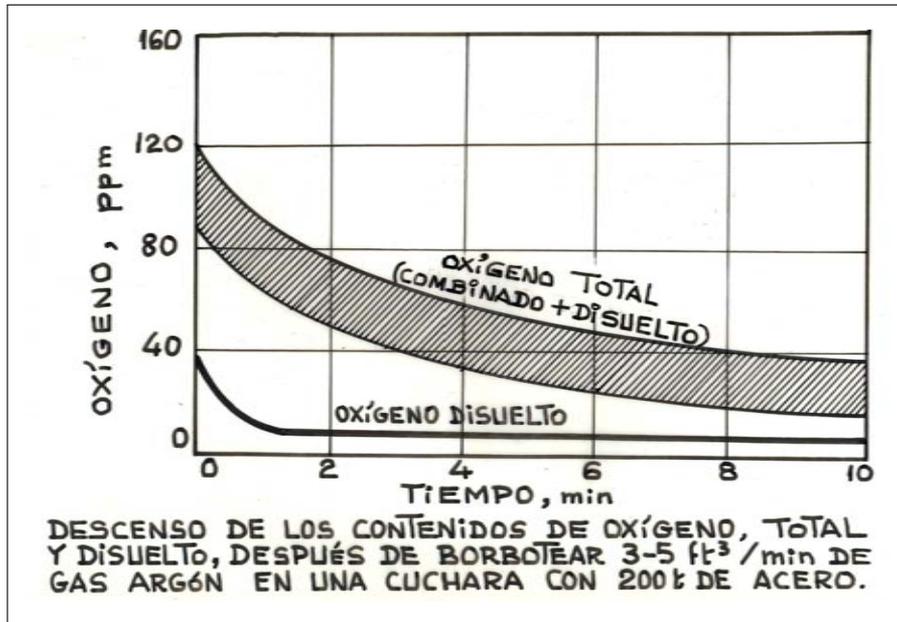


Figura 7.6: Purga de argón a través de tapón poroso A.P.

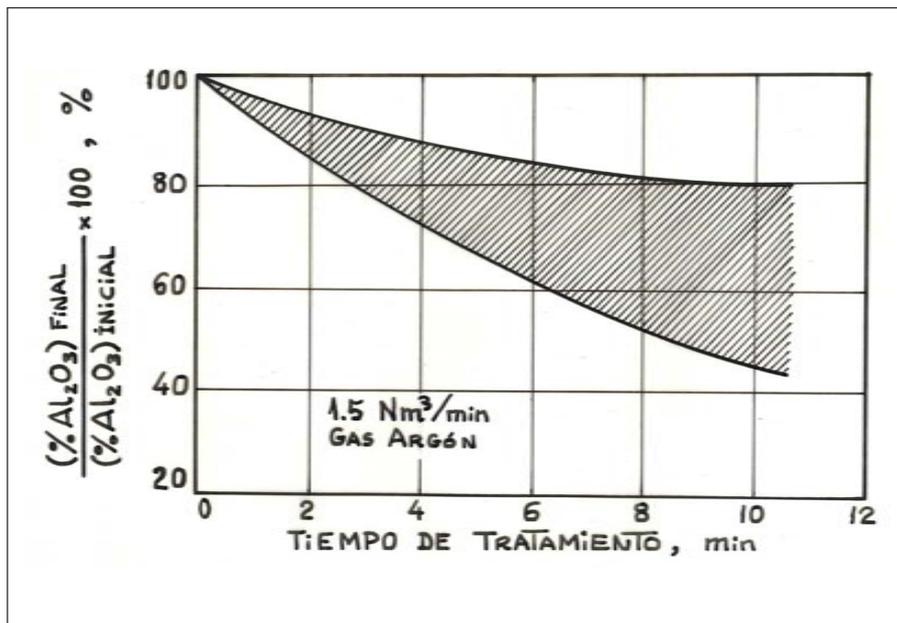


Figura 7.7: Eliminación de inclusiones por borbotado de gas

7.4. Método Convencional

Es un proceso bastante sencillo (figura 7.8). Se insufla gas inerte en el fondo de la cuchara mediante lanza protegida o tapón poroso. Esta inyección de gas tiene un papel doble. Por un lado la zona de la superficie del baño donde aflora el chorro de gas inerte («plume») que hace resbalar la escoria hacia otras zonas de la superficie del baño. Esta zona libre de escoria es la que se llama «calva». Sobre ella caen las ferroaleaciones y escorificantes los cuales gozan de garantía máxima de digestión por el acero líquido. Por otro lado, y al igual que ocurre en otros procesos, las burbujas de argón arrastran la superficie los gases e inclusiones que nadan en el acero.

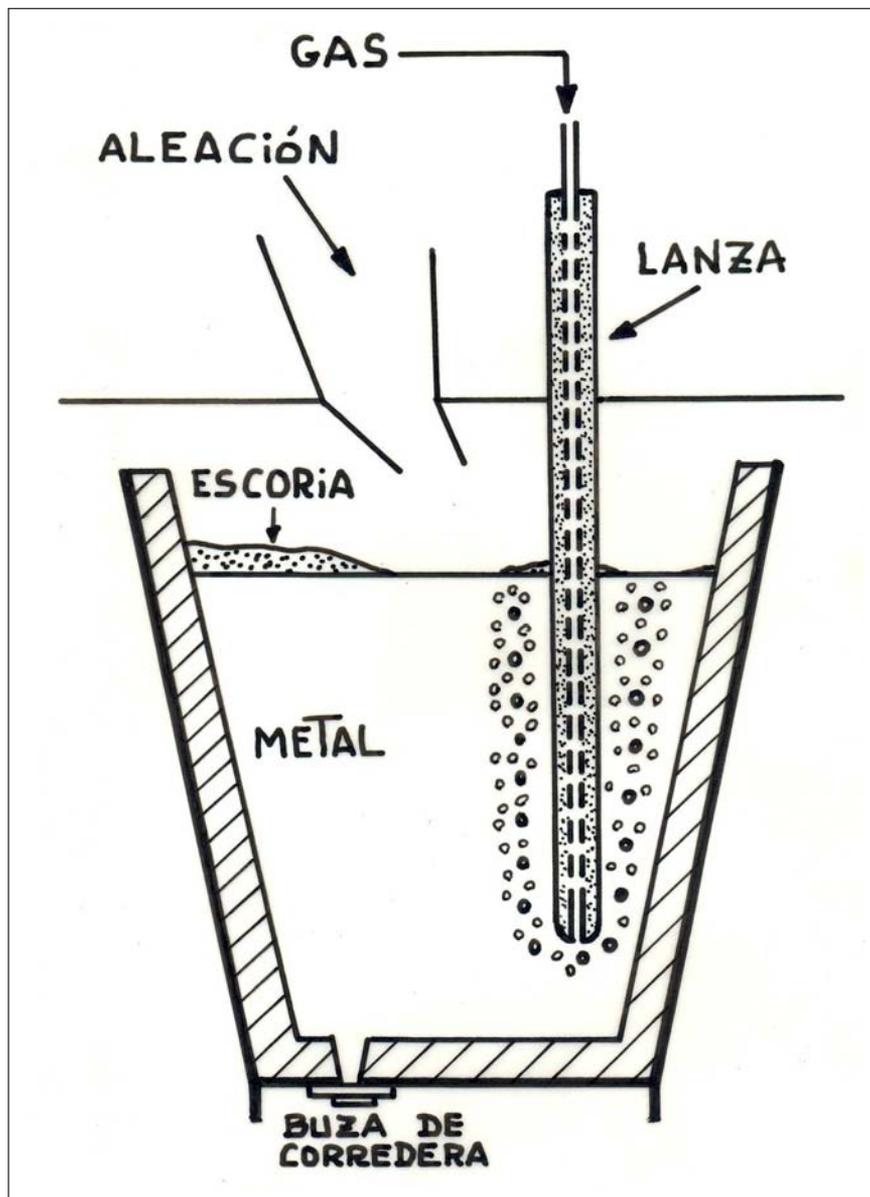


Figura 7.8: Adiciones en cuchara. Método convencional

7.5. Capped Argon Bubbling (CAB)

Este método de barboteo de argón bajo cámara cerrada es muy parecido al descrito en el epígrafe anterior (figura 7.9). La tapa tiene dos ventanas como mínimo. Una de ellas es una mirilla donde se observa el proceso o se introducen cañas piro-métricas, lanzas de toma de muestras, etc.. Sobre la otra se disponen las tolvas de aditivos con sus correspondientes dosificadores automatizados.

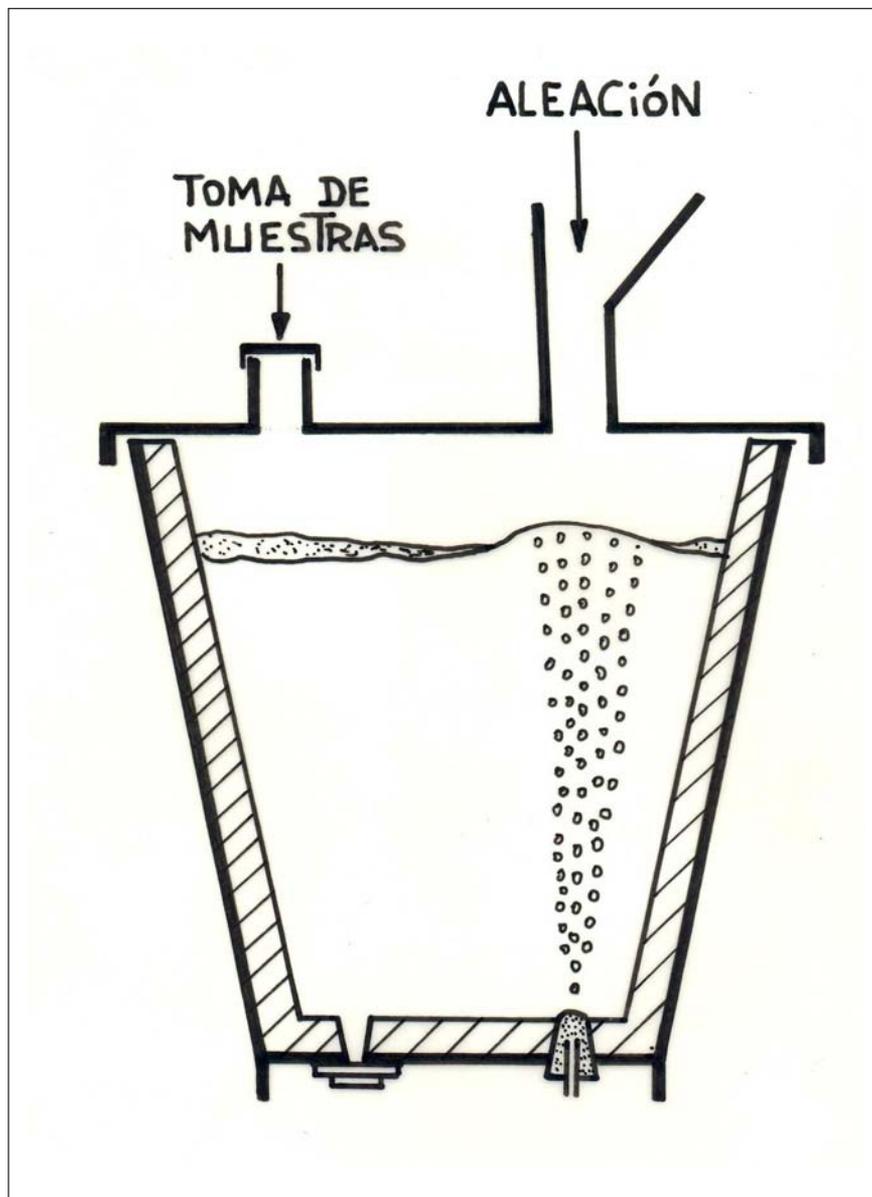


Figura 7.9: Adiciones en cuchara. Capped Argon Bubbling (CAB)

7.6. Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling (CAS)

También denominado Sealed Argon Bubbling. Difiere del antes citado (CAB) en ser ligeramente más sofisticado, especialmente en la adopción de atmósferas protectoras (figura 7.10). La tapa de cuchara tiene una campana cuya parte inferior se sumerge en el baño dando así lugar a una cavidad estanca.) En esa cavidad desemboca el chorro emergente de gas insuflado por el tapón poroso, el cual chorro forma la «calva» citada en los procesos anteriores. En la cámara se conecta la entrada de gas de protección que evita la oxidación de las adiciones reductoras y aleantes, las cuales caen desde la tolva correspondiente justamente sobre la calva, facilitándose así su digestión por el acero líquido.

Una variante de este proceso es el CAS-OB que es este mismo proceso al que se dota de una lanza de oxígeno para descarburar y aportar energía adicional.

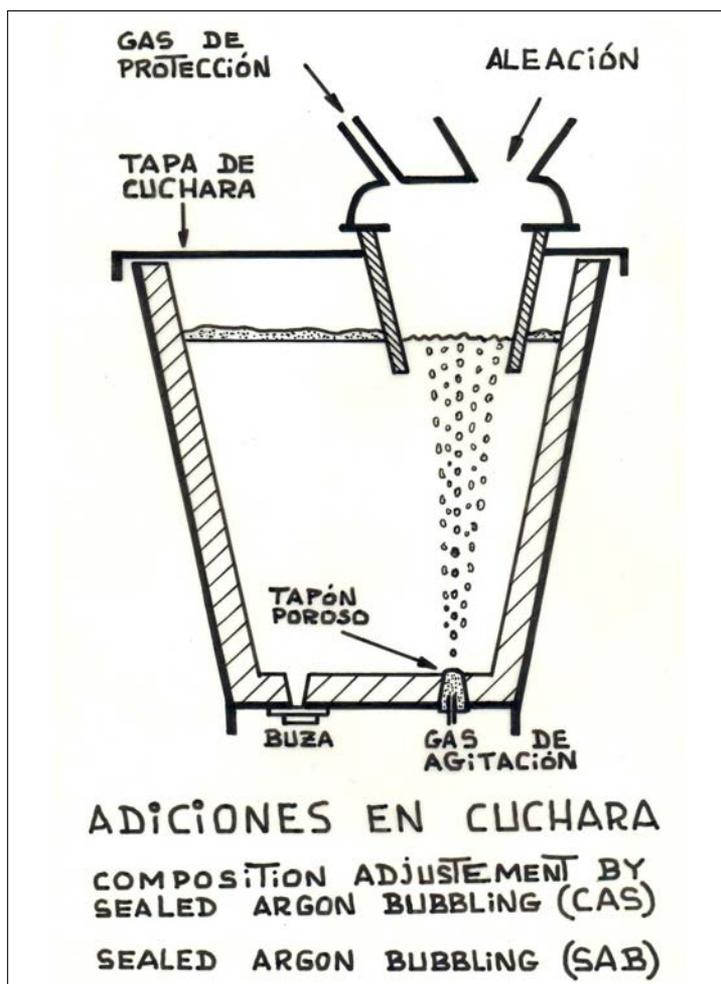


Figura 7.10: Adiciones en cuchara.

7.7. Adición mediante alambre (Cored Wire)

La dosificación del aluminio empleado para desoxidación, control de tamaño de grano, y del calcio para modificación de la morfología de las inclusiones, puede hacerse por medio de alambre o encapsulado de calcio metal o de silico-calcio. El alambre se introduce a gran velocidad en el acero mediante un mecanismo especial (figura 7.11). Al mismo tiempo puede agitarse el acero mediante barboteo de argón. Este procedimiento es de uso extendido en las empresas siderúrgicas españolas desde 1985, con resultados muy satisfactorios.

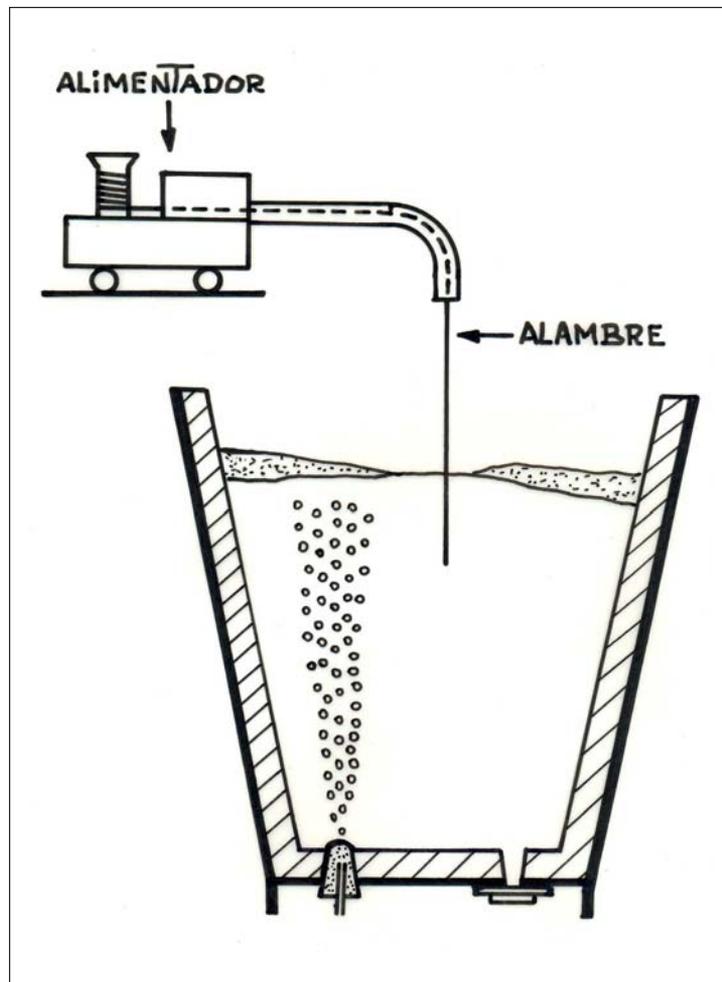


Figura 7.11: Adiciones en cuchara. Alimentación de alambre

En la figura 7.12 se representa una instalación completa de alimentación de encapsulado. Montado sobre un plataforma giratoria están la propia máquina inyectora del hilo, la columna y brazo de sujeción y ascenso-descenso de la lanza de insuflación de gas, el sistema de ascenso-descenso de las cañas de toma de muestras, sensor de temperatura y controlador de inmersión de la lanza y, finalmente, un lingote (palanquilla o slab) destinado a refrigerar el baño si fuera preciso.

En la figura 7.13 se tiene una gráfica que presenta la eficiencia desulfuradora de la adición de calcio encapsulado y la compara con otros dos métodos.

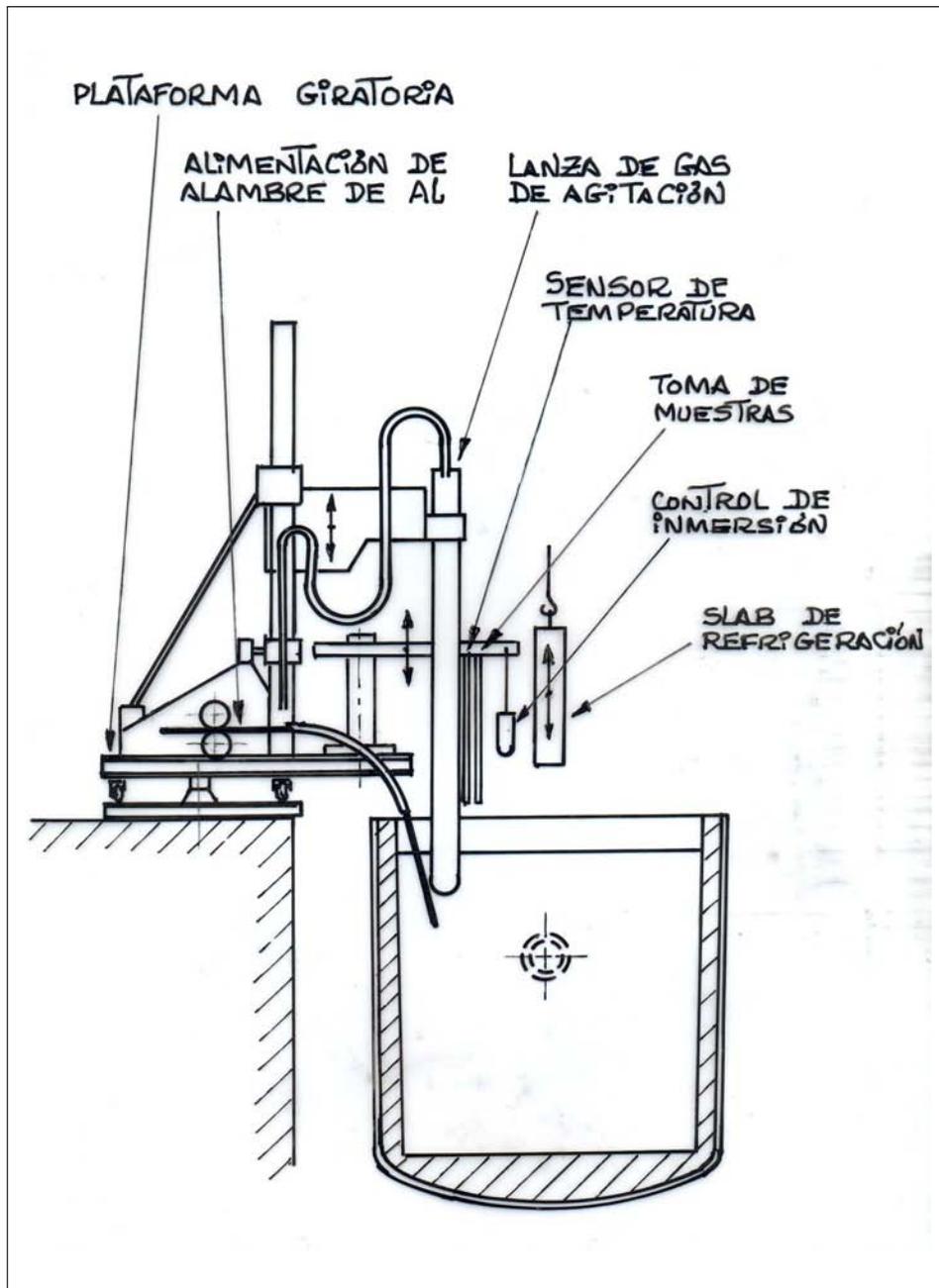


Figura 7.12: Estación de tratamiento del acero en cuchara.

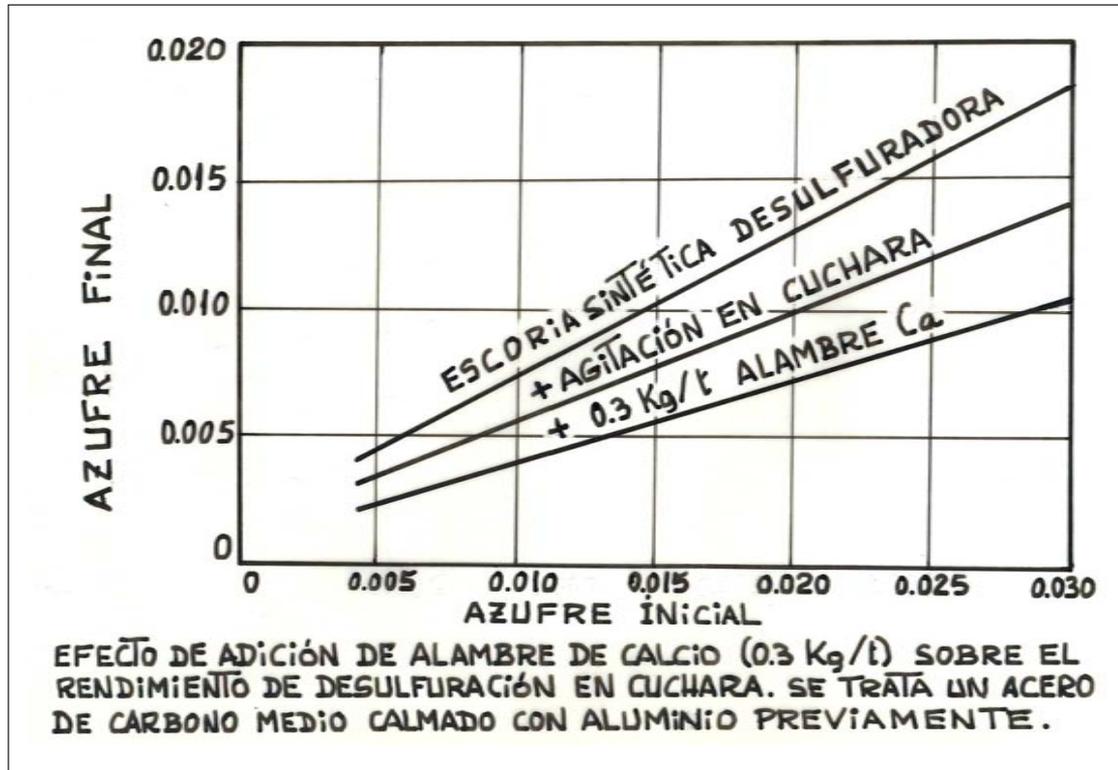


Figura 7.13: Efecto de adición de alambre de calcio.

7.8. Lanzamiento de proyectiles de aluminio

En el caso de adición por proyección, los proyectiles se lanzan a una velocidad controlada para que alcancen el fondo de la cuchara, por medio de un aparato que funciona como una metralleta de aire comprimido (figura 7.14). Dada la escasa densidad del aluminio y calcio, para comunicarles la energía necesaria para que lleguen hasta el fondo de la cuchara antes de fundirse es preciso darles una gran velocidad en el disparo.

$$\text{Penetración en el baño} = \text{Energía del proyectil} = \frac{1}{2}(\text{masa}) \times (\text{velocidad})^2$$

La figura 7.15 muestra la cuantía de la presión de vapor del calcio a diferentes temperaturas. Esta curva indica la necesidad de inyectar hasta el fondo de la cuchara para evitar evaporación y combustión de los metales al desembocar en la parte superior del baño.

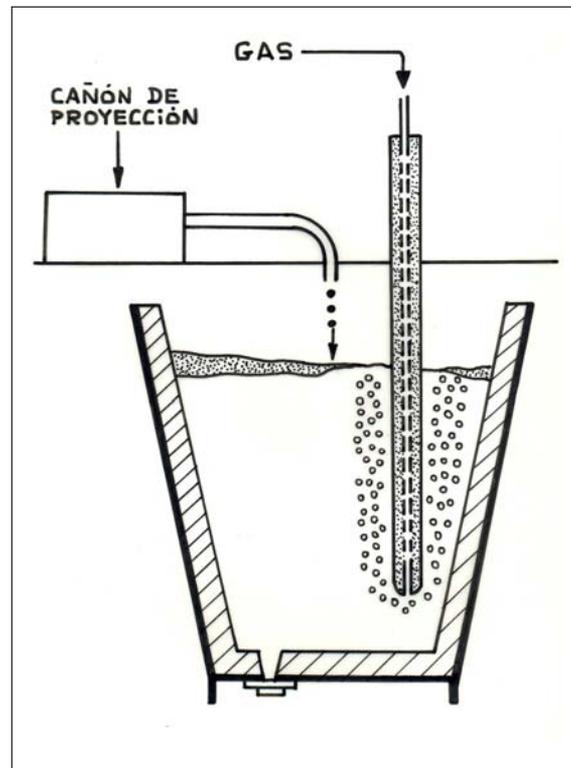


Figura 7.14: Adiciones en cuchara. Lanzamiento de proyectiles de Al

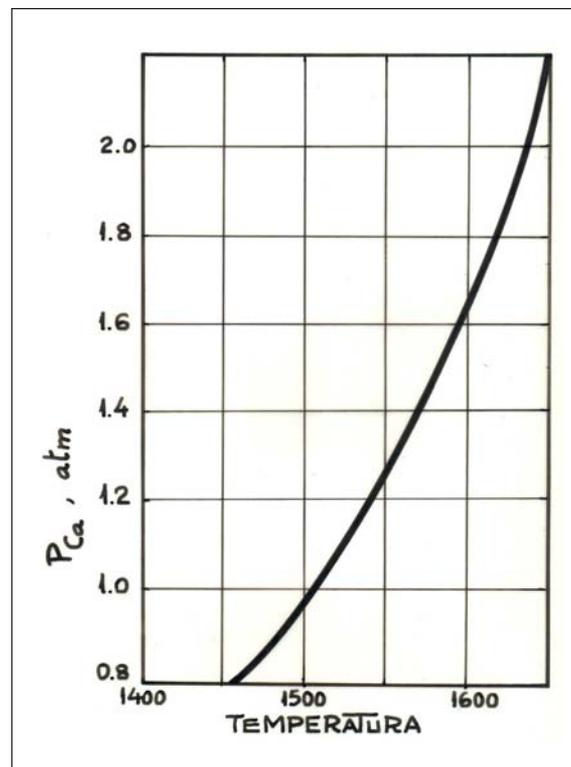


Figura 7.15: Presión de vapor del calcio a las temperaturas de elaboración del acero.

7.9. Adición vehiculada de aluminio

Es un proceso que se podría considerar como variante del CAS. Hay una barrera de refractario, sumergida en el baño, que separa la escoria de la calva. En la zona protegida entra un lanza de insuflación de gas nitrógeno de agitación, así como una caña con la que se inyecta aluminio vehiculado por nitrógeno figura 7.16.

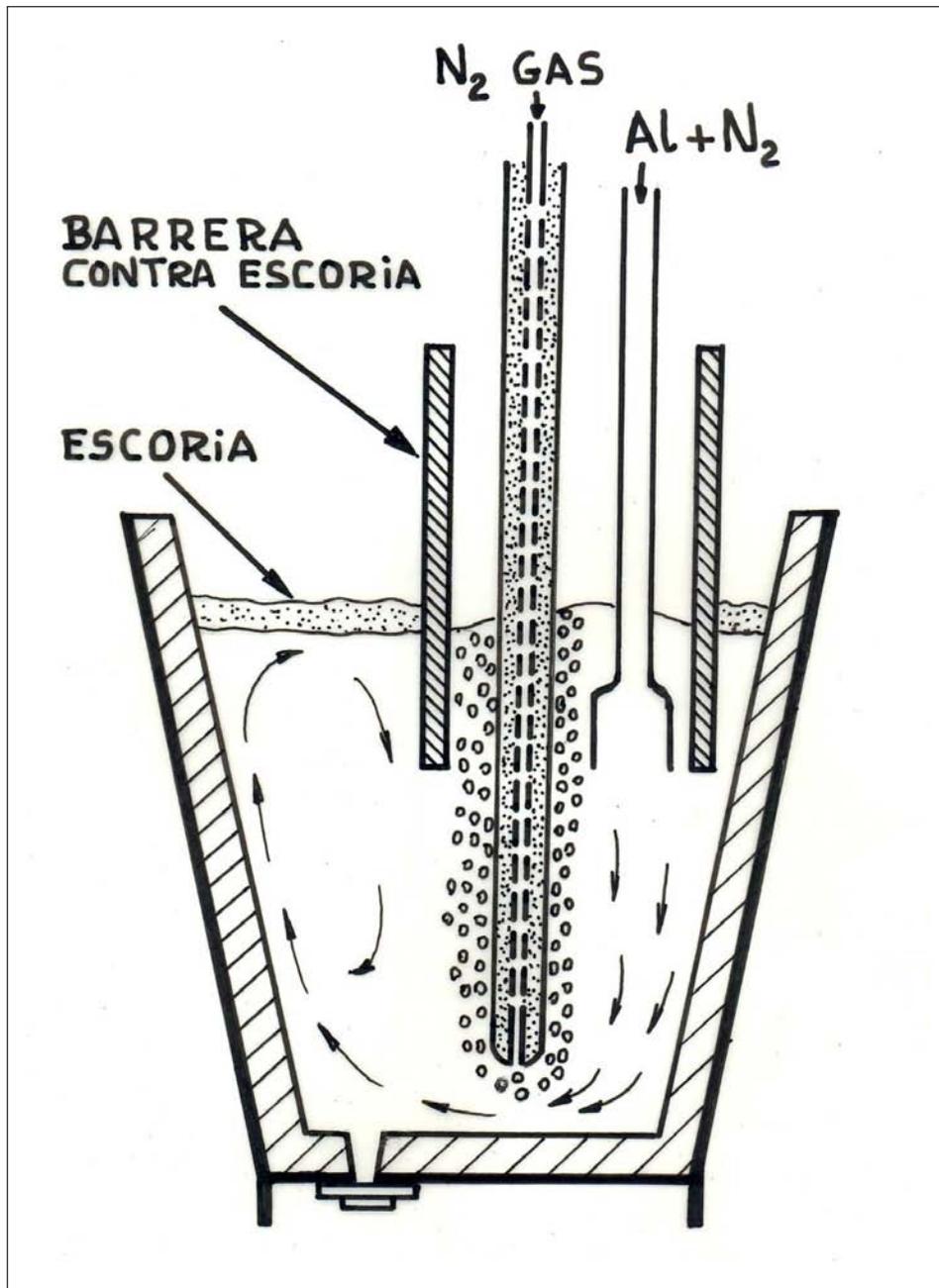


Figura 7.16: Adiciones en cuchara. Adición vehiculada de aluminio.

7.10. Inyección con lanza IP y TN

La adición de productos desoxidantes y desulfurantes al acero se hace con gran eficacia, insuflando estos productos en polvo, a través de una lanza, por medio de un gas inerte figuras 7.17 y 7.18. Los productos más frecuentemente empleados para desulfurar y para el control de la morfología de las inclusiones son el silico-calcio («SICA») y diversas escorias sintéticas.

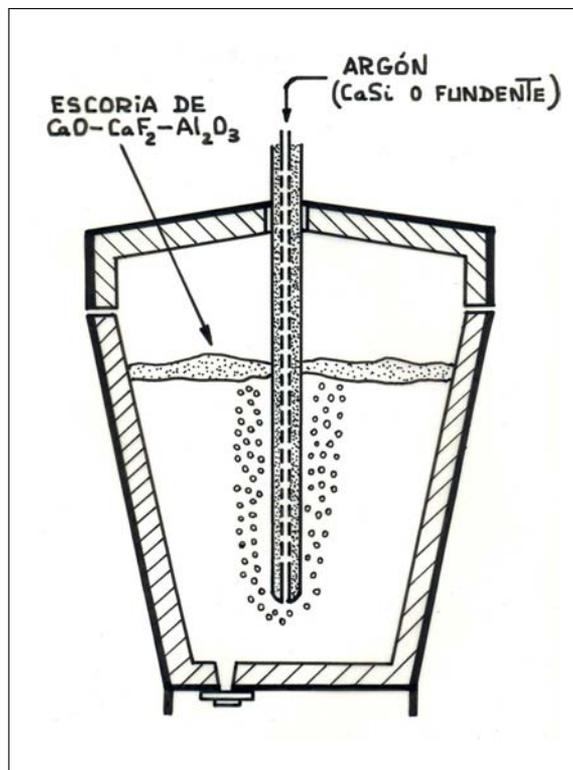


Figura 7.17: Adiciones en cuchara. Inyección con lanza.

La agitación del acero por el paso de gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza, como en otros métodos de barboteo. En la figura 7.19 se representa la influencia de la composición del refractario de la cuchara empleada en el proceso TN sobre el rendimiento desulfurador alcanzado.

Al usarse estos métodos, tanto el de barboteo (AP) como el de insuflación, su duración en el tiempo está limitada por el enfriamiento del acero líquido. Las nuevas técnicas consisten en mantener la temperatura de este acero, o recalentarlo ligeramente mediante electrodos (horno cuchara) o bien por inducción, aunque en la gran mayoría de los casos es más empleado el calentamiento por electrodos.

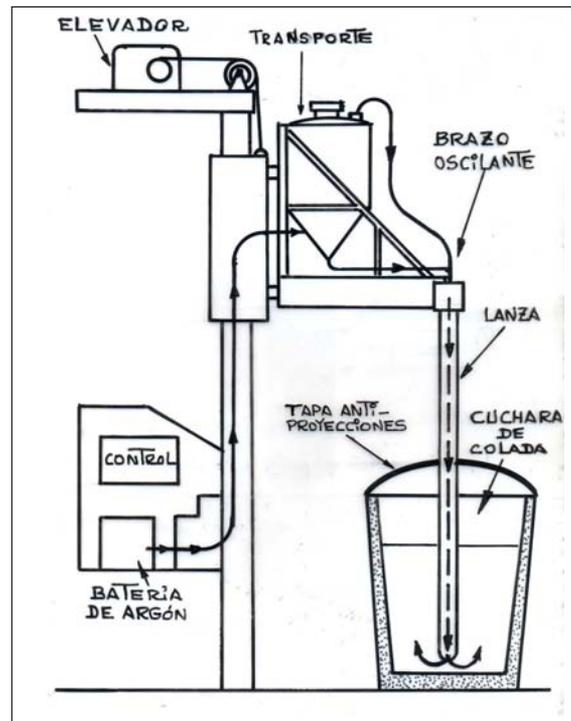


Figura 7.18: Esquema del sistema desulfurador Thyssen-Niederrhein (TN).

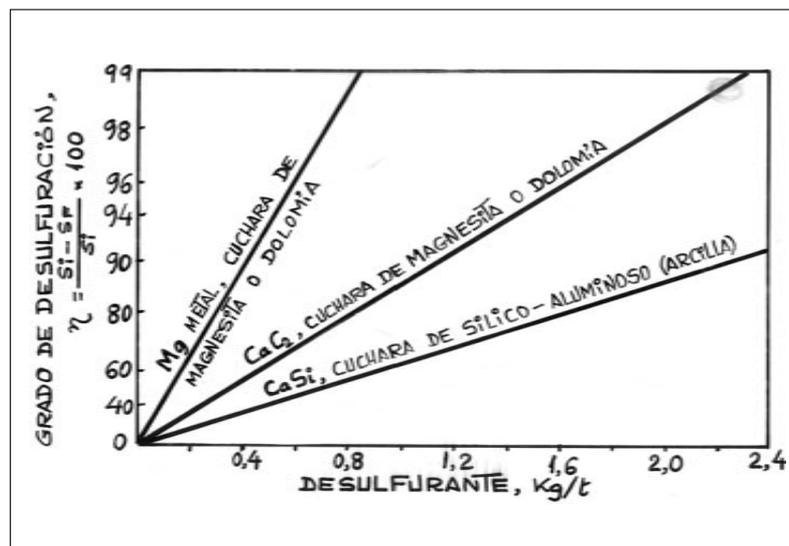


Figura 7.19: Influencia del desulfurante y del revestimiento sobre la desulfuración alcanzada en el proceso TN.

Capítulo 8

PROCESOS ATMOSFÉRICOS CON APORTACIÓN TÉRMICA

Al igual que se vió en los procesos al vacío, las operaciones de agitación, inyección de gases y de productos sólidos provocan un enfriamiento del acero en la cuchara que en muchos casos puede ser inaceptable. La figura 8.1 representa la pérdida de temperatura que sufre una cuchara con 200 t de acero a la que se somete a tres procesos diferentes. La pérdida de temperatura en la basculación depende del tipo de refractario de la cuchara y del precalentamiento de la misma.

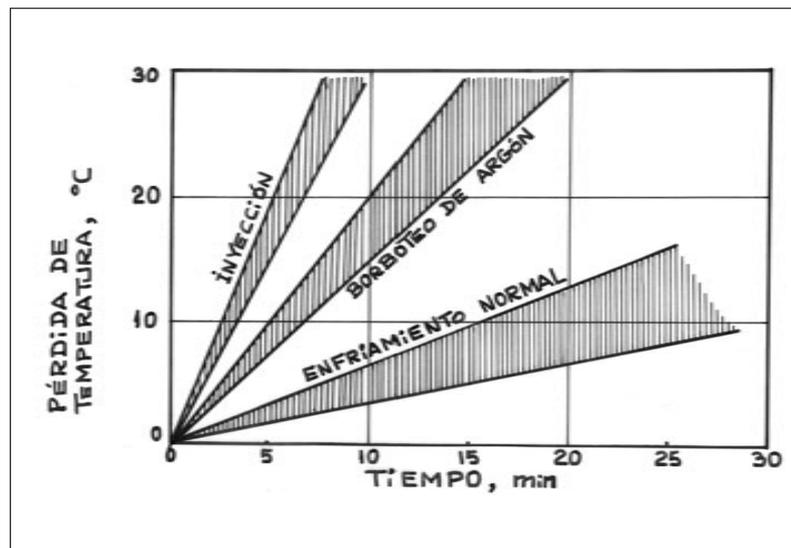


Figura 8.1: Comparación de la pérdida de temperatura, según varios procesos, para una cuchara de 200 t.

El aumento de temperatura de colada da lugar a problemas adicionales tales como escasa eliminación de fósforo, mayor desgaste de refractario, mayor consumo de energía eléctrica y electrodos en horno de arco, duración alargada de la colada y, en el caso de un convertidor LD, disminución del consumo de chatarra en comparación con arrabio.

Para remediar este problema se han desarrollado los procesos atmosféricos con

aportación térmica adicional, que lo mismo que en vacío puede ser con caldeo eléctrico o caldeo por oxígeno.

8.1. Horno cuchara

Los problemas antes citados, así como los derivados de la implantación de la colada secuencial en las máquinas de colada continua, han llevado a la difusión masiva en años recientes de los procesos de cucharas calentadas por arco eléctrico. Estos hornos cuchara de arco, además de contribuir a la disminución de las temperaturas de basculación, hacen posible que el acerista pueda realizar muchos procesos metalúrgicos:

1. Homogeneización de temperatura y composición del acero.
2. Posibilidad de efectuar cuantiosas adiciones de aleantes.
3. Flotación y eliminación de inclusiones por la agitación del metal y la absorción por escorias sintéticas.
4. Desulfuración por escorias sintéticas o productos inyectados.
5. Modificación de inclusiones por productos inyectados.
6. Defosforación por escorias especiales.
7. Flexibilización y planificación de colada secuencial.

Hay numerosos sistemas de cucharas calentadas por arco, más o menos diferentes. Hay tres tipos básicos de horno-cuchara que son: Agitados por inducción, agitados por gas a través de tapón poroso y agitados por gas a través de una tobera. Sin embargo, todos ellos tienen el mismo fundamento y características generales. La mayoría trabajan con tres electrodos, cada uno con un diámetro de unos 450 mm. Los electrodos están más cercanos entre sí que en el horno de arco UHP de fusión primaria. Por término medio una cuchara de 200 t trabaja energizada por un transformador de 30-40 MVA que permite recalentar el acero a una velocidad de 3-4 °C por minuto.

8.1.1. Calentamiento por arco

Las figuras 8.2 y 8.3 representan un esquema general de horno cuchara y el dispositivo en detalle de un horno cuchara DEMAG de 100 t, trabajando en serie con un convertidor en la acería holandesa de Hoogovens BV (hoy Corus). cuchara de Voest Alpine Industrie Anlagenbau, austriaco. A continuación se dan detalles de características y funcionamiento del horno.

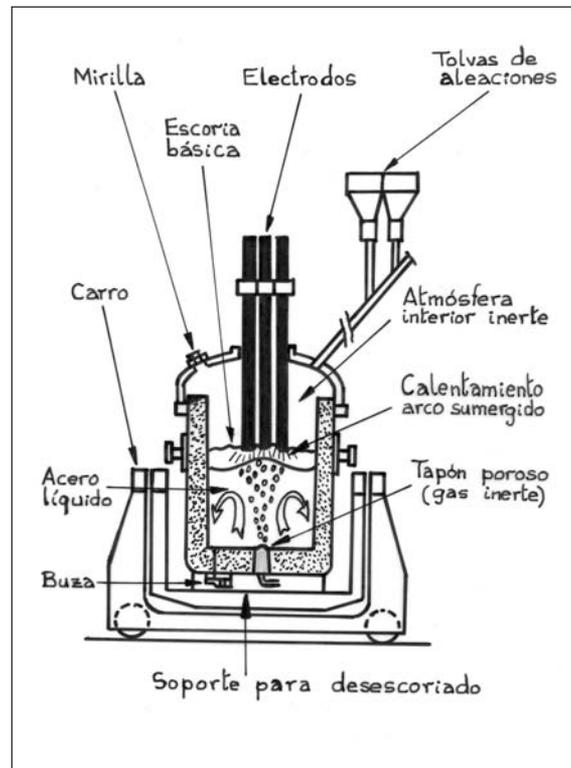


Figura 8.2: Esquema horno-cuchara.

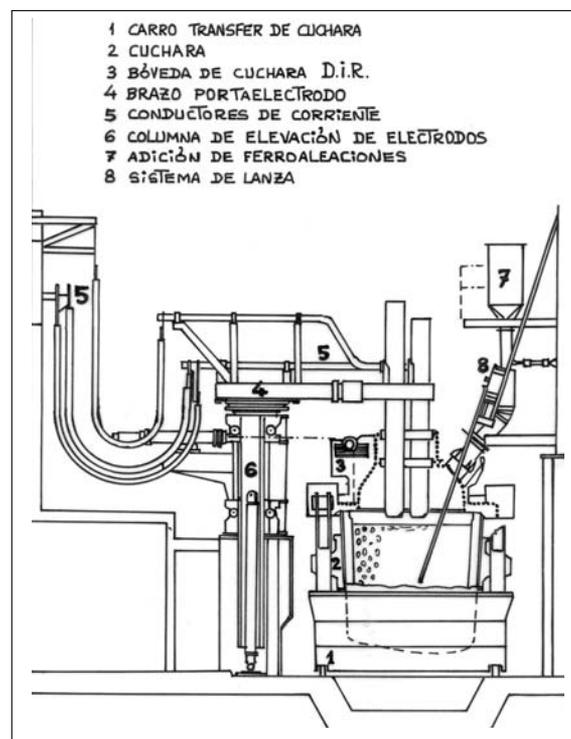


Figura 8.3: Horno cuchara DEMAG de 100 t, sistema Demag Inertgas Roof (D.I.R.), trabajando con un convertidor LD en Hoogovens BV.

Características funcionales

Puede instalarse en acerías ya existentes, según una disposición que suele ser la siguiente:

El carro transfer con la cuchara se posiciona en la estación de calentamiento constituida por la bóveda provista de electrodos, que no precisa ser desplazada horizontalmente. Esta disposición de bóveda y auxiliares permite toma mecanizada de muestras, medida de temperatura y milivoltaje, inyección de aluminio, alambre y polvo, adición mayor y más fácil de aleantes, agitación de escoria sintética de cobertura y, finalmente, agitación homogeneizadora por argón o electromagnética.

Hay alternativas posibles como, puente grúa en lugar de carro transfer, desplazamiento horizontal, recto o pivotante, de la bóveda, mantenimiento de atmósfera inerte y equipo de captación de polvo.

En el caso de acerías LD aparecen ventajas como, satisfacer las exigencias de la colada continua (temperatura y composición exactas), acero limpio, disminuir rechazos, eliminar resoplado por caldo frío, evitar sobrecalentar innecesariamente y estar siempre a punto para la colada secuencial figura 8.4.

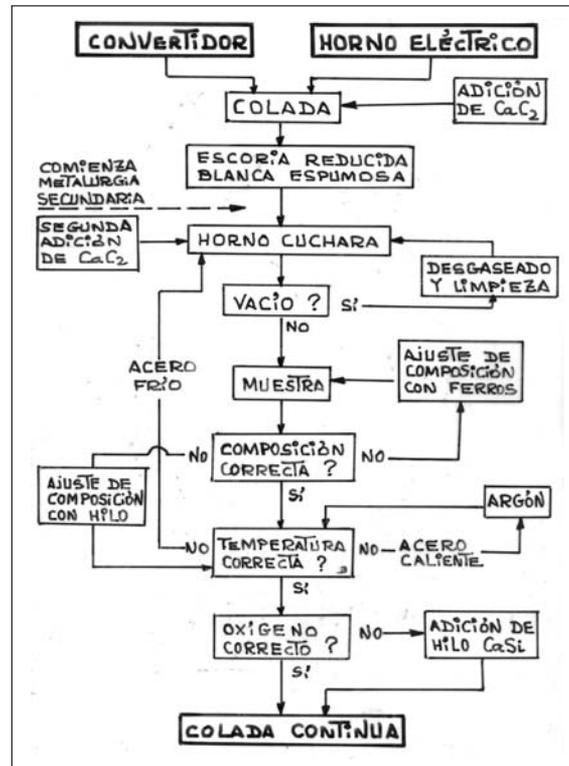


Figura 8.4: Adiciones en cuchara. Inyección con lanza.

Funciones del horno de arco

Funde la carga de chatarra y, eventualmente, hierro esponja e inmediatamente se produce la descarburación y defosforación. Después se calienta el baño hasta la temperatura de colada (1580 - 1620 °C) y se efectúa la basculación a la cuchara de caldo libre de escoria, con adición continua de desoxidantes y aleantes en el chorro de colada. Mientras, se está agitando con argón y se toman muestras en cuchara.

Funciones del convertidor

Se produce el afino oxidante del arrabio y se adiciona chatarra en función de la temperatura de colada que se desea. Se completa el afino con la defosforación y se pasa el caldo, libre de escoria, a la cuchara; en ese momento se hace la adición continua de desoxidantes en el chorro de colada, se agita con argón y se toman muestras en cuchara.

Funciones del horno cuchara

En él se completa el ajuste exacto de temperatura para la colada continua, buscando una sincronización precisa con los ciclos operativos de la máquina de colada continua, ejerciendo también una acción amortiguadora o de reserva.

También se consigue un ajuste exacto de composición mediante adición de ferroaleaciones en troceado barato, inyección entubada de elementos especiales (Pb, Nb, Ti..), inyección carburizadora de polvo de carbón, inyección de alambre (Al, CaSi) para alcanzar el grado deseado de desoxidación y modificación de inclusiones.

Simultáneamente se produce desulfuración mediante escoria sintética, con o sin agitación intensiva con lanza. Todas estas acciones permiten acero limpio y con adecuadas características mecánicas transversales.

El calentamiento por electrodos o el enfriamiento por barboteo permiten que todas las cucharas enviadas a la máquina de colada continua tengan la misma temperatura.

Etapas de proceso en horno de arco y convertidor

Primero se funde, descarbura y defosfora y, en el caso del horno de arco, se calienta hasta la temperatura de colada inferior (1580 - 1620 °C) dictaminada por el contenido de carbono. Se produce la colada libre de escoria (<3 kg/t) o, en el caso de horno de arco, colada con escoria y desescoriado posterior en cuchara.

Hay una pérdida de temperatura (30 - 60 °C) durante la colada (si se adicionan aleantes es mayor). La cuchara se calienta de forma que antes de colar esté ya a 1100 - 1200 °C. El tiempo necesitado para la colada es de 2 - 4 minutos. Después se adicionan aleantes para ajustar silicio y manganeso a sus límites inferiores.

Etapas de proceso en el horno cuchara

Se efectúa una adición de escoria sintética formada por (cal + espato), o (cal + alúmina + espato). Tiene varios fines. Por ejemplo, trabajando en arco sumergido separa el arco eléctrico de bóveda y paredes. Con ello se disminuyen las pérdidas de temperatura y el desgaste de refractario, a la vez que se frena la absorción de nitrógeno. Otros objetivos son desulfurar y mejorar la limpieza del acero.

La siguiente fase es el calentamiento a velocidad máxima de 3-5 °C/min. Se consume calor en diversas operaciones como pérdida por radiación de la cuchara, fusión de la cal y espato de la escoria sintética, polvos inyectados, aleantes adicionados, calentamiento hasta la temperatura prescrita de colada, etc..

A continuación se efectúa la agitación con argón, cuyos objetivos son. Homogeneización de temperatura del baño que se está calentando, homogeneización de composición del baño después de adicionar ferroaleaciones y antes de la toma de muestras, favorecer la reacción entre metal y escoria desulfurante, a la vez que la segregación de inclusiones no metálicas, favoreciéndose la limpieza del acero.

La medida de temperatura es posible durante el calentamiento, mientras que la agitación por argón garantiza homogeneidad del baño. La medición está mecanizada y se efectúa a través de un orificio especial de la bóveda. La toma de muestras se realiza por medio de la lanza pirométrica a la que se adapta un cartucho especial. La profundidad de la inyección homogeneizadora se mantiene constante mediante sistemas automáticos.

La medida de la fuerza electromotriz se hace mediante la lanza pirométrica a la que se adapta un cartucho sensor de mini-tensión. Se mide la fuerza electromotriz para ajustar el contenido de aluminio.

Ventajas del horno cuchara desde el punto de vista de aleación. Las condiciones que prevalecen en él son no oxidantes, tanto por la escoria en sí como por el mantenimiento de argón y CO sobre la superficie del acero líquido. Es fácil alcanzar intervalos estrechos de contenidos de aleantes y, en el caso de aceros de alta aleación hay un ahorro sustancial de ferroaleaciones.

En cuanto a recarburación por inyección de polvo a través de lanza monolítica, pueden inyectarse cantidades mayores de carbono para llegar a composiciones muy exactas. Puede también efectuarse aleación de aluminio, en función de la medida de fuerza electromotriz (grado de oxidación), por adición de alambre de aluminio a través de la bóveda.

Aspectos económicos del conjunto HEA/LD-HC

En cuanto a capacidad del horno de arco o convertidor: La temperatura de colada puede reducirse unos 40-80 °C y el tiempo tap-to-tap, en el caso de horno de arco,

puede también disminuirse un 10-20%. Con hornos pequeños se alcanza la misma producción anual. En lo que al LD concierne, al necesitarse menor temperatura de colada (40 °C menos) se puede cargar un 2% más de chatarra refrigerante. Esta menor temperatura de operación supone gastar menos refractario y parcheo, de forma que el consumo total (HEA + HC) se reduce en un 10-30%. El conjunto HEA+HC consume 29-50 kW.h/t menos que el horno de arco en colada convencional. Igualmente, el mismo conjunto ahorra 0,1-0,2 kg/t de electrodos.

En cuanto a función reguladora del horno cuchara, se puede mantener o recalentar el baño, con lo que se puede interrumpir o ralentizar el flujo de producción; se pueden retornar cucharas en lugar de lingotar en emergencia. En el caso de LD se elimina la necesidad de posible resoplado.. Y en general, hay mayor facilidad y productividad de coladas secuenciales.

El horno cuchara es la instalación ideal para ajuste de composición y temperatura, pues hay mayor probabilidad de alcanzar el análisis deseado. Hay mayor constancia de colada a colada y, dentro de la misma colada, del principio al final de la misma. Todo ello redundará en mejoras de la máquina de colada continua, especialmente la secuencial.

Al poder trabajar a menores temperaturas de operación en el LD, aumenta la posibilidad termodinámica de defosforación. En cuanto a desulfuración las condiciones reductoras en el horno cuchara son favorables para ello, lo que redundará en mejor calidad del acero fabricado; el acero es más limpio, gracias también a las condiciones homogeneizadoras de composición y temperatura.

Resumiendo: Tratamiento en HC menos defectos en el acero colado y laminado (menos reparaciones superficiales) mayor productividad global.

Principales componentes del horno cuchara Voest Alpine

- Estructura soporte de bóveda y columnas de electrodos.
- Bóveda refrigerada por agua con sistema hidráulico de elevación. aberturas necesarias y puerta de observación y adiciones manuales.
- Tres brazos portaelectrodos (con mordazas), bien conductores o bien con soportes para tubos conductores de alta intensidad.
- Tres columnas de electrodos con cilindros hidráulicos y roldanas de guía.
- Equipo hidráulico incluida tubería de presión.
- Sistema de corriente de alta intensidad (barras o pletinas en la caseta del transformador, cables flexibles, tubos conductores sobre los brazos portaelectrodos y mordazas contactoras).
- Transformador e interruptores internos de alta tensión.

- Interruptores de baja tensión.
- Regulación electrohidráulica de electrodos.
- Instalación de agua de refrigeración.
- Sistema de agitación en cuchara (argón o electromagnético), eventualmente combinado con lanza de emergencia, que puede usarse también para tratamiento de ultradesulfuración.
- Equipo de medida de temperatura y fuerza electromotriz, así como sistema de toma de muestras.
- Sistema de adición de ferroaleaciones.
- Máquina de inyección de alambre con dos líneas y sistema telescópico.
- Equipo de captación de polvo.
- Sistema opcional de inyección de polvos.
- Sistema opcional de conexión automática a la cuchara, así como tapones porosos.
- Artificios para nipples y cambio de electrodos, junto con manipuladores de lanza de inyección.

8.1.2. Calentamiento por plasma

Los plasmas térmicos usados en metalurgia se producen por descargas eléctricas en gases a los que comunican su energía y pasan a un estado de equilibrio termodinámico local altamente ionizados con muchos electrones libres. La columna de plasma formada por este gas es conductora y alcanza gran temperatura, superior a 5000 K. Los más usados son los de corriente continua.

Corrientemente se considera el plasma como el cuarto estado de la materia, que se alcanza según se va subiendo la temperatura desde sólido, líquido y gas al plasma. En este contexto los plasmas térmicos están definidos por las cuatro condiciones siguientes:

1. La temperatura media de los iones está entre 5000 y 6000°K.
2. El estado de plasma se mantiene por el paso de una corriente eléctrica.
3. La zona del plasma está parcialmente ligada a por lo menos la superficie de los electrodos.
4. En la zona de plasma se pueden inyectar cantidades controladas de materia.

Durante los últimos tiempos se ha producido un desarrollo espectacular de la tecnología y aplicaciones del plasma en soldadura, metalurgia extractiva, procesos de reducción de óxidos e, incluso, en electrodomésticos. En acería se han empleado en hornos de arco; en ellos los electrodos de grafito han sido sustituidos por torchos de plasma.

Las figuras 8.5 y 8.6 representan esquemáticamente el electrodo («antorcha») según el sistema de arco transferido.

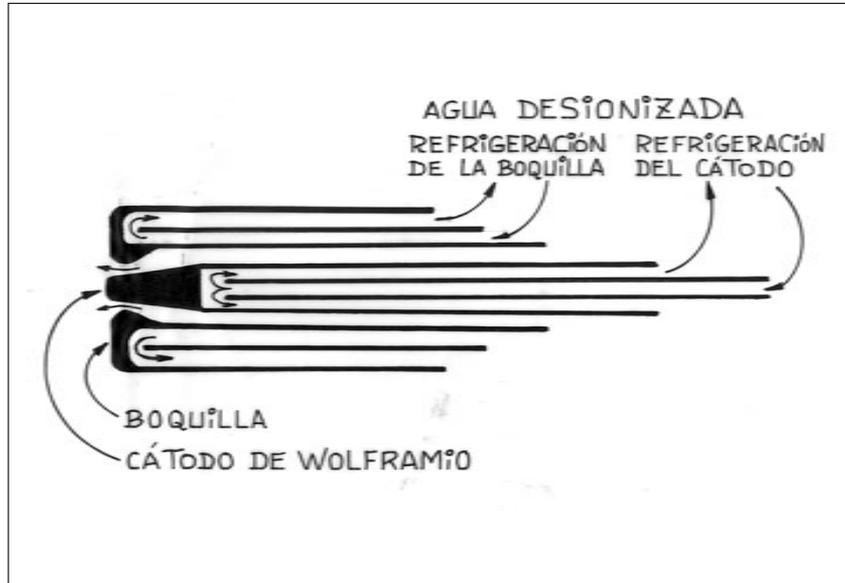


Figura 8.5: Electrodo para arco-plasma transferido

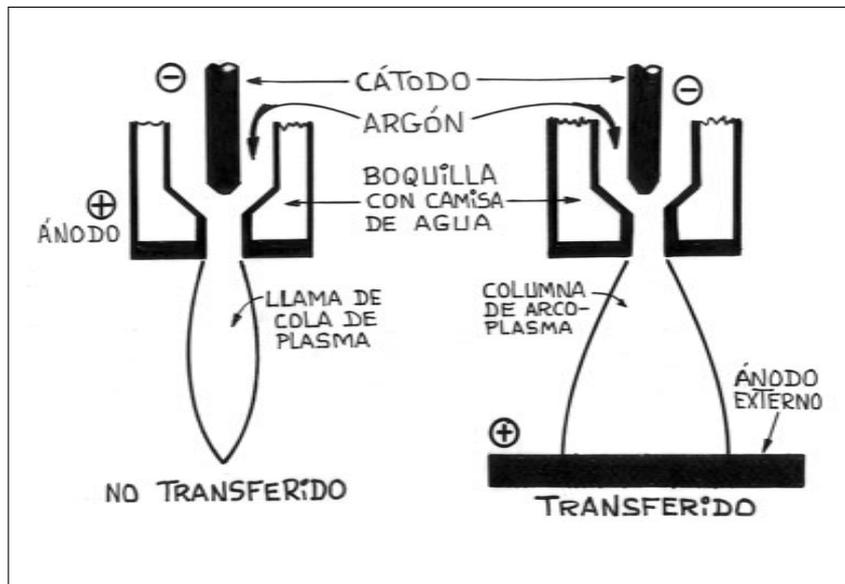


Figura 8.6: Tipos de arco-plasma

La figura 8.7 representa un horno-reactor de plasma transferido.

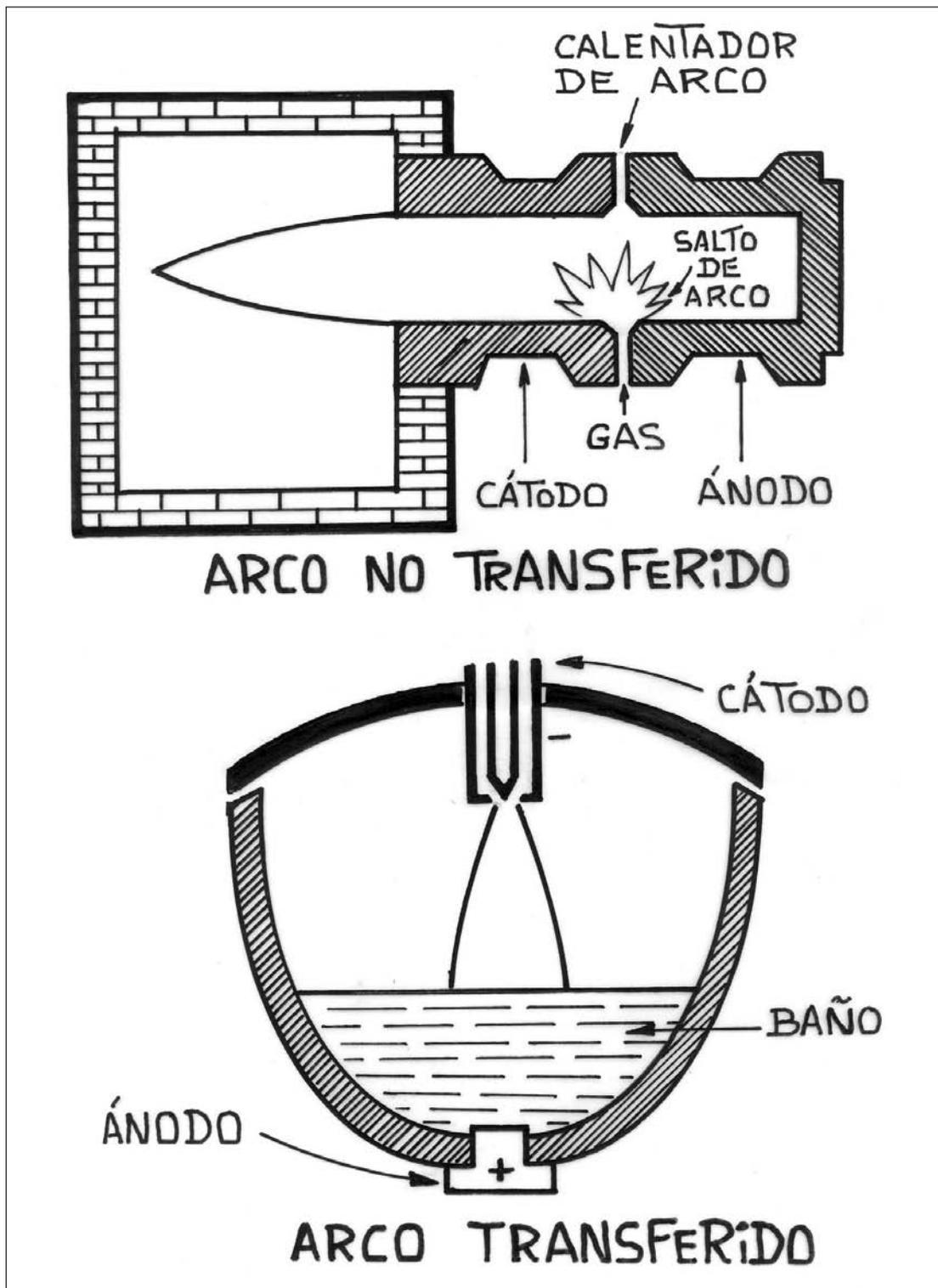


Figura 8.7: Interfase horno-reactor/plasma

La figura 8.8 representa el esquema de un horno cuchara al que se le ha incorporado una bóveda con antorcha de plasma en lugar de una bóveda clásica de horno de arco. Esta bóveda tiene el orificio de paso del torcho y la mirilla de control, paso de adiciones, etc.. También están los electrodos de retorno, ya que se trata de arco plasma transferido.

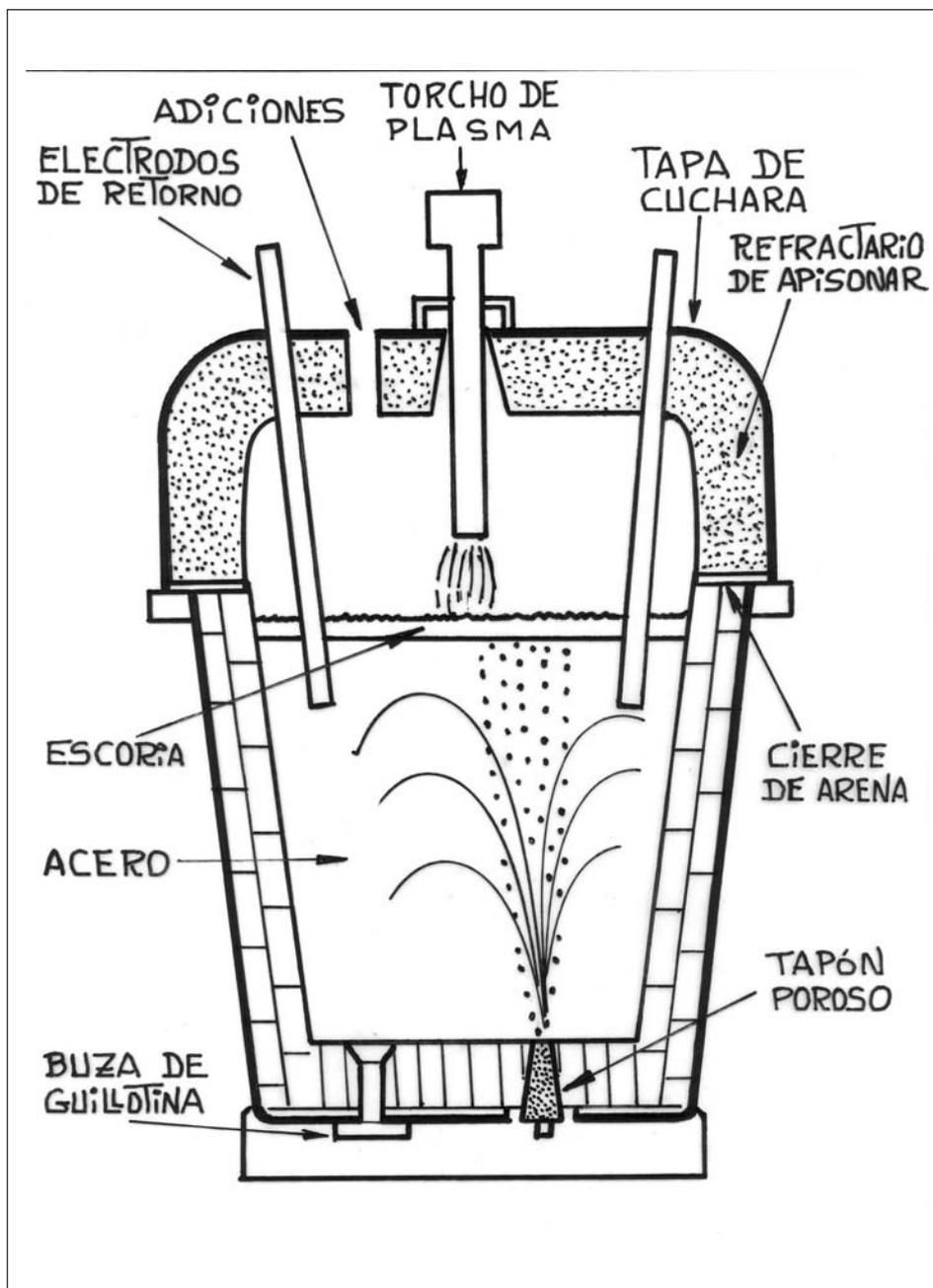


Figura 8.8: Metalurgia secundaria: Horno cuchara con calentamiento por arco-plasma.

La figura 8.9 representa un horno cuchara Krupp a plasma con todos sus aditamentos.

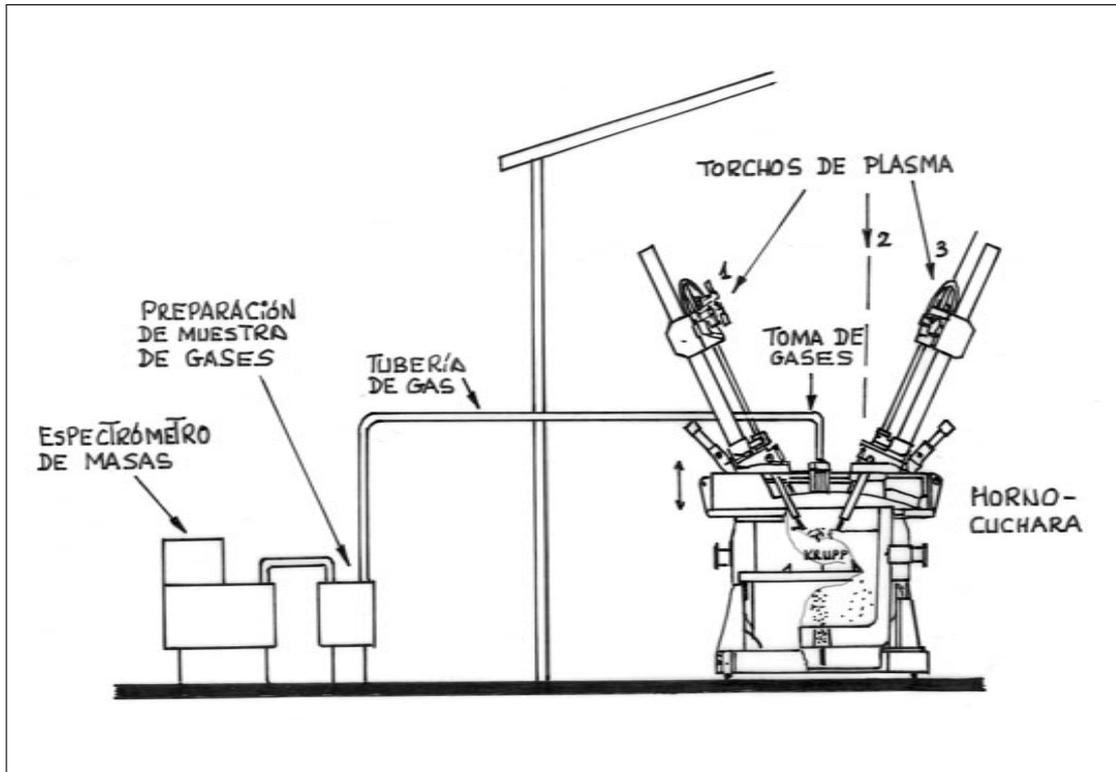


Figura 8.9: Horno-cuchara Krupp a plasma mostrando el sistema de captación y análisis de los gases

La figura 8.10 muestra el proceso Daido Steel. Se trata de un horno de inducción de crisol al que se le incorpora una antorcha de plasma. Este aditamento llena una de las lagunas principales de los hornos de inducción, cual es trabajar con escoria fría y poco reactiva, ya que no hay nada que la caliente. La antorcha calienta y funde la capa de escoria con lo cual ya participa en las reacciones metalúrgicas de interfase.

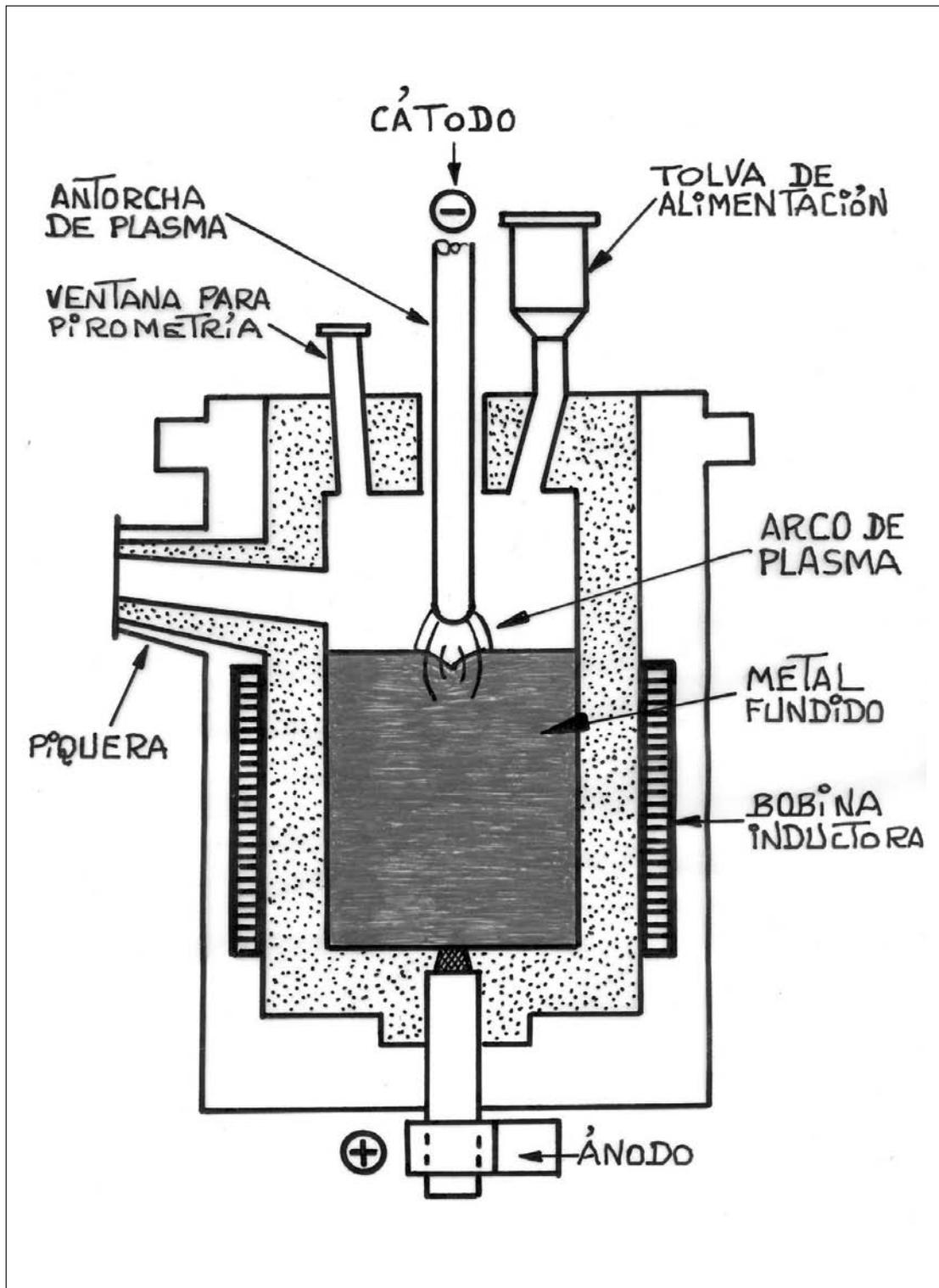


Figura 8.10: Daido Steel. Horno de crisol a inducción con calentamiento adicional por arco-plasma

8.1.3. Calentamiento por electroescoria

El proceso de afino bajo escoria conductores (electroescoria, electroslag remelting ESR) se desarrolló en 1950 en el Instituto Paton de Soldadura de Kiev (Ucrania, antigua Unión Soviética), y se difundió por todo el mundo, tanto para soldadura como para refusión y afino de aceros de muy alta calidad.

Como se ve en la figura 8.11 la corriente eléctrica se establece entre un electrodo consumible situado en la zona de escoria y una lingotera, normalmente de cobre y refrigerada por agua. La corriente pasa a través de la escoria fundida, que por estar líquida se ioniza y se vuelve electroconductora, de manera que la punta del electrodo se funde debido al efecto Joule generado en el paso de la corriente por la zona de escoria líquida.

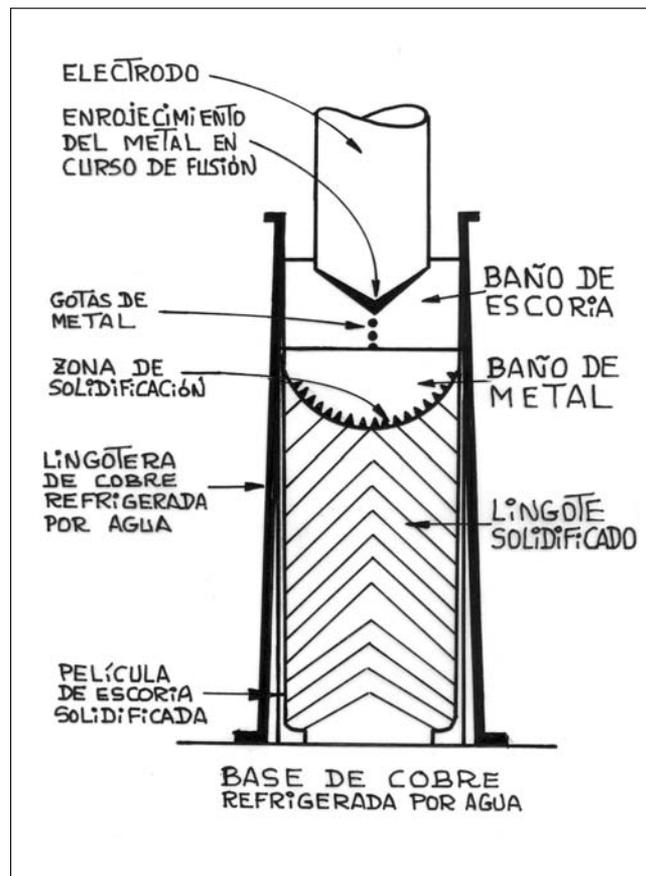


Figura 8.11: Esquema de proceso de refusión y afino bajo electroescoria

Cuando las gotas caen del extremo del electrodo pasan a través de la escoria, reaccionan con la misma que está a 250 - 400 °C más caliente que el electrodo consumible y las gotas se desulfuran y desgasifican, cayendo después al baño. Las inclusiones que se forman en el refino quedan flotando en la escoria y no pasan al acero.

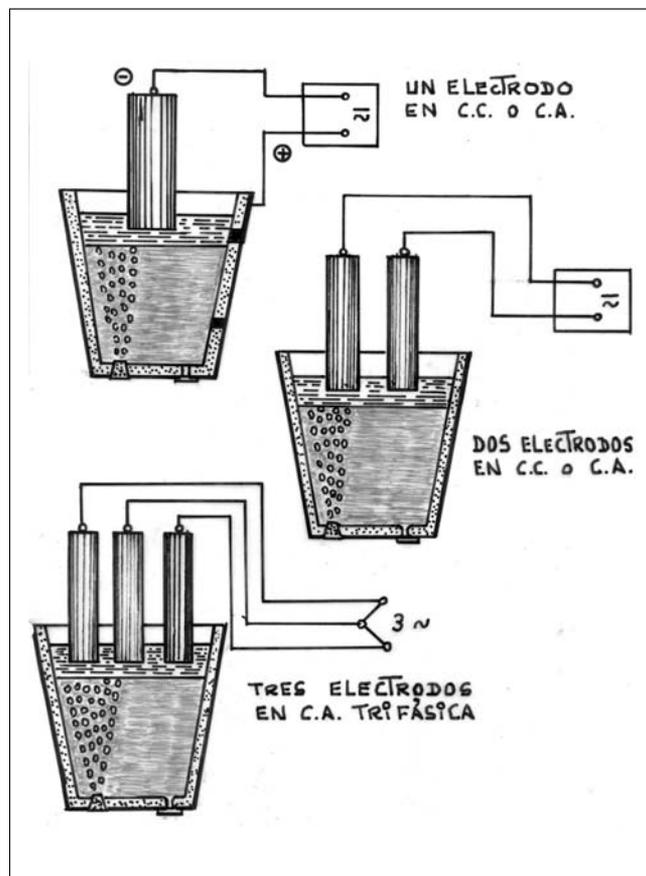


Figura 8.12: Sistema Inteco-S.C.E de calentamiento del baño en cuchara mediante la tecnología de electroescoria

El sistema ofrece gran flexibilidad. Puede haber electrodos sencillos o múltiples, electrodos de grafito o consumibles, no se depende de la presión ambiente, y se puede trabajar en corriente continua o alterna. En la figura 8.12 se muestran distintas disposiciones de calentamiento de cucharas de acero líquido. Este sistema presenta ventajas como:

- El calor generado en la escoria origina escoria reactiva, el calentamiento es eficiente, y no hay arco ni, por tanto, radiación.
- Los electrodos son consumibles y, por tanto, hay posibilidad de reciclar materiales, no se produce recarburación y el proceso es económico.
- El calentamiento es independiente de la presión.
- Libre elección de la corriente que permite: Con corriente alterna disposición simple, bifilar o trifásica de electrodos. Con corriente continua, aprovechamiento de efectos electrolíticos.

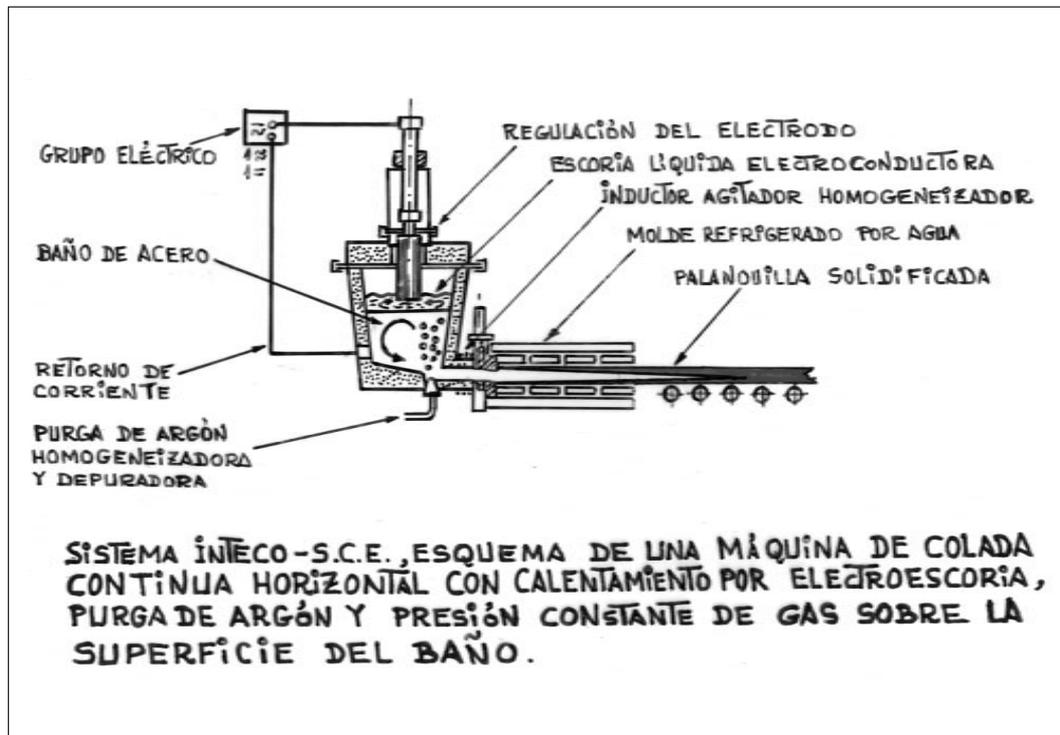


Figura 8.13: Sistema Inteco-S.C.E.

En la figura 8.13 se tiene el mismo sistema ESR para calentamiento de la artesa («tundish») de una máquina horizontal de colada continua. También se derivan ventajas:

- En artesas grandes, posibilidad de tratamiento metalúrgico antes del comienzo de la colada.
- Colada isotérmica durante largo período de tiempo.
- Posibilidad de colar casi líquido-sólido.
- Estructura constante de principio a fin.
- En artesas grandes, número de palanquillas independiente del volumen de baño.

8.1.4. Horno GRAF

El horno G.R.A.F. (Gas Refining Arc Furnace) tiene la característica especial que insufla en el baño cantidades de argón en lugar de recurrir al tratamiento desgasificador por vacío. El diseño esquemático de un horno piloto de 3 t se ve en la figura 8.14. El tapón poroso actúa agitando suavemente durante la fase de calentamiento por arco. Durante el ciclo de refinado por gas se inclina el horno y se soplan grandes cantidades de gas a través de una tobera de gas que permanece sumergida mientras el horno está inclinado.

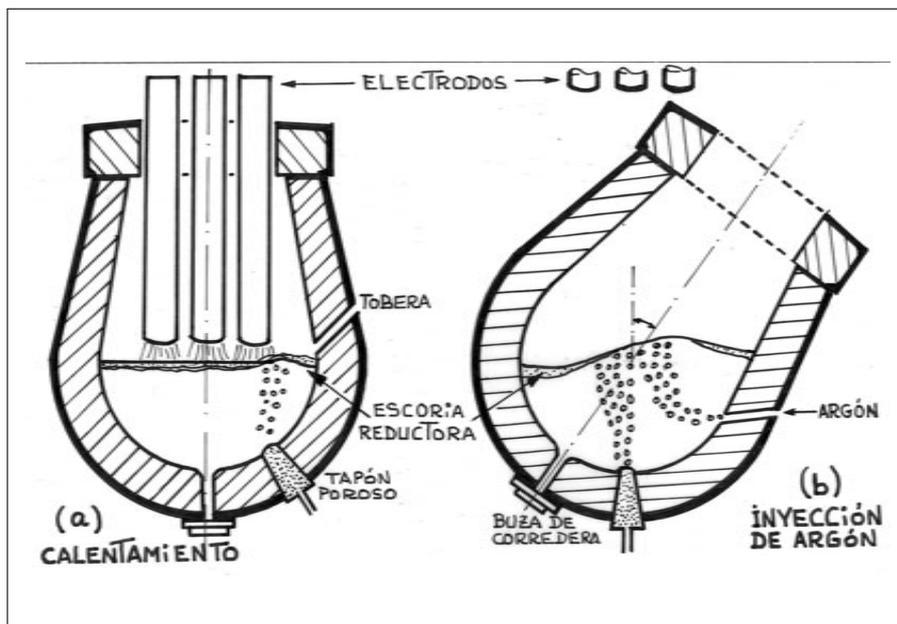


Figura 8.14: Gas refining arc furnace (GRAF)

En comparación con otros tipos de horno cuchara el volumen de gas insuflado es tres veces mayor, agitando más intensamente, lo que permite alcanzar velocidades de desulfuración mucho más elevadas. El empleo de escorias sintéticas permite disminuir el contenido de azufre, que llega a ser tan bajo como 0,002 %, efectuando un 80 % de desulfuración.

Esta gran cantidad de argón permite también expulsar el hidrógeno disuelto en el acero. Se consigue eliminar un 40 % del hidrógeno frente al 60 % alcanzado en procesos al vacío, para lo cual se consumen grandes cantidades de argón. El proceso permite eliminar también del orden de 40 % del nitrógeno presente, gracias a la capacidad de arrastre aportada por el argón y por las elevadas velocidades de transferencia de masa. A mayor abundamiento, se pueden eliminar pequeñas cantidades de plomo y cinc.

Otros fabricantes, como Electromelt y Vacmelt, ofertan también hornos cuchara de arco. Todos ellos se parecen al Diado Ladle Furnace en que barbotan gas de agitación a través de un tapón poroso y que se les puede equipar con instalación de vacío y lanza de inyección.

8.1.5. BBC-CEM-IRSID

En este caso, el horno secundario es un horno de inducción de canal como los hasta ahora empleados para mantenimiento (y fusión en algunos casos) de fundiciones y metales no férreos (figura 8.15).

El horno de inducción se compone de una cuba o bacino (figura 8.16) en el que

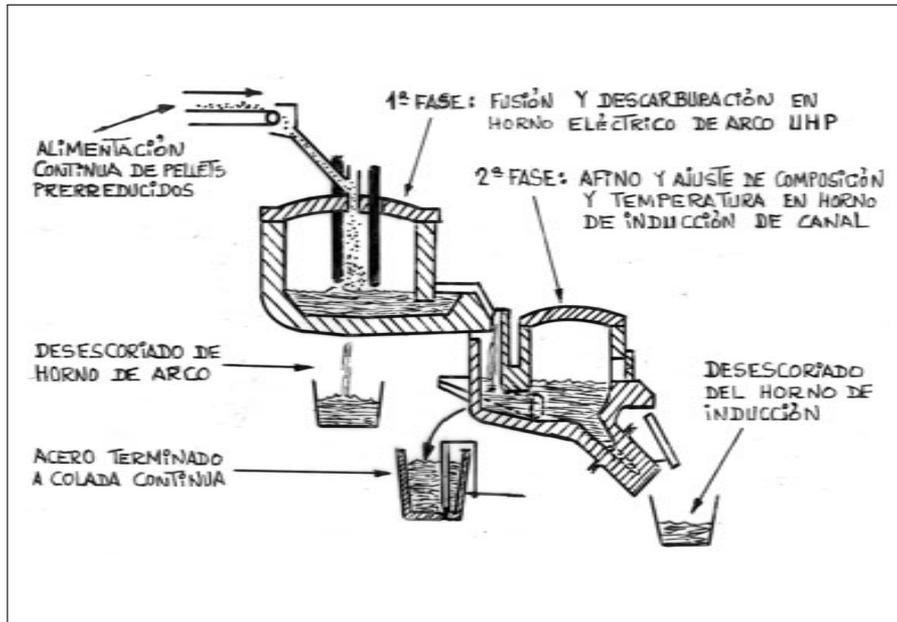


Figura 8.15: Proceso I.R.S.I.D.: Fusión de pellets en horno de arco y metalurgia secundaria en horno de inducción

se encuentra el grueso del metal, y un inductor que es el elemento calefactor. La independencia del elemento calefactor del resto del horno permite concebirlo como almacén de acero líquido previendo para ello un revestimiento refractario lo suficientemente grueso, cosa que no es posible en los hornos de inducción de crisol.

El inductor es un bloque de refractario en el que se ha practicado un canal en forma de «U» cuyas ramas desembocan en el baño metálico cerrando así el circuito eléctrico. Este circuito cerrado es concéntrico a un solenoide alimentado a frecuencia de la red. El conjunto funciona como un transformador cuyo primario es el solenoide y el secundario la «espira» de metal líquido (figura 8.17) que está en cortocircuito. Como en un transformador, un núcleo o circuito magnético limita la pérdida de flujo magnético y permite tener un factor de potencia más elevado que el obtenido en los hornos de inducción de crisol. El $\cos \varphi$ es de 0,7 en lugar de ser inferior a 0,1.

Siendo la alimentación a frecuencia de la red y el factor de potencia bastante elevado permite una instalación eléctrica sencilla que comprende un transformador variable y una batería de condensadores poco voluminosa.

En conjunto, se puede decir que en un horno de inducción de canal (figura 8.18) es posible calentar el acero y la fundición in situ con una potencia instalada menor que la utilizada en hornos de arco.

Comportamiento en fase oxidante

1. Pérdidas de carbono

Parece que están relacionadas con el tipo de escoria puesta en juego. Así, cuan-

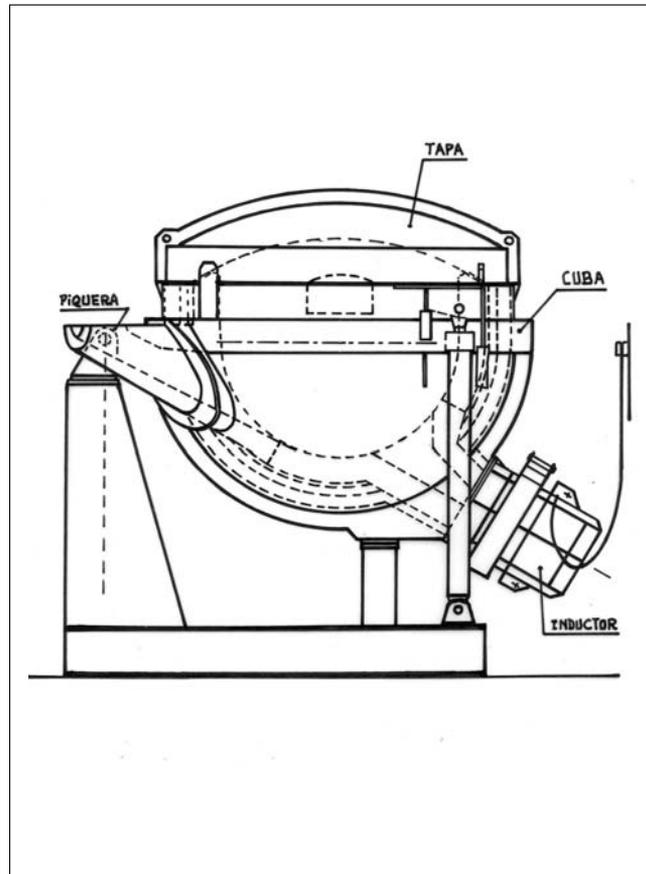


Figura 8.16: Horno de inducción de canal (tipo basculante)

do el metal está recubierto de una escoria saturada en cal la descarburación es inferior a 0,02 % a la hora, mientras que con escoria pobre en cal es de 0,04 %. En cualquier caso, esta velocidad de descarburación es 2 a 5 veces menor que la generalmente admitida en hornos de arco de la misma capacidad. Esto es lógico, puesto que la superficie específica por tonelada de capacidad del baño es la mitad que en horno de arco: a este factor se añade la dimensión mucho menor de piqueta y puerta de carga.

2. Equilibrio carbono-oxígeno

La oxidación del baño limitada por la estanqueidad de la cuba y la agitación del metal debida a los movimientos inductivos puede explicar que se aproxime al equilibrio teórico de Vacher y Hamilton. Para tenores en carbono superiores a 0,10 % el horno de canal se distingue de los otros aparatos metalúrgicos porque los contenidos totales de oxígeno están vecinos al teórico, lo que permite una buena decantación de todas las inclusiones de óxidos.

3. Reglaje de la composición

Durante toda la duración de los ensayos se mantiene el contenido de carbono del acero soplando polvo de grafito por una lanza de inmersión, según el método empleado normalmente en horno de arco. Las condiciones de insuflación son las siguientes:

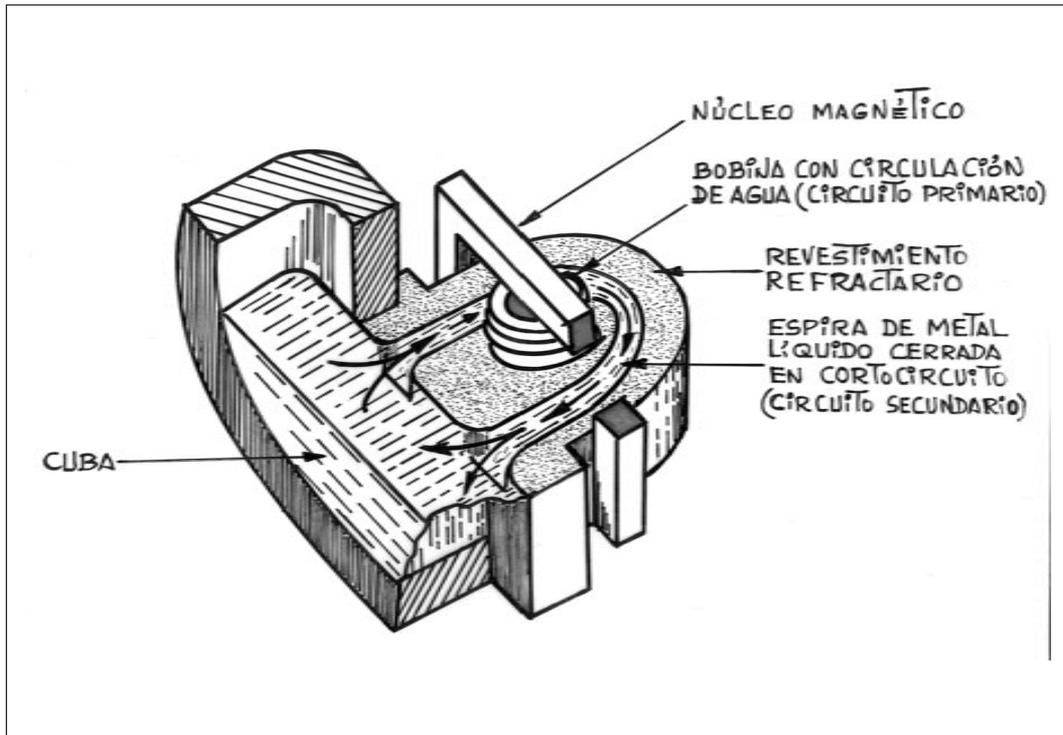


Figura 8.17: Esquema de un inductor de canal

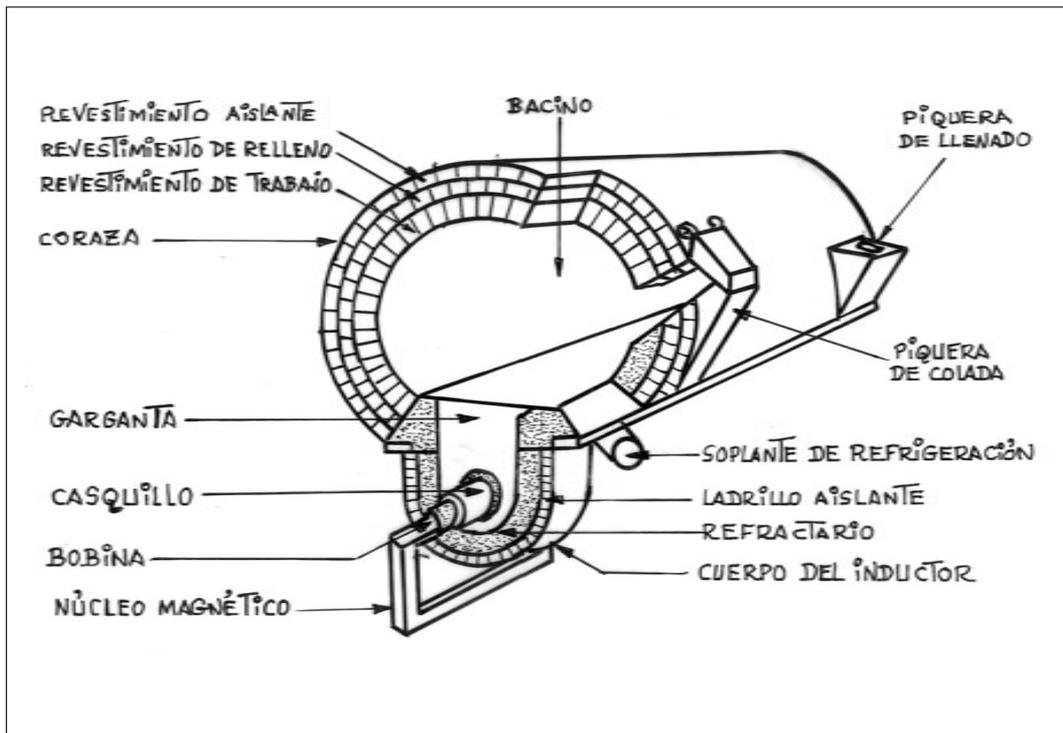


Figura 8.18: Horno de inducción de canal y tambor

- Lanza de insuflación de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- Caudal de aire de transporte, 5 l/s.

- Caudal de polvo de grafito, 16 a 20 kg/min.
- Potencia de calentamiento, unos 300 kW.

En estas condiciones, la cantidad de movimiento del polvo a la salida de la lanza es lo suficiente débil como para evitar todo riesgo de proyección excesiva de metal sobre la bóveda, la cual sólo dista 600 mm de la superficie del baño.

Comportamiento en fase reductora

Aparte de las consideraciones y resultados de la fase oxidante se han hecho ensayos de desoxidación por aluminio, cuyo objeto es demostrar tecnológicamente que es posible efectuar una desoxidación con aluminio bajo una escoria fluida a base de cal, sílice y alúmina formada en el horno y comparar los resultados de desoxidación con los obtenidos en un horno de arco de la misma capacidad.

La primera constatación es de orden práctico: En efecto, el aluminio ha sido sumergido en el metal recubierto de una escoria fluida que es térmicamente posible de constituir en un corto plazo de tiempo y cuya composición es vecina a la habitualmente admitida para las escorias llamadas «blancas» en las que el reductor contiene menos de 5 % de óxido de hierro sin que sea necesario por tanto desoxidar la escoria como en el horno de arco.

En todos los casos, el análisis de carbono del metal inicial estaba comprendido entre 0,16 y 0,19 %, siendo el de manganeso próximo a 0,20 %.

Tomas de muestras sistemáticas han permitido seguir las variaciones de contenidos del acero en oxígeno total, aluminio metálico y aluminio combinado durante una hora después de la adición de desoxidante. La interpretación de los mecanismos de desoxidación en horno de arco parece válida en el caso del horno de canal y los resultados son equivalentes o superiores a los obtenidos en horno de arco de la misma capacidad.

Los contenidos mínimos de oxígeno total son más bajos que los alcanzados en el curso de la desoxidación por aluminio en horno de arco de 6 t del IRSID, lo que puede deberse a:

- Una reoxidación más débil; en efecto, mediante la hipótesis de que las inclusiones que se forman en el baño son de alúmina, el balance térmico convertido en balance de oxígeno muestra que el baño está sometido a una reoxidación que es función del contenido de aluminio y equivalente a la observada bajo escoria reductora en horno de arco de 6 t .
- Mejor decantación de la alúmina, siendo el contenido de aluminio combinado al cabo de media hora inferior al obtenido en horno de arco con una media de 0,005 a 0,007 %.

En conclusión se puede resumir que el horno de inducción a canal se presenta como horno de ajuste muy bien adaptado. Presenta ventajas como:

- Mayor regularidad en la realización del ajuste en función de las adiciones.
- Mayor regularidad de la temperatura de colada, punto importante para la colada continua.
- Obtención exacta del peso de acero colado, lo que resulta en disminución de los restos de colada.
- Fusión in situ de las adiciones de ferroaleaciones lo que elimina aparatos de fusión auxiliares.
- Mejor calidad del acero gracias a la decantación de la alúmina.
- Independencia del elemento calefactor que permite adaptar la cuba al trabajo metalúrgico previsto, como por ejemplo repartidor de colada continua cuya cuba permite el tratamiento en vacío del acero líquido.

8.1.6. Reacciones del afino en horno cuchara

Como ya se discutido anteriormente, los procesos de cuchara calentada por arco eléctrico pueden llevar a cabo diversas reacciones de afino metalúrgico eliminación de hidrógeno y nitrógeno descarbonación y defosforación. En este capítulo se discuten estas reacciones tal como se aplican a los procesos de horno cuchara.

Desulfuración

Como ya se ha citado anteriormente, la reacción química básica que describe la termodinámica de la desulfuración de un acero tratado con aluminio bajo escorias sintéticas es:



Reacción que en el horno cuchara depende mucho de las características de la escoria. Ensayos prácticos han llevado a la conclusión de que una escoria compuesta por 10 % SiO_2 , 30 % Al_2O_3 y 60 % CaO . Adiciones de espato flúor CaF_2 son beneficiosas porque aumentan la capacidad de sulfuro de la escoria, la fluidez de la misma y la cantidad de CaO que puede disolverse en ella. También es favorable la intensidad de agitación por gas. La velocidad de desulfuración depende de:

- Capacidad de sulfuro de la escoria.
- Cantidad de escoria de cobertura.
- Energía de agitación que influye en coeficiente de transferencia de masa.

Se ha visto que si la agitación sólo se realiza inductivamente es difícil llegar a azufres bajos en poco tiempo. Por ello, las unidades en las que se prevé la necesidad de desulfurar deben contar también con agitación adicional por gas.

Los hornos cuchara pueden estar equipados de sistemas de inyección de CaSi o fundentes. La inyección de CaSi en horno cuchara se emplea principalmente para control de forma de óxidos y sulfuros. La desulfuración se consigue de forma más barata por medio de prácticas de escorias sintéticas.

Flotación de inclusiones

Se ha visto que se favorece por un barboteo moderado de argón, ya que un exceso del mismo frena la desoxidación y hace que las inclusiones flotadas a la escoria retornen al baño de acero. Sin embargo, las posibilidades que brinda el horno cuchara (recalentar..) le hacen atractivo para deshidrogenar. De todas formas, las cantidades de argón que son necesarias para deshidrogenar hacen poco atractivo al horno cuchara desde este punto de vista.

Hidrógeno

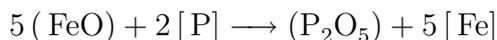
Para eliminación efectiva de hidrógeno es insuficiente la agitación inductiva, que debe ir acompañada de barboteo de gas. En cualquier caso, es siempre menor que en otras unidades, como el RH.

Nitrógeno

Las ecuaciones que rigen la eliminación de nitrógeno son aproximadamente iguales a las que había para el hidrógeno. Sin embargo, como la difusión del nitrógeno en el baño es más lenta, la velocidad es relativamente pequeña.

Defosforación

En algunas acerías se emplea también el horno cuchara para defosforar. Para ello se deja que escoria oxidada del horno de arco fusor caiga a la cuchara. A veces se añade mineral de hierro a la cuchara para aumentar el FeO de la escoria, y se sopla oxígeno para oxidar el fósforo. Este fósforo se oxida y pasa a la escoria según la reacción:



Reacción que se favorece con escorias que tengan alto contenido de FeO y bajo coeficiente de actividad para el fósforo. Una escoria adecuada para eliminar fósforo en el horno cuchara tendría:

$$40 - 55 \% \text{ CaO} \quad ; \quad 35 - 50 \% (\text{FeO} + \text{MnO}) \quad ; \quad 5 - 15 \% (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{P}_2\text{O}_5)$$

La adición de un 10 - 15 % de espato CaF_2 duplica el valor del coeficiente de reparto $(\text{P})/[\text{P}]$ del fósforo entre la escoria y el metal. Si además hay adiciones de mineral y agitación se puede defosforar un 50 %, llegando a niveles de sólo 0,004 % en el acero.

Si se ha defosforado hay que tener en cuenta la obligación de eliminar esa escoria oxidada de la cuchara antes de iniciar otros tratamientos. Es sabido que la desoxidación y desulfuración exigen escorias reductoras con bajos contenidos de FeO y otros óxidos inestables.

Como conclusión puede decirse que los hornos cuchara son muy versátiles y ofrecen al acerista flexibilidad y otras ventajas. Pueden usarse simplemente para recalentar y disminuir la temperatura del acero en la basculación, flotación de inclusiones, desulfuración, eliminación de hidrógeno, descarbonación y defosforación. Aportan más flexibilidad para operaciones de colada secuencial. Todo ello, sin embargo, a costa de una inversión de capital relativamente elevada.

En cuanto a la elección del horno, para una planta determinada no es muy fácil. Las unidades agitadas por inducción son más manejables cuando la agitación que se precisa es sólo suave. Sin embargo, para aplicaciones más exigentes como desulfuración con escorias sintéticas puede complementarse con agitación por gas. También ha de tenerse en cuenta la facilidad para desescoriar, posibilidad de producir aceros de bajo carbono o aleados, necesidades de energía y tiempos de procesos.

8.2. Proceso Argon Oxigen Decarburisation (AOD)

8.2.1. Generalidades

El procedimiento AOD (Descarbonación por Oxígeno y Argón) utiliza un convertidor especial con soplado simultáneo de oxígeno y argón por la zona inferior del aparato. Se utiliza casi exclusivamente para la fabricación de aceros inoxidable de muy bajo carbono y alto cromo. Este soplado permite la descarbonación de un baño con contenido alto de cromo, hasta niveles bajos de carbono, con pérdida muy poco importante de cromo y manteniendo el baño a temperaturas de 1600 a 1700 °C.

No significa ninguna modificación al fundamento de la descarbonación bajo vacío. En realidad, en aquélla la disminución de la presión parcial del monóxido de carbono se hace bajando la presión total y en el AOD a base de dilución con argón (u otros gases).

El AOD trabaja en dúplex horno eléctrico-convertidor y ofrece ventajas significativas que han sido ya puestas de manifiesto por distintos autores. Por ejemplo, además de utilizar materias primas de menor precio, ferrocromo «duro», los baños utilizados pueden presentar contenidos iniciales de carbono más elevados que en los procesos al vacío. La inversión del convertidor no es muy cara y desde luego resulta más barata que un segundo horno eléctrico. Se obtiene una rápida y fácil desulfuración y la calidad del acero producido es mejor y más uniforme que en el proceso convencional.

Se utiliza, por ejemplo, para fabricar aceros con 0,020 % de carbono, 18 % de

cromo y 9 % de níquel, junto con otros del tipo 18/8. Este proceso comenzó a desarrollarse hacia el año 1953 en los Metallurgical Laboratories de la Union Carbide Corporation, U.S.A. En colaboración con la acería de Joslyn Stainless Steel, de Fort Wayne, Indiana, EEUU, comenzó la operación, primero a escala piloto y después en un convertidor de producción de 15 toneladas de capacidad. A partir de entonces, su desarrollo ha sido espectacular.

Hasta 1953 había dificultades para fabricar en hornos de arco aceros inoxidable de muy bajo contenido de carbono. Las dificultades principales eran debidas a que los electrodos cedían carbono al baño en la segunda escoria reductora y que al intentar disminuir el carbono por oxidación se producía también una importante pérdida de cromo.

Al descubrirse la estrecha relación que hay entre la oxidación del carbono, la oxidación del cromo, la temperatura del acero y la presión parcial del CO que se desprende del baño, se comenzó a estudiar la sustitución del proceso tradicional de fabricación en horno eléctrico de arco, utilizado hasta entonces, y desarrollar alguno nuevo que no tuviera los inconvenientes citados anteriormente.

En la marcha que se sigue para fabricación de acero inoxidable clásico en horno de arco, cuando en la fase oxidante se llega a alcanzar contenidos de carbono inferiores a 0,10 % y se continúa la oxidación del carbono, hay una fuerte oxidación del cromo que pasa a la escoria en forma de óxido y se pierde con el consiguiente perjuicio económico.

En condiciones normales, en los hornos eléctricos es muy difícil fabricar con buen rendimiento económico aceros muy bajos en carbono ($<0,08\%$) y altos en cromo (16 a 20 %). Esta circunstancia crea dificultades en el proceso por la gran pérdida de cromo que se produce por oxidación. Cuando se fabrican aceros de muy alto porcentaje de cromo, es imprescindible además emplear ferrocromo "fino" (de bajo contenido en carbono) que no aumente la cantidad de carbono en el baño fundido o la aumente muy poco. Pero ese ferrocromo fino es mucho más caro que el ferrocromo «duro» (alto en carbono), que no se puede utilizar en la fase final del proceso porque elevaría el contenido en carbono del baño hasta valores que se salen del intervalo de especificación.

En el proceso AOD, en cambio, se puede utilizar el ferrocromo duro, relativamente barato, porque en ese proceso, aunque el carbono del baño aumenta en una fase de la operación, luego la descarburación, como se verá más adelante, no ofrece dificultades y, además, en esa fase descarburante del proceso no se oxida el cromo.

El proceso AOD ofrece la ventaja que durante la fase oxidante se inyecta argón y oxígeno y se consigue que se produzca la oxidación del carbono con preferencia a la del cromo. Así, se pueden fabricar económicamente y sin dificultad aceros de muy alto porcentaje de cromo (16 a 30 %) y contenidos de carbono tan bajos como 0,03 % sin pérdidas importantes de cromo. El oxígeno que se emplea en este proceso

sirve, como el empleado en los hornos eléctricos de arco, para oxidar el baño y llevar el contenido de carbono hasta límites muy bajos.

8.2.2. Oxidación de carbono y cromo en el baño de acero

Cuando en la marcha clásica en horno eléctrico de arco en la fase oxidante se descarbura un acero alto en cromo, la temperatura y la presión tienden a cumplir las condiciones de equilibrio indicadas en la figura 8.19. En ella se indica la cantidad de cromo que puede existir en el baño, en presencia de una cierta cantidad de carbono en diversas condiciones de presión y temperatura.

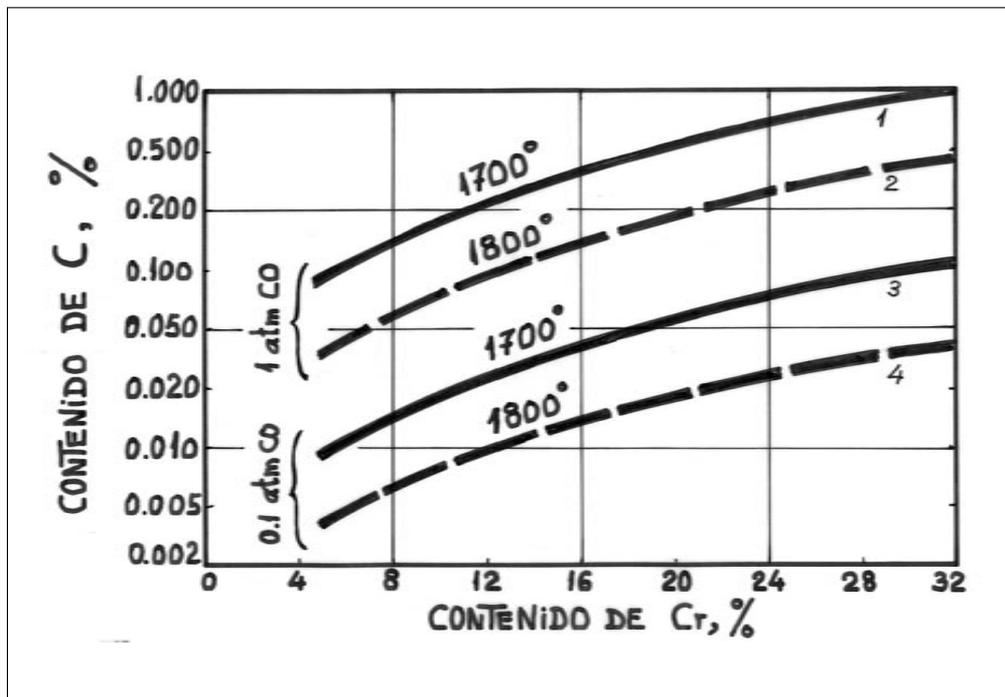


Figura 8.19: Contenidos en cromo y carbono que corresponden a diversas temperaturas y a presiones varias de CO

Se observa que, al disminuir el contenido en carbono disminuye muy sensiblemente el contenido de cromo. Además se ve también que esta ley varía con la temperatura del acero y con la presión parcial del CO producido en la oxidación del carbono. A una temperatura determinada (por ejemplo, 1700 °C) y a la presión atmosférica (1 atm) cuando en el proceso de oxidación disminuye el carbono del baño, también disminuye mucho el de cromo; se ve en las curva 1 de la misma figura:

Carbono	0,300 %	0,200 %	0,100 %
Cromo	16 %	12 %	6 %

Se observa, por lo tanto, que fabricando en el horno eléctrico de arco aceros altos en cromo hay una pérdida muy importante de cromo y que, para contenidos en carbono inferiores a 0,200 % de carbono, el contenido en cromo baja muy rápidamente

y se pierde en la escoria. Al disminuir el carbono disminuye la cantidad de cromo en el acero cada vez con más intensidad.

Realizando diversos estudios se observó que esa ley se modifica al variar la temperatura del acero o la presión del ambiente que actúa sobre el baño metálico. Al elevarse la temperatura a 1800 ° C se observa que a la misma cantidad de carbono que en el ejemplo anterior, corresponde más cromo que aquél, curva 2. Así, por ejemplo, para:

Curva 2 : 1800 °C y 1 atm ; C = 0,100 % ; Cr = 12 %

Curva 1 : 1700 °C y 1 atm ; C = 0,100 % ; Cr = 6 %

Se observa, por lo tanto, que al aumentar la temperatura de 1700 °C a 1800 °C manteniendo constante la presión atmosférica, el porcentaje de cromo que puede haber en presencia de un 0,1 % de carbono pasa de ser 6 % a llegar a 12 %. La elevación de la temperatura del proceso tiene el inconveniente de aumentar el consumo de energía eléctrica y el desgaste de refractario.

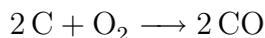
Cuando se disminuye la presión parcial del CO de 1 atm a 0,1 atm, se observa que la pérdida de cromo es menor que en el caso de trabajar a presión atmosférica (misma figura 8.19, curva 3)

Curva 3 : 1700 °C y 0,1 atm ; C = 0,100 % ; Cr = 32 %

Curva 1 : 1700 °C y 1 atm ; C = 0,100 % ; Cr = 6 %

Se comprende, al observar esos resultados, que si se consigue reducir la presión parcial del monóxido de carbono CO de 1 atm a 0,1 atm, será posible, por ejemplo, fabricar sin grandes dificultades aceros con 0,05 % de carbono y 18 % de cromo, sin que se produzcan pérdidas importantes de cromo por oxidación. En la figura 8.20, que representa el equilibrio carbono / oxígeno, se tienen tres curvas correspondientes a presiones parciales de CO iguales a 1,0; 0,7 y 0,4 atm, respectivamente.

La presión tiene, por tanto, mucha importancia. Sin embargo, realmente, la presión importante es la que corresponde a la reacción



y en ese caso es la presión parcial del CO la que regula la reacción.

Por tanto, en el caso presente, la presión a considerar es la presión parcial del CO. Esta presión parcial del CO se puede modificar de dos formas distintas:

1. Trabajando dentro de un recipiente en el que se haga el vacío, lo cual es bastante complicado y caro. Son los procesos (ASEA, VOD, RH-OB...) que se trataron anteriormente.

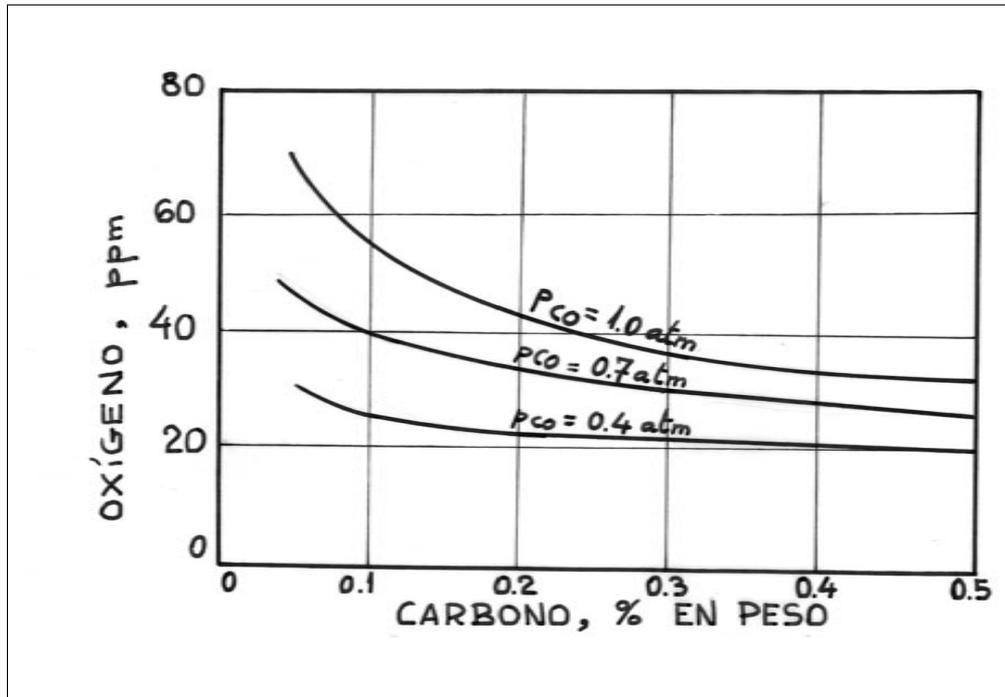


Figura 8.20: Presión de equilibrio del CO en el último líquido en solidificar como función de los contenidos en carbono y oxígeno

2. Inyectando en el proceso, junto con el oxígeno, un gas inerte, como el argón, que al encontrarse luego en el baño de acero disminuye la presión parcial del CO.

Como en una atmósfera gaseosa la presión total es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que hay en esa atmósfera, se comprende que, si se crea en el baño de acero una atmósfera constituida por CO (como consecuencia de la oxidación del carbono por el oxígeno) y por argón que se inyecta, disminuirá la presión correspondiente al CO.

La presión en la superficie del baño de acero sigue siendo aproximadamente 1 atm, que es la que tienen que vencer los gases para escapar del baño. Esta presión es igual a la suma de la presión del CO más la presión de argón. Tendremos, por lo tanto, que la presión del CO será 1 menos la presión del argón. Con el empleo de argón en este proceso se puede disminuir, por lo tanto, la presión del CO y, por ello, es posible la fabricación de aceros inoxidable bajos en carbono y altos en cromo, sin que se produzca una fuerte oxidación y pérdida del cromo, a diferencia de lo que ocurre en el antiguo proceso clásico de fabricación de aceros altos en cromo en el horno eléctrico de arco.

En la figura 8.21 se compara el poder reductor (tendencia a oxidarse) de algunos elementos, entre ellos el cromo, con el del carbono a diferentes presiones.

A veces el argón se sustituye, si las circunstancias y calidad del acero a obtener lo permiten, por otros gases diluyentes más baratos, cuales son nitrógeno, aire o vapor

de agua a presión.

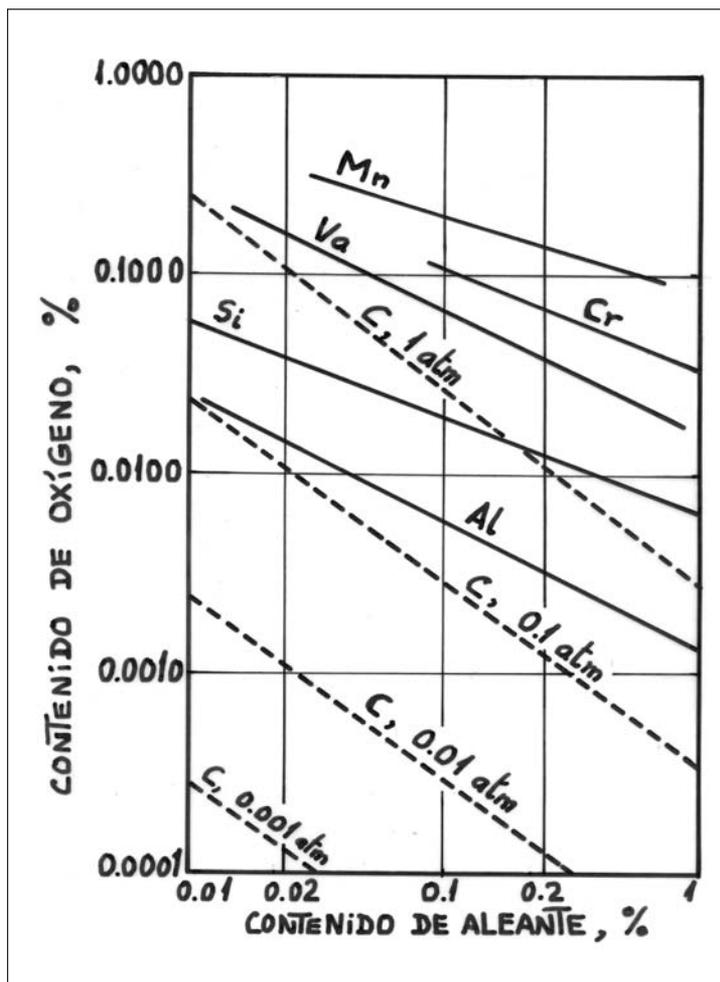


Figura 8.21: Contenidos de elementos de aleación en equilibrio con diversas cantidades de oxígeno en baños de acero a 1600 °C

8.2.3. Método operativo clásico

Los convertidores AOD trabajan siempre en proceso dúplex, en serie con un horno eléctrico de arco o, a veces, con un oxi-convertidor. La primera parte de la fabricación se hace en el horno de arco y la segunda y final en el AOD. La figura 8.22 representa las dos etapas que componen este proceso dúplex:

8.2.4. Fusión de la carga sólida en horno de arco

En el proceso clásico se emplean generalmente para la carga chatarras de acero inoxidable cromo-níquel (18/8 aproximadamente). Se carga también material alto en carbono (para dar hervor) formado por lingote de moldería, afino o chatarra de fundición gris. También el ferrocromo «duro» (alto en carbono), ferro-silicio-cromo, ferromanganeso y níquel que sean necesarios para ajustar la composición especificada. Una vez fundida la carga en el horno de arco se tiene un baño de acero cuya

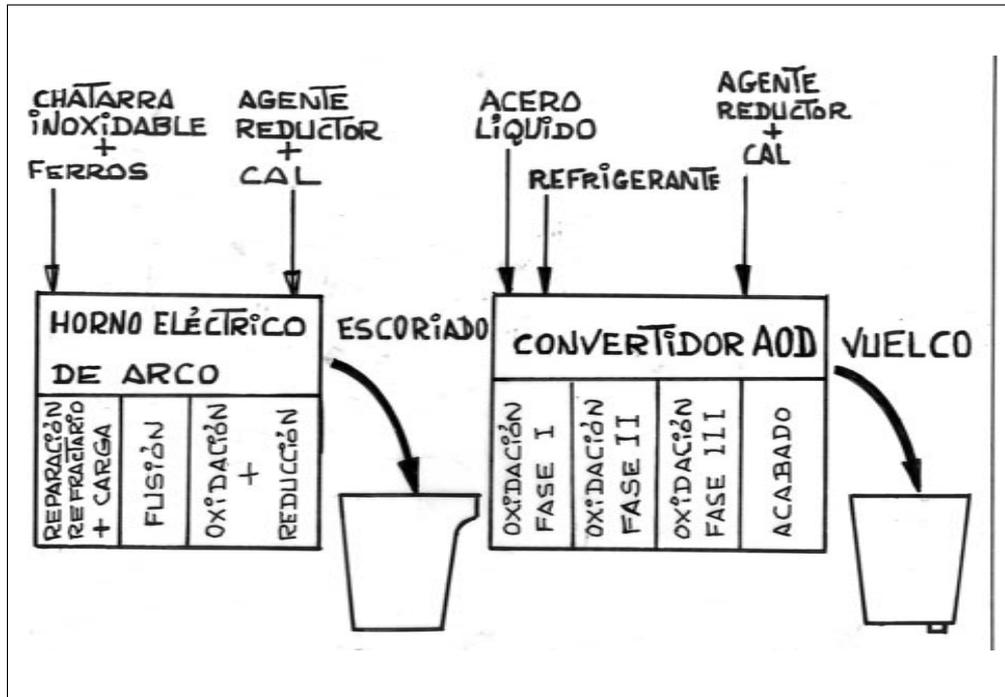


Figura 8.22: Ejemplo de operación horno eléctrico-convertidor AOD

composición aproximada es:

C	Si	Cr	Ni	Mn	S
0,75 %	0,50 %	18,50 %	8,20 %	1,20 %	0,050 %

En algunos casos se puede hacer un ligero hervido que favorezca la defosforación. Este hervido puede provocar pérdida de cromo que se oxida hasta Cr_2O_3 y pasa a la escoria y se pierde con ella. La adición de cal, cal magnésica o dolomía frena este efecto desfavorable tal como se ve en la gráfica de la figura 8.23.

En la figura 8.24 se comparan las energías libres de las reacciones de reducción del óxido de cromo por tres productos reductores distintos, cuales son: carbono (polvo de carbón), carburo cálcico (puro o como CascoCarbide) y silicio (ferrosilicio o formando parte del ferrocromo «duro» alto en carbono). Puede verse que las pendientes de las líneas correspondientes a las reacciones de carbono o carburo tienen una fuerte inclinación, lo que muestra que el poder reductor de ambos agentes crece espectacularmente al aumentar la temperatura del baño de acero. Es decir, que la adición de productos reductores frena la oxidación del cromo y su paso a la escoria.

La metalurgia normal para inoxidable parte, como se ha visto, de chatarra de acero inoxidable y ferroaleaciones aportadoras de cromo y silicio, entre otros elementos. El empleo de una ferroaleación tipo ferro-cromo-silicio permite eliminar el ferrosilicio disminuyendo así la formación de sílice y, en consecuencia, la cantidad de cal necesaria para escorificarla. El resultado colateral es la manipulación de menor cantidad de escoria. Ese silicio presente frena la oxidación y pérdida de cromo.

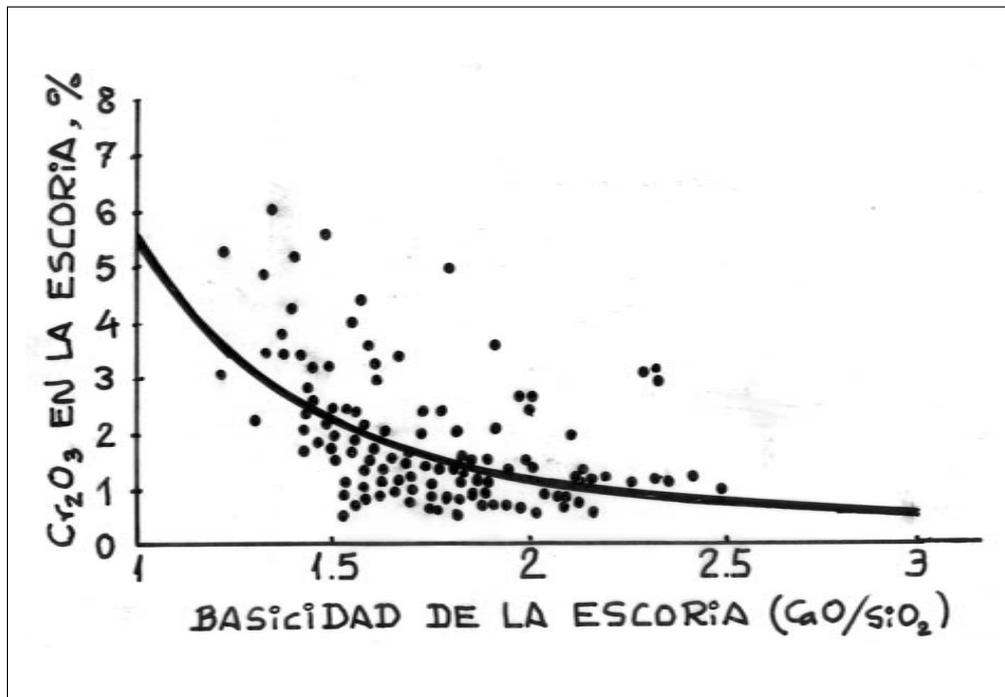


Figura 8.23: Influencia de la basicidad de la escoria en la oxidación del cromo en coladas de inoxidable en horno eléctrico

Como el carburo de calcio es reductor más energético que el carbón y el silicio, su empleo puede permitir inyectar polvo de filtros junto con carburo para recuperar metales y aumentar la recuperación de cromo y níquel.

El carburo CascoCarbide es un carburo cálcico «dopado» con hidrocarburos y sustancias minerales, según una fórmula patentada. Como puede concluirse del diagrama de energías libres citado anteriormente, la recta del carburo está por debajo de las otras en el intervalo de temperaturas de 1500 - 1650 ° C prevalecientes en el horno de arco, lo que indica que su poder reductor supera al de los otros productos.

Durante el proceso de reducción, y después de la inyección del carburo sobre la escoria de colada, este producto, al igual que lo hace el carbón en polvo, libera monóxido de carbono CO. El espumado que se produce es sustancialmente mayor que con carbón. Por otra parte, este espumado comienza a temperaturas menores, unos 1550 °C. Esto implica la ventaja de alcanzar espumado de escoria durante la mayor parte de la colada. Y no sólo eso; otra ventaja adicional es que no se precisa soplar oxígeno para formar CO y escoria espumosa.

Adicionalmente, puede apreciarse que la fusión en el horno se tranquiliza. La observación a través de la puerta de trabajo muestra que el carburo realiza su trabajo incluso frente a una escoria con un contenido extremadamente alto de cromo. El mero hecho de formarse la escoria espumosa indica que el óxido de cromo se está reduciendo aceleradamente hasta cromo metal que se incorpora al baño de acero.

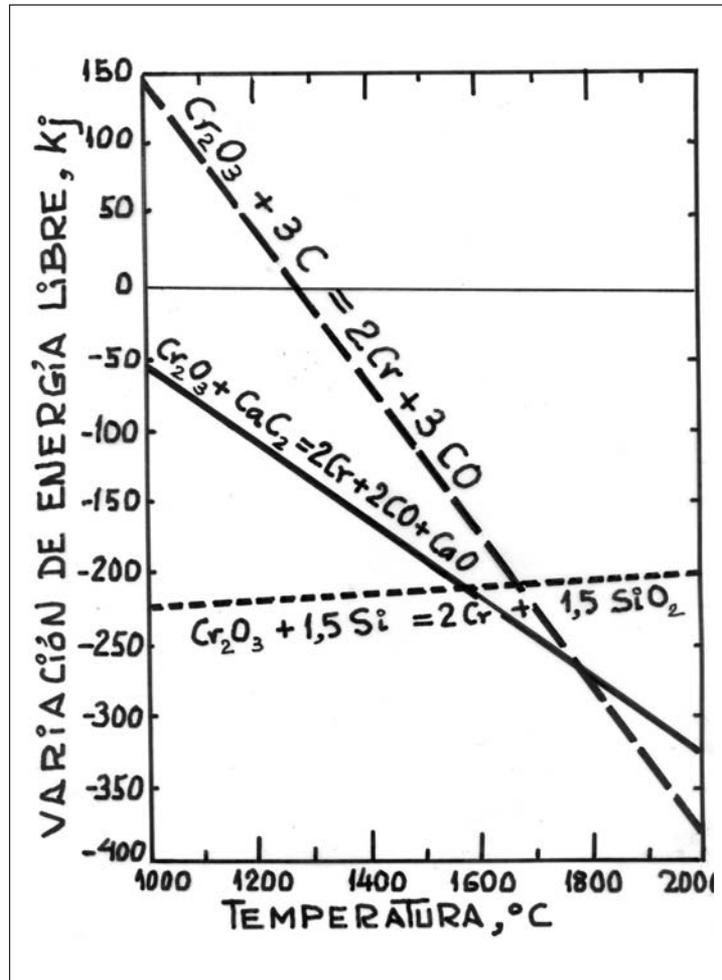


Figura 8.24: Recuperación del cromo de la escoria espumosa formada en la colada de acero inoxidable en el horno eléctrico de arco

Hay un beneficio económico derivado de la mayor recuperación de cromo, menor consumo de formadores de escoria, menor consumo de carbón y oxígeno, así como disminución del ataque al refractario básico del horno. Ventajas adicionales son reducción del tiempo tap-to-tap de colada, y del volumen de escoria, así como obtener una escoria más pura y libre de elementos contaminantes. Esto último no sólo tiene ventaja económica sino ambiental, ya que permite utilizar vertederos normales, no aislados.

El diagrama de barras de la figura 8.25 ilustra la disminución de formación de Cr_2O_3 mediante la adición de carburo en coladas de acero 18/8 con molibdeno. Los cuadros 8.1 y 8.2 expresan cuantitativamente los ahorros obtenidos.

Al final de la fase de fusión y ligero afinado se desescoria y se toman muestras para conocer la composición y temperatura del baño, que a su entrada en el convertidor es de 1450 - 1500 °C.

AHORRO EN ESCORIA Y REDUCCIÓN				
	Conven- cional	Trat. Casco Carbide	Costos, €/unidad	Ahorro, €/colada
CARBURO CASCO, kg	0	1000	0,60	-600,00
CAL, DOLOMIA, ETC., kg	3700	2500	0,18	210,00
FERROSILICIO, kg	300	300	0,40	0,00
POLVO DE CARBÓN, kg	800	400	0,20	80,00
OXÍGENO, Nm ³	400	200	0,20	40,00
TOTAL €/colada				-270,00
AHORRO EN ALEANTES				
	Conven- cional	Trat. Casco Carbide	Costos, €/unidad	Ahorro, €/colada
Cr ₂ O ₃ EN ESCORIA, %	15	5		
Cr EN ESCORIA, kg	626	198	0,90	385,02
HIERRO EN ESCORIA, kg	90	20	0,15	10,50
Mn EN ESCORIA, kg	80	20	0,80	48,00
TOTAL €/colada				443,52

Cuadro 8.1: Ahorro en el proceso Casco Carbide (1)

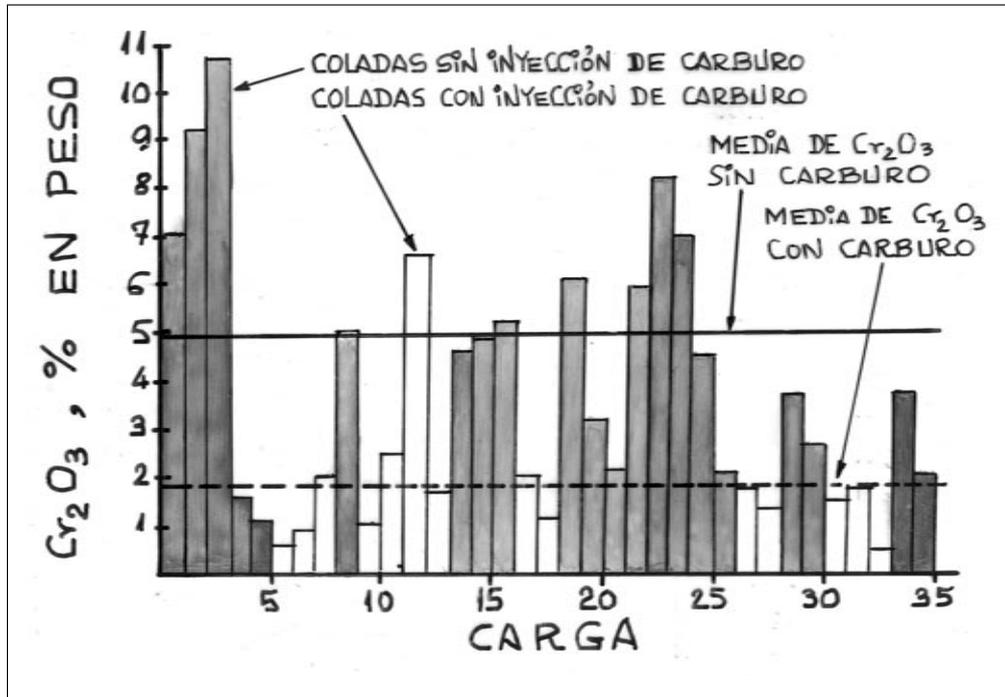


Figura 8.25: Proceso Casco Carbide en acero 18:8 con molibdeno

8.2.5. Tratamiento del baño en convertidor AOD

La figura 8.26 representa esquemáticamente la disposición y revestimiento refractario (dolomía o magnesia casi siempre) de un convertidor AOD. A continuación se presenta un resumen de la operación de este proceso.

Después de un desescoriado se pasa la carga líquida al convertidor AOD en el que se opera de la siguiente forma (gráfica de práctica AOD de la figura 8.27).

1. Soplado en tres períodos con proporciones variables de oxígeno y argón. Al principio se emplea más oxígeno que argón. Se comienza con una proporción oxígeno/argón de 3 a 1 (Fase I). Luego 1 a 1 (Fase II) y al final de 1 a 3 (Fase III).
2. Se hacen adiciones de cal CaO y ferrosilicio $FeSi$ ajustadas de forma que la escoria resultante de la oxidación del silicio a sílice SiO_2 y posterior reacción con la cal tenga una relación de basicidad CaO/SiO_2 aproximadamente igual a 2,5. Esta escoria será desoxidante y desulfuradora.
3. Se barbotea argón para agitar y favorecer el contacto del baño con la escoria desulfuradora de aluminio, siliciuro de cal y espato.
4. Se ajusta la composición y temperatura del acero.
5. Se bascula el convertidor y se pasa el acero elaborado a la cuchara de colada.

AHORRO EN PROCESO				
	Conven- cional	Trat. Casco Carbide	Costos, €/unidad	Ahorro, €/colada
Tiempo de corriente, min	74	71	80,00	240,00
Energía, kW.h	39100	38600	0,021	10,50
TOTAL €/colada				250,50
AHORRO EN ESCORIA				
	Conven- cional	Trat. Casco Carbide	Costos, €/unidad	Ahorro, €/colada
Cantidad de escoria de H.E.A., kg/colada	6100	5795		
Tratamiento y evacua- ción de la escoria	6100	5795	50,00	15,25
TOTAL €/colada				15,25

Cuadro 8.2: Ahorro en el proceso Casco Carbide (2)

Al comenzar el soplado, Fase I, con altas proporciones de oxígeno, se produce una fuerte oxidación del acero. El carbono baja a 0,15 % de carbono y la temperatura alcanza los 1500 a 1650 °C.

En el segundo período de soplado, Fase II, al disminuir la proporción de oxígeno, es menor la elevación de temperatura y menor la velocidad de descarburación. Las magnitudes son ahora de 0,09 % de carbono y 1710 °C de temperatura.

Finalmente, en el tercer período, Fase III, con menos oxígeno y más argón, se baja el carbono al nivel deseado, 0,03 %, y la elevación de temperatura es algo menor.

La descarburación mediante oxígeno y argón en diferentes proporciones para cada una de las tres fases del período oxidante se realiza a velocidades variables, según sea la composición química de partida y las condiciones de soplado. En el gráfico mencionado se dan los valores medios, tanto de eliminación de carbono como de elevación de temperatura.

El sistema de control del soplado en las Fases I y II viene dictado, principalmente, por la variación de temperatura, ya que se toman valores determinados de la misma como indicación del fin de la fase, obligando al mismo tiempo a que en esos dos períodos el carbono se mantenga en los niveles esperados.

En la primera fase se realiza la máxima oxidación del proceso; puede decirse que el 60 % del oxígeno se consume en este período. Son muy importantes para el desarrollo de esta fase los contenidos iniciales de carbono y silicio. Valores superiores a

1. FUSIÓN EN HORNO DE ARCO**a) CARGA:**

- Chatarra de acero inoxidable 18/8
- Ferrocromo «duro» carburado
- Lingote moldería o chatarra gris

b) PRODUCTO:

- Acero 0,75 % C ; 0,50 % Si ; 18 % Cr ; 8 % Ni
- temperatura: 1500 °C

2. AFINO EN CONVERTIDOR AOD**a) SOPLADO DESCARBURADOR O₂/Ar**

- O₂/Ar 3/1 → 0,15 % C ; 1650 °C
- O₂/Ar 1/1 → 0,09 % C ; 1710 °C
- O₂/Ar 1/3 → 0,03 % C ; 1730 °C

b) SOPLADO REDUCTOR, SÓLO ARGÓN

- Adición (CaO + FeSi)
- Hasta que escoria (CaO)/(SiO₂) ≥ 2,5
- (Cr) , (Mn) , (Fe) → [Cr] , [Mn] , [Fe]

c) SOPLADO DESULFURADOR, SÓLO ARGÓN

- Adición (Al + SiCa + CaF₂)
- Hasta escoria básica y reductora
- El azufre es <0,015 %

d) AJUSTE FINAL DE COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA**3. COLADA A CUCHARA Y COLADA CONTINUA**

Cuadro 8.3: PROCESO AOD PARA ACERO INOXIDABLE

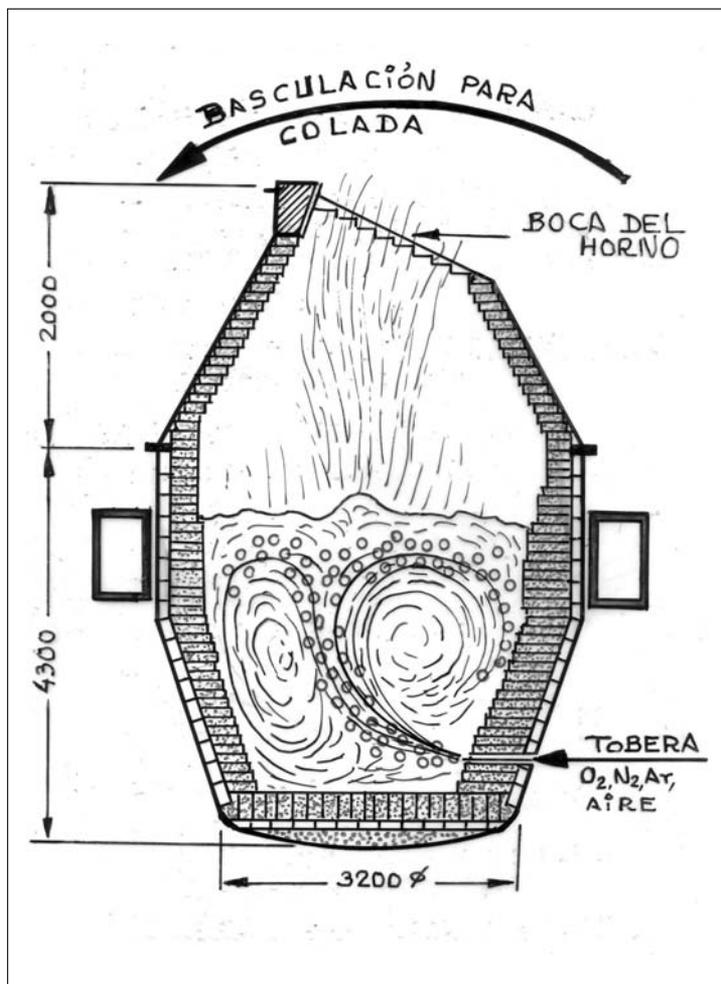


Figura 8.26: Convertidor A.O.D.

0,70 % de carbono y 0,25 % de silicio implican mayor duración de la fase, consumos mayores de oxígeno y temperaturas superiores a 1650 °C, requiriendo adiciones frías para mantener la temperatura de fin de fase en unos 1640 - 1660 °C.

En los convertidores iniciales (Olarra, S.A.) se han experimentaron coladas con un contenido de carbono comprendido entre 0,40 y 1,50 %, y contenidos variables de silicio, sin ningún problema. Contenidos de 0,20 - 0,30 % de silicio aparecen como recomendables al evitar las pérdidas de cromo en el horno eléctrico y proporcionar la exotermia suficiente para alcanzar la temperatura requerida al final de la Fase I.

La Fase II del soplado se realiza con menores incrementos de temperatura y de eliminación de carbono que en la Fase I como consecuencia de la disminución de la relación oxígeno/argón. Esta relación toma el valor de 0,459 para comenzar la Fase III de descarburación. Al contrario que en los períodos anteriores, el factor predominante de esta etapa es el contenido de carbono y no la temperatura. El control de la velocidad de descarburación y el conocimiento de la cantidad exacta de oxígeno introducido desde el principio dictan el tiempo de soplado de esta fase.

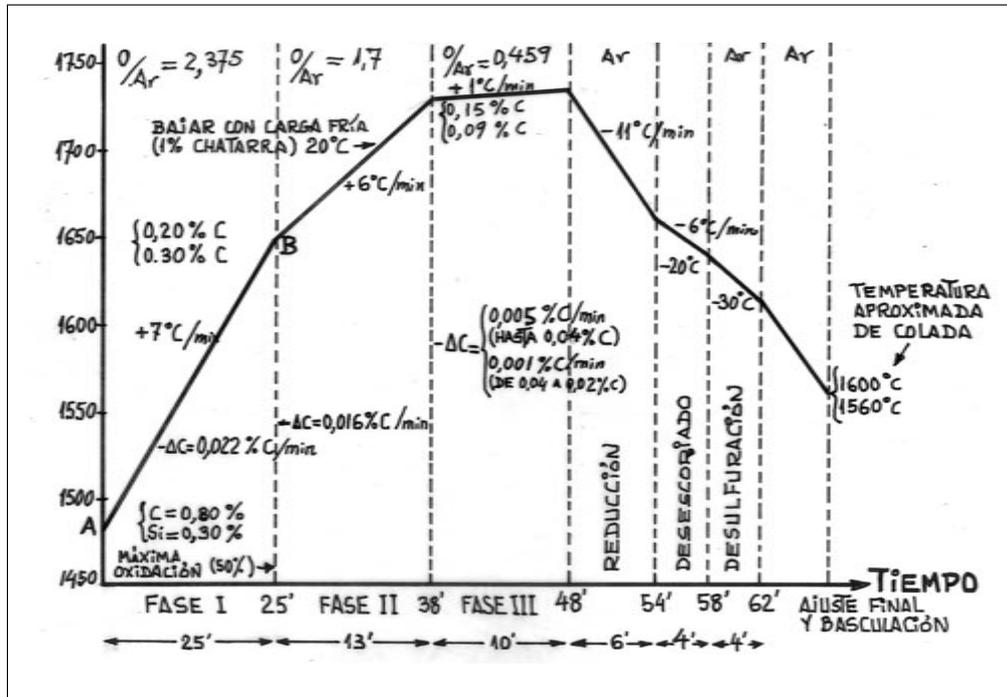


Figura 8.27: Gráfica representativa de la práctica AOD en Olarra, S.A.

Hoy día se está sustituyendo parcialmente el argón diluyente por nitrógeno. Esto en el caso de los aceros austeníticos, ya que en los ferríticos o martensíticos sería peligroso para la calidad del acero. La marcha operativa se modifica así:

Fase I: Con nitrógeno. Iguales cantidades que en la práctica con argón.

Fase II: Algunos con nitrógeno, otros con argón. Normalmente puede hacerse con nitrógeno.

Fase III: Sólo argón, como también las operaciones posteriores de reducción, desulfuración y homogenización.

En la actualidad se están modificando algunos convertidores, a los que se implantan lanzas de oxígeno («top lance») al estilo de los oxiconvertidores de acería integral al carbono. También se sopla aire comprimido, es decir, proporción oxígeno / nitrógeno igual a $1/4$, soplando por toberas inferiores por el fondo, al igual que se hacía en los primitivos convertidores Bessemer o Thomas. En algunos casos se ha ensayado el soplado de vapor de agua a presión. Resumiendo, puede decirse que el convertidor AOD ha pasado, tanto en diseño como en operación, a trabajar como los convertidores de soplado combinado empleados en siderurgia integral.

A continuación, agitando con argón, se añade cal y ferrosilicio para desoxidar el baño y recuperar el cromo, manganeso y hierro que se habían oxidado y pasado a la escoria, obteniéndose en el baño metálico rendimientos en cromo superiores al 99%, con respecto a las cargas realizadas. La dosificación de cal y ferrosilicio es tal que la

escoria formada tendrá una basicidad de 1,5.

En la figura 8.28 se observa que en el proceso AOD el contenido en cromo baja de 21 a 18% y, después de la adición de ferrocromo sube a 19% (puntos A', B', C' de la gráfica). La recuperación de los elementos metálicos (Cr, Mn y Fe) es prácticamente total, al poder proporcionar la atmósfera reductora mediante un balance detallado del oxígeno, favorecido por el conocimiento exacto de la cantidad de dicho gas introducido en el proceso.

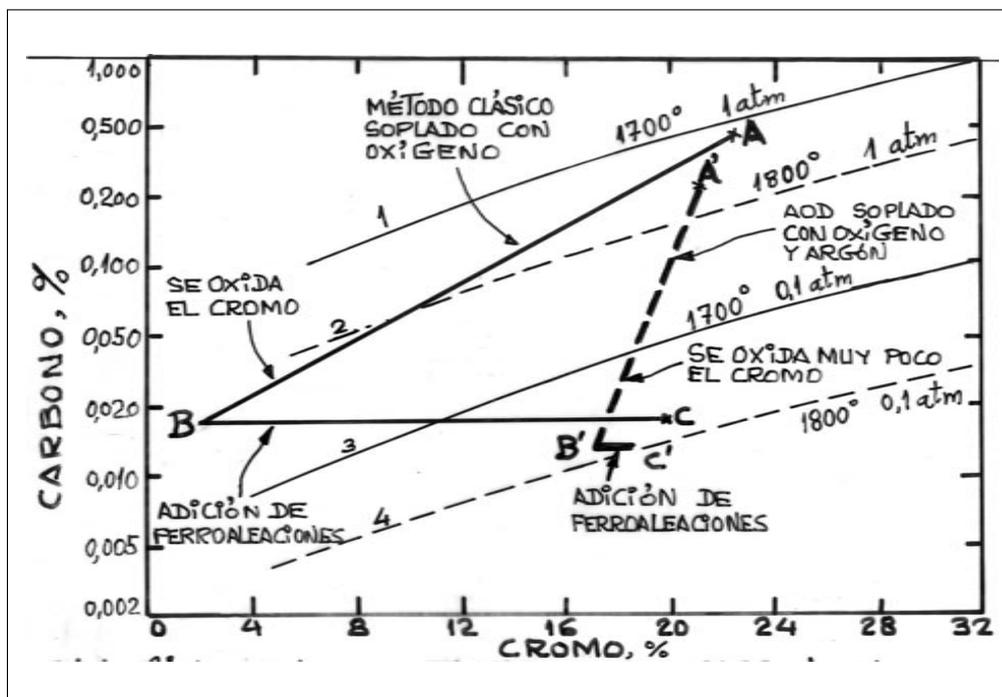


Figura 8.28: Evolución de los contenidos de carbono y cromo en coladas de inoxidable en horno de arco y en AOD

La desulfuración se realiza a continuación con el paso de argón que pone en contacto el acero con una nueva escoria básica formada con aluminio, siliciuro de calcio y espato flúor, alcanzándose fácilmente contenidos de azufre inferiores a 0,010 %, con una velocidad de desulfuración de 0,008 % de azufre por minuto. Después se elimina esta escoria, una vez agotada.

En el cuadro 8.4 se comparan los rendimientos de desulfuración obtenidos sin adición especial, con cal, con cal más espato, o con cal más espato más siliciuro de calcio.

El último paso, antes de la basculación a la cuchara de colada, es el ajuste final de composición y temperatura si fuere necesario. Es digno de mención, en este punto, la flexibilidad que se alcanza al poder elevar la temperatura, si se hace necesario, al final de la colada. Adiciones perfectamente calculadas de ferrosilicio FeSi, junto con soplado en condiciones de fase I, permiten un ajuste con precisión casi matemática

No.	GRADO	% AZUFRE		OPERACIÓN
		INICIAL	FINAL	
1	316	0,021	0,010	Ningún tratamiento especial
2	304 L	0,022	0,004	180 kg adicionales de cal en la mezcla reductora. No más actuaciones
3	305	0,037	0,006	Desescoriado. 230 kg cal + 30 kg espato. 2 min soplado Ar a 336 m ³ /h
4	304	0,050	0,007	Desescoriado. 270 kg de cal + 20 kg espato + 45 kg SiCa. 3 min soplado Ar a 336 m ³ /h

Cuadro 8.4: **Desulfuración en un convertidor AOD de 15 t.**

de la temperatura final. En este proceso se consigue una gran precisión en la composición química del acero y en su temperatura de colada.

Se señala también que la temperatura de basculación puede ser inferior a la convencional de la práctica con horno de arco debido a que el acero elaborado en convertidor tiene mejor colabilidad.

La duración del proceso AOD es de hora y media, aproximadamente. En este proceso, debido a la oxidación inicial del baño, el contenido de cromo suele bajar de 18 a 16 %, aproximadamente, o sea, que un 2 % pasa a la escoria y luego se recupera casi completamente.

El revestimiento refractario se hace con ladrillos de magnesia-cromo de 20 % de cromo y 60 % de magnesia MgO, y su duración es de unas 30 coladas. También magnesia-carbono o dolomia.

En la figura 8.28 antes citada se indica la marcha ABC, que es la utilizada en los hornos eléctricos clásicos. Empleándola, se pierde mucho cromo y hay que hacer adiciones de ferrocromo fino (bajo en carbono) de alto precio. La marcha A'B'C' es la marcha en el convertidor AOD. Se sopla argón y oxígeno y se adiciona ferrocromo duro.

En la marcha clásica, el cromo baja de 19 a 3,5 % y, en el segundo ejemplo, de 21 a 18 %. Como en ambos casos se desea alcanzar un cromo de 19 % aproximadamente, se observa que en el horno eléctrico habrá que incorporar 15,5 % de cromo y en el AOD solamente 1 %.

8.2.6. Comparación entre prácticas operativas HEA y AOD

A continuación se comparan la marcha antigua en horno de arco y la actual en AOD, encaminadas ambas a la obtención de un acero austenítico de menos de 0,07 % C, 18,00 % Cr y 8,2 % Ni.

1. Horno eléctrico de arco:

- Análisis químico de fusión: 0,50 % C y 14,50 % Cr.
- Se sopla con oxígeno y queda: 0,06 % C; 8,50 % Cr; 1830 - 1850 °C.
- Reducción y carga fría: FeSiCr, FeSi, FeCr fino, chatarra austenítica (cantidades importantes).
- Desescoriado.
- Adición de escoria reductora con desulfuración y homogeneización.
- Control para análisis químico.
- Ajuste analítico y de temperatura.
- Colada final a lingoteras o máquina de colada continua.
- Tiempo estimado: 3 horas 45 minutos a 4 horas 15 minutos (hoy día, en los hornos UHP, sería bastante menor).
- Recuperación de cromo: 94,50 %.
- Rendimiento metálico: 91,50 %.

2. Convertidor AOD:

- Carga de chatarra y fusión en HEA.
- Análisis químico del fundido: 0,75 % C y 18,50 % Cr.
- Soplado con oxígeno y argón.
- Al final del soplado hay: 0,04 % C, 16,00 % Cr y 1730-1740 °C.
- Cr oxidado: 2,5 %.
- Reducción con FeSi, CaO y CaF₂ (pequeñas cantidades).
- Control para análisis químico.
- Desescoriado.
- Desulfuración con: (13 kg CaO)/t, (3 kg CaSi)/t, (3 kg CaF₂)/t.
- Ajuste analítico y de temperatura.
- Colada a lingoteras o máquina de colada continua.
- Tiempo estimado: 1 hora 20 minutos a 1 hora 40 minutos.
- Recuperación de Cr: 99,50 %.
- Recuperación de Mn: 93,00 %.
- Rendimiento metálico: 98,00 %.

8.2.7. Aceros fabricados en AOD

En AOD se han producido con éxito los siguientes tipos de aceros y aleaciones especiales:

- Todos los aceros inoxidables de tipos austeníticos, ferríticos y martensíticos, incluyendo los AISI 200, 300 y 400 además de los 304 L - Hi Prof., 25/20 y Ferralium 42-V. Composiciones tales como $\leq 0,05\%$ C, $25,2\%$ Cr, $5,2\%$ Ni, $0,17\%$ N se fabrican normalmente en AOD.
- Aleaciones especiales como Incoloy 800 e Inconel 600, Hasteloy-C, etc..
- Otros metales y aleaciones obtenidos en plan experimental han sido ferrocromo afinado, hierro puro, 26 Cr - 1 Mo, aleaciones especiales para forja análogas a los tipos AISI 4320 y 4340, y un acero de herramientas designado por S-V (0,35/0,40% C con Si, Cr, V y Mo).
- Se consideran asimismo excelentes las posibilidades de obtener aceros al silicio, muy bajos en carbono ($\leq 0,01$) y en S ($\leq 0,01$) destinados a uso eléctrico.

8.3. Convertidor CLU

Es un proceso desarrollado a finales de 1972 conjuntamente por las acerías Creusot-Loire, de Francia, y Uddeholm, de Suecia. El fundamento termoquímico del procedimiento es el mismo que en el caso AOD, es decir, la fusión en horno eléctrico de una carga de acero inoxidable y transferencia a un convertidor en el cual se sopla una mezcla de oxígeno y vapor de agua en el acero a través de toberas dispuestas en el fondo del convertidor.

Este gas (figura 8.29) no se inyecta con el oxígeno por tobera lateral sino por toberas situadas el fondo, en una disposición que recuerda mucho los convertidores Bessemer de los primeros tiempos de la acería de conversión.

Ofrece como el AOD ventajas importantes, pero asimismo se destaca el empleo de vapor de agua con precio mucho menor que el argón, el cual sólo se usa en forma restrictiva. Por otra parte, se pone en juego una baja temperatura de afino que alarga la duración del revestimiento del convertidor.

8.4. Proceso CAS-OB

Es el mismo proceso CAS descrito en su momento al que se dota de una lanza de oxígeno para descarburar y aumentar temperatura en el caso de coladas de arrabio que vienen frías del horno alto o convertidor.

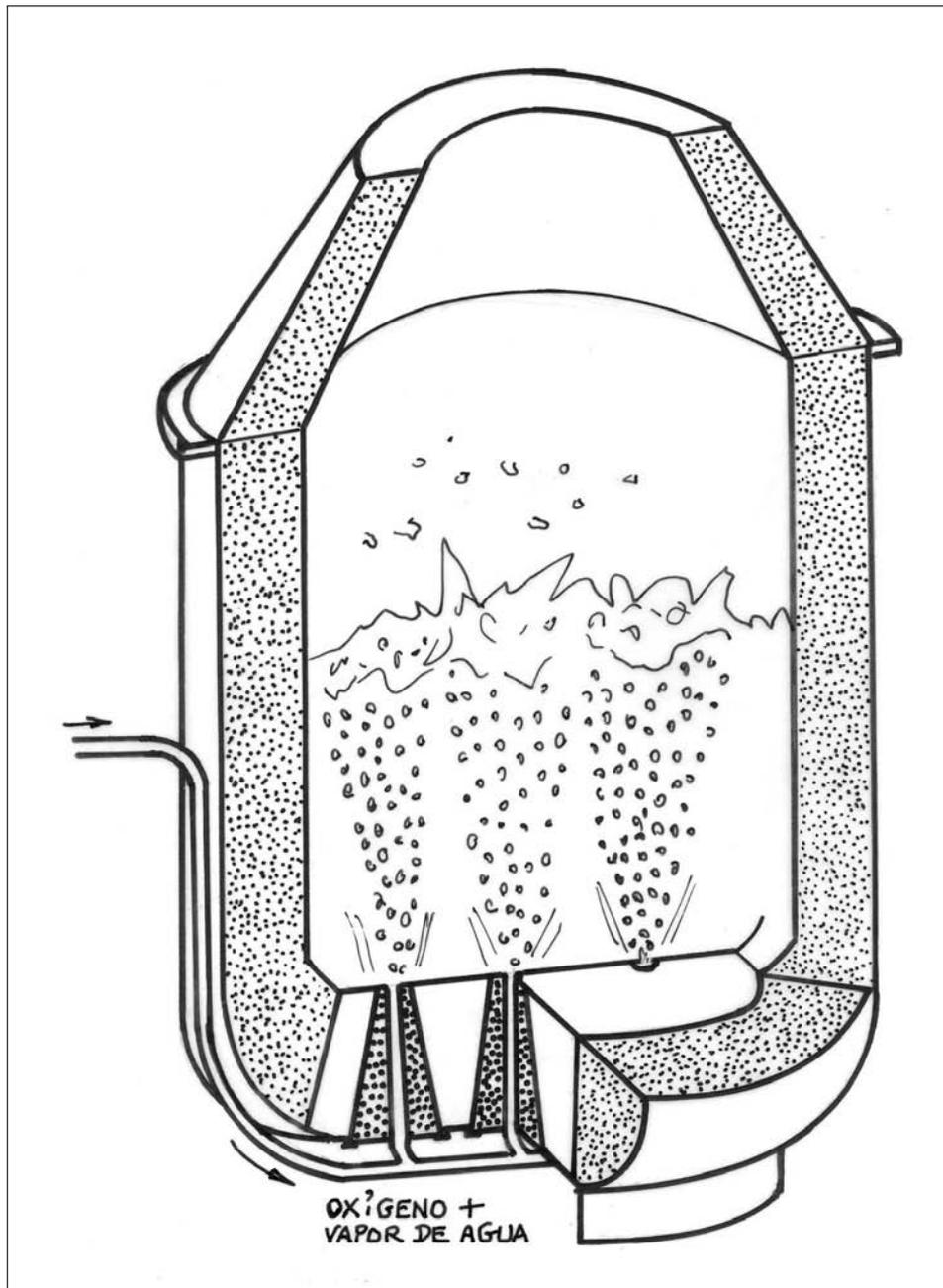


Figura 8.29: Convertidor Uddeholm CLU

Bibliografía

- [1] Apráiz Barreiro, J.: *Fabricación de Hierros, Aceros y Fundiciones*, Urmo, S.A. de Ediciones, 1978
- [2] Arana Bilbao, J.M.: *Procesos Avanzados de Producción de Acero*, Publicaciones de la E.T.S Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (Universidad del País Vasco), Bilbao, 1994
- [3] Aranguren, F.: *Fabricación del Acero*, Departamento de Publicaciones E.T.S. de Ingenieros de Minas, Madrid
- [4] Equipo Técnico del Centro de Formación ARCELOR MITTAL Asturias (La Toba): *El Proceso Siderúrgico*, Grafinsa, Oviedo, 2007
- [5] ASEA Metallurgy: *Future Technology for Melting , Refining and Casting*, Technical Symposium, 1983
- [6] ASEA Metallurgy: *Horno-Cuchara ASEA-SKF para el Afino del Acero* ASEA, Folleto AU 20-106 SP y otros, Edición 1, Diciembre 1973, ASEA Industrial Division (Suecia)
- [7] Astigarraga, J.L.: *Hornos de Arco para Fusión de Acero*, McGraw-Hill Interamericana de España, 1995
- [8] Bodsworth C. and Bell H.B.: *Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture*, Longman Group Limited, 1972
- [9] Carneros J. et Dompablo, L.: *El proceso AOD en la Fabricación de Acero Inoxidable*, Revista de Metalurgia, Vol. 10, nº 4, Julio-Agosto 1974
- [10] Deo, B. et Boom, R.: *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Prentice Hall Internacional (UK) Limited, 1993
- [11] Economic Commission for Europe: *Comparison of Steel Making Processes*, United Nations, Nueva York, 1962
- [12] Feinman J. et al: *Plasma Technology in Metallurgical Processing*, Iron and Steel Society, Inc. Warrendle, Pensilvania, EE UU, 1987
- [13] Fruehan, R.J.: *Ladle Metallurgy Principles and Practices*, Iron and Steel Society BookCrafters Inc. (Chelsea, MI, USA), 1985

- [14] García, C. et al: *Aciaria e Refratários-81 (seminario)*, Associação Brasileira de Metais ABM, São Paulo, 1981
- [15] Gaskell, D.: *Introduction to Metallurgical Thermodynamics*, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1973
- [16] Hodge, A.L.: *AOD Today for Sainless Steel and Other Alloys in Europe and Worlwide*, Union Carbide Belgium, Annual General Meeting of Jernkontoret, 1973
- [17] Lankford W.T. et al: *The Making, Shaping and Treating of Steel*, United States Steel, Association of Iron and Steel Engineers, 1984
- [18] Palacios Repáraz, J.M. et al: *La Fabricación del Acero*, UNESID
- [19] Plöckinger E.P. et al: *Electric Furnace Steel Production* John Wiley and Sons, 1985
- [20] Mallol Fernández, *Procesos de Afino fuera del Horno Eléctrico*, Servicio de Publicaciones E.T.S. de Ingenieros de Minas, Madrid, 1976
- [21] Mallol, A.: *Elementos de Siderurgia (Notas de Curso)*, Servicio de Publicaciones E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid, 1984
- [22] Robiette A.G.E.: *Electric Smelting Processes*, Charles Griffin & Co.Ltd., 1973
- [23] Walker, R.D. et al: *Small-Scale Steelmaking*, Applied Science Publishers Ltd., 1983
- [24] UNESID(Comité de Tecnología): *La Siderurgia Española*, Spainfo, S.A., Madrid
- [25] UNESID y otras instituciones, *Proceedings 4th European Electric Steel Congress*, 1992
- [26] Union Carbide: *AOD for Steel Foundries*, Informe técnico, EE UU
- [27] Vázquez-López, J., *Colada en Vacío y Diversos Aspectos de la Desgasificación del Acero en Vacío* Coloquios Hispano-Franceses, E.T.S.I. Universidad de Navarra (Sociedad Española de Construcción Naval) , 1966 "Fabricación del Acero"
- [28] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh): *Preprints Internacional Conference Secondary Metallurgy* ,Stahl Eisen, 1987
- [29] VACMETAL, Gesellschaft für Vacuum-Metallurgie MBH: *Seminario sobre Metalurgia en Vacío*, Bilbao, 1973
- [30] Ward, R.G.: *An Introduction to the Physical Chemistry of Iron and Steel Making*, Edward Arnold (Publishers) Ltd. Londres, 1962