

Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte V

FABRICACIÓN DE ACERO INOXIDABLE

Eloy Crespo Robles

Jose Luis Enríquez Berciano

Enrique Tremps Guerra



Monografías sobre Tecnología del Acero

Parte V

**FABRICACIÓN DE
ACERO INOXIDABLE**

Eloy Crespo Robles

José Luis Enríquez Berciano

Enrique Tremps Guerra

Universidad Politécnica de Madrid

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	DESGASIFICADO	2
2.1	DESOXIDACIÓN	2
2.1.1	DESOXIDACIÓN CLÁSICA	2
2.1.2	DESOXIDACIÓN POR DESGASIFICACIÓN	2
2.1.3	DESCARBURACIÓN POR DESGASIFICACIÓN	2
2.1.4	TERMODINÁMICA DE LA DESCARBURACIÓN	3
2.1.4.1	INTRODUCCIÓN	3
2.1.4.2	EQUILIBRIO CARBONO-CROMO	4
2.1.4.3	EQUILIBRIO SILICIO-CROMO	4
2.1.4.4	EQUILIBRIO CARBONO-SILICIO	5
3	OBJETIVOS Y VENTAJAS DE LA METALURGIA SECUNDARIA	5
4	PROCESOS DE METALURGIA SECUNDARIA	6
5	OPERACIONES Y PROCESOS EN METALURGIA SECUNDARIA	6
6	PROCESO ASEA SKF	7
6.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	7
6.2	ESQUEMA DEL PROCESO	8
6.3	VENTAJAS Y POSIBILIDADES	9
6.4	PROCESOS SIMILARES	9
7	PROCESO VOD	9
7.1	OBJETIVO Y FUNDAMENTO	9
7.2	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	9
7.3	PRACTICA OPERATIVA	10
8	PROCESO RH-OB	11
8.1	GENERALIDADES	11
8.2	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DH	12
8.3	OPERACIÓN DEL EQUIPO DH	12
8.4	VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL PROCESO DH	13
8.5	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO RH	13
8.6	OPERACIÓN DEL EQUIPO RH	13
8.7	VENTAJAS E INCOVENIENTES	14
8.8	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO RH-OB	14
9	EL PROCESO AOD	15
9.1	GENERALIDADES	15
9.2	OXIDACIÓN DE CARBONO Y CROMO EN EL BAÑO DE ACERO	16
9.3	MÉTODO OPERATIVO CLÁSICO	17
9.3.1	FUSIÓN DE CARGA SÓLIDA EN HORNO DE ARCO	17
9.3.2	TRATAMIENTO DEL BAÑO EN CONVERTIDOR AOD	19
9.4	COMPARACIÓN ENTRE PRÁCTICAS OPERATIVAS HEA AOD	21
9.5	CONVERTIDOR CLU	21
10	CASOS PRÁCTICOS ACTUALIZADOS	22
10.1	CASO PRIMERO	22
10.1.1	ACERO FABRICADOS	22
10.1.2	EQUIPOS DE PLANTA	22
10.1.3	TECNOLOGÍA DEL PROCESO	23
10.1.4	CALIDAD Y APLICACIONES	23
10.2	CASO SEGUNDO	24
10.2.1	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA VOD	24
10.2.2	RUTA DEL PROCESO	25
10.2.3	CONTROL DEL PROCESO	25
10.2.4	PRÁCTICA DEL MATCH CARBON	25
10.2.5	RENDIMIENTO DE LA OPERACIÓN	26
10.2.6	CALIDAD DEL PRODUCTO	26
10.2.7	DESARROLLOS FUTUROS DEL VOD	26
10.3	CASO TERCERO	26
10.3.1	INTRODUCCIÓN	27
10.3.2	SOPLADO DE OXÍGENO EN VACIO	27
10.3.3	AFINO	27
10.3.4	LIMPIEZA METALÚRGICA DEL ACERO	27

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CONTENIDO DE OXÍGENO Y CARBONO EN ACEROS AL FINAL DE LA OXIDACIÓN	1
FIGURA 2 CONTENIDO DE OXÍGENO Y CARBONO DE ACEROS FABRICADOS POR DIFERENTES PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	1
FIGURA 3 CONTENIDO DE OXÍGENO Y DESOXIDANTES EN EQUILIBRIO EN BAÑOS DE ACERO.....	2
FIGURA 4 EQUILIBRIO DE OXÍGENO-CARBONO A 1600 °C: A DIFERENTES PRESIONES Y TRAS SOMETER AL ACERO A DESGASIFICACIÓN A 10 TORR	3
FIGURA 5 VARIACIÓN DURANTE EL DESGASIFICADO DEL CONTENIDO CARBONO-OXÍGENO EN ACEROS QUE INICIALMENTE CONTIENEN 0,05-0,08%.....	3
FIGURA 6 INFLUENCIA DEL CROMO Y LA TEMPERATURA SOBRE EL CONTENIDO EN CARBONO	4
FIGURA 7 INFLUENCIA DEL CARBONO Y LA TEMPERATURA SOBRE EL EQUILIBRIO SILICIO-CROMO.....	5
FIGURA 8 EQUILIBRIO CARBONO-SILICIO.....	5
FIGURA 9 COMPARACIÓN POTENCIALES OPERATIVOS DE HEA, AOD Y VOD	5
FIGURA 10 PROCESO ASEA-SKF: AGITACIÓN Y LLENADO	7
FIGURA 11 PROCESO ASEA-SKF: TRATAMIENTO Y COLADA	8
FIGURA 12 PROCESO VOD/LD.....	10
FIGURA 13 ETAPAS EN EL HORNO DE ARCO ANTES DEL PROCESO VOD	10
FIGURA 14 ETAPAS DEL PROCESO VOD	11
FIGURA 15 DESARROLLO OPERATIVO DEL PROCESO VOD.....	11
FIGURA 16 MÉTODO DE RECIRCULACIÓN EN VACIO DH.....	11
FIGURA 17 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO EN OXÍGENO DE ACEROS OXIDADOS, CON DIFERENTE CONTENIDO EN CARBONO Y DESOXIDADOS POR DH.....	11
FIGURA 18 ELIMINACIÓN DE INCLUSIONES POR TRATAMIENTO DH.....	11
FIGURA 19 PROCESO DH: DESGASIFICACIÓN POR ELEVACIÓN INTERMITENTE	12
FIGURA 20 PROCESO DE CIRCULACIÓN CONTINUA EN VACIO RH.....	13
FIGURA 21 PROCESOS METALÚRGICOS QUE PUEDEN UTILIZAR REACTOR RH.....	14
FIGURA 22 ETAPAS DEL PROCESO RH (1): DESULFURACIÓN Y DESCARBURACIÓN DEL ARRABIO	15
FIGURA 23 ETAPAS DEL PROCESO RH (2): ADICIÓN DE FERROCROMO Y DESCARBURACIÓN INCOMPLETA	15
FIGURA 24 ETAPAS DEL PROCESO RH (3): DESGASIFICACIÓN FINAL	15
FIGURA 25 CONTENIDOS EN CROMO Y CARBONO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y PRESIONES DE CO.....	16
FIGURA 26 PRESIÓN DE EQUILIBRIO DE CO EN EL ÚLTIMO LÍQUIDO EN SOLIDIFICAR EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONO Y OXÍGENO	16
FIGURA 27 EJEMPLO DE OPERACIÓN HORNO ELÉCTRICO-CONVERTIDOR	17
FIGURA 28 INFLUENCIA DE LA BASICIDAD DE LA ESCORIA EN LA OXIDACIÓN DEL CROMO EN COLADAS DE INOXIDABLE	17
FIGURA 29 ENERGÍA LIBRE DE LAS REACCIONES DE REDUCCIÓN DEL CROMO EN LA ESCORIA ESPUMOSA FORMADA EN LA COLADA DE ACERO INOXIDABLE.....	17
FIGURA 30 CRÓMO RESIDUAL EN LA ESCORIA UTILIZANDO EL PROCESO CASCO CARBIDE.....	18
FIGURA 31 CROMO RESIDUAL EN LA ESCORIA SIN UTILIZAR CARBURO COMO REDUCTOR.....	18
FIGURA 32 CONVERTIDOR AOD.....	19
FIGURA 33 PROCESO AOD PARA FABRICACIÓN DE ACERO INOXIDABLE.....	19
FIGURA 34 EVOLUCIÓN DEL PROCESO AOD: TEMPERATURA, COMPOSICIÓN, TIEMPO.....	20
FIGURA 35 EVOLUCIÓN CARBONO-CROMO EN HEA Y AOD.....	20
FIGURA 36 CONVERTIDOR CLU	21

FABRICACIÓN DE ACERO INOXIDABLE

1 INTRODUCCIÓN

La obtención de aceros inoxidable de bajo carbono (0,03 - 0,06 %) y alto contenido de cromo (13 - 25 %) en horno eléctrico de arco presenta grandes dificultades. Así, al oxidar el carbono mucho del cromo se oxida también y se pierde en la escoria. Por otra parte, la segunda fase de la colada desoxidante y desulfuradora provoca la captación de carbono por el baño, con lo que este elemento se sale de norma.

En su día se hicieron tentativas, como soplar con oxígeno para descarburar y reducir posteriormente el óxido de cromo formado haciendo una escoria reductora a base de ferrosilicio, cal y espato flúor. Una marcha de colada en horno de arco según ese sistema es como sigue:

- 1) Carga de chatarra y fusión. El análisis químico del fundido es:
 - C = 0,50 % Cr = 14,50 %
- 2) Soplado con oxígeno. Al final del soplado las condiciones son:
 - C = 0,06 % Cr = 8,50 %
 - Temperatura = 1830 - 1850 °C

Como puede verse, se ha oxidado un 6,00 % de cromo.

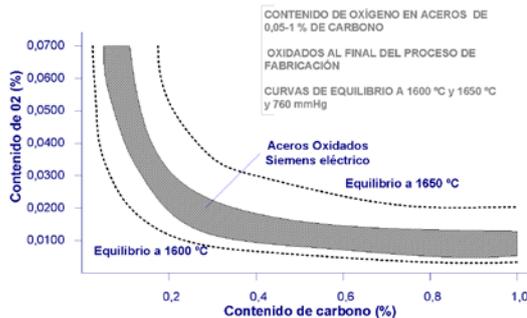


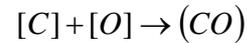
FIGURA 1 CONTENIDO DE OXÍGENO Y CARBONO EN ACEROS AL FINAL DE LA OXIDACIÓN

- 3) Reducción y adición de carga fría compuesta por cantidades importantes de FeSiCr, FeSi, FeCr fino (descarburado) y chatarra austenítica.
- 4) Desescoriado.
- 5) Adición de escoria reductora (desulfuración y homogeneización).
- 6) Toma de muestras para análisis químico.

- 7) Ajuste de composición y temperatura.
- 8) Colada a lingotera o máquina de colada continua.

La duración de la colada es entre 3 h 45 mn y 4 h 15 mn. La recuperación del cromo es del 94,50 % y el rendimiento metálico es 91,50 %.

La Metalurgia Secundaria ha resuelto estos problemas, al observar las ventajas que tiene el soplado con oxígeno en una cámara con presión inferior a la atmosférica. De esta forma se realiza bien la reacción :



que sirve para descarburar el acero y que está regulada por la presión parcial del CO, sin que se produzca pérdida de cromo por oxidación.

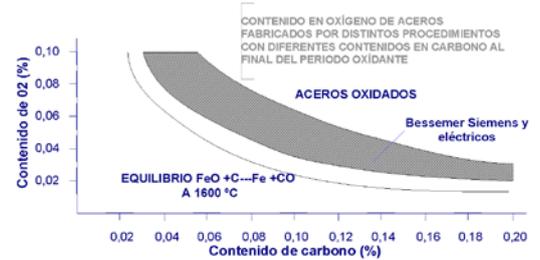


FIGURA 2 CONTENIDO DE OXÍGENO Y CARBONO DE ACEROS FABRICADOS POR DIFERENTES PROCESOS DE FABRICACIÓN

En estas circunstancias, el carbono puede disminuirse hasta niveles muy bajos en presencia de cantidades importantes de cromo sin que se oxide este elemento.

Considerando constantes la temperatura y presión del baño de acero, la ley que regula el contenido de oxígeno en equilibrio con el carbono en los aceros fundidos viene dada por la ecuación (1).

$$[C] \cdot [O] = K \dots \dots (1)$$

El valor de 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. O sea, que:

$$[\%C] \cdot [\%O] = 0,0025$$

Las figuras 1 y 2 representan gráficamente esta función. De acuerdo con esa ley, a una temperatura y presión determinadas, cuanto menor sea el contenido de carbono, mayor es el contenido de oxígeno que

normalmente contienen o pueden contener los aceros fundidos.

También puede verse que para un contenido determinado de carbono, al aumentar la temperatura desde 1600 ° C hasta 1650 ° C aumenta muy sensiblemente el contenido de oxígeno en equilibrio con el hierro.

2 DESGASIFICADO

Los procesos de Metalurgia Secundaria (que se revisarán más adelante, especialmente los directamente enfocados a producción de aceros inoxidable) tienen como objetivo más claro el desgasificado de los baños de acero. En esta operación van incluidas las siguientes:

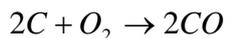
- 1) Eliminación de hidrógeno
- 2) Eliminación de nitrógeno
- 3) Eliminación de oxígeno
- 4) Eliminación de inclusiones
- 5) Descarburación por desgasificado

En esta revisión se van a discutir la 3) y la 5) que son las de mayor repercusión sobre el inoxidable.

2.1 DESOXIDACIÓN

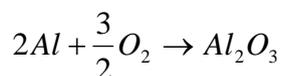
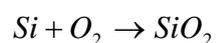
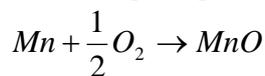
2.1.1 DESOXIDACIÓN CLÁSICA

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.

Las reacciones que se producen son:



y se forman óxidos y silicatos complejos de estos metales, con el riesgo de formación de inclusiones. Por otro lado, se consume todo el oxígeno y no queda oxígeno libre para reaccionar con el carbono según la reacción Vacher-Hamilton.

2.1.2 DESOXIDACIÓN POR DESGASIFICACIÓN

En cambio, en el vacío o a bajas presiones el carbono actúa como un desoxidante muy energético y, en términos generales puede considerarse que la acción del carbono a muy bajas presiones es parecida a la del aluminio a presión

atmosférica. Por otro lado, la oxidación del carbono no deja residuos sólidos en la masa del acero.

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 mmHg. Sin embargo, a presión de 100 mmHg es 0,00025 y si la presión baja hasta ser 10 mm la constante queda reducida a 0,000035.

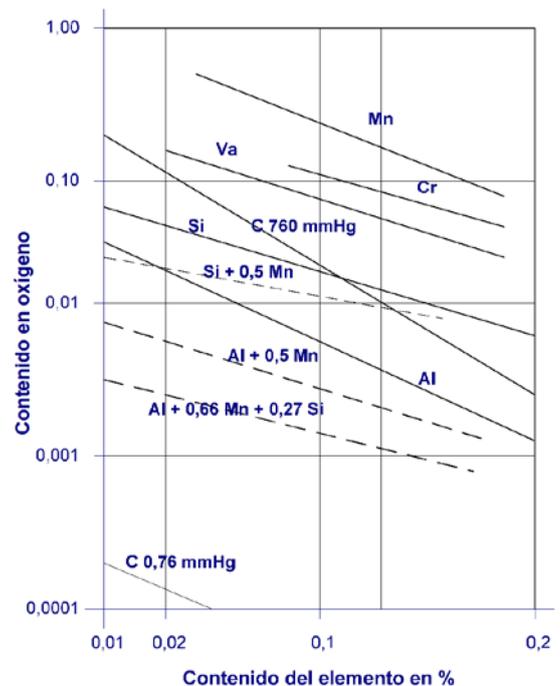


FIGURA 3 CONTENIDO DE OXÍGENO Y DESOXIDANTES EN EQUILIBRIO EN BAÑOS DE ACERO

En la Figura 3 se dan las rectas de equilibrio de varios elementos con oxígeno y las rectas del carbono a diversos grados de vacío. Se ve que en condiciones de vacío el carbono tiene una afinidad por el oxígeno mucho mayor que los elementos reductores citados.

En la figura 4 se señalan los contenidos de carbono y oxígeno en equilibrio a 1600 ° C con presiones de 760, 100 y 10 mmHg; y también los contenidos de oxígeno con que quedan los aceros al final, después de desgasificados con presiones de 1 – 10 mmHg. Si en el desgasificado de los aceros se llegara al equilibrio oxígeno-carbono, esto sería, teóricamente, a porcentajes de oxígeno bajísimos. 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, variables generalmente entre 0,0020 y 0,0100 % (como se observa en la figura 4) .

2.1.3 DESCARBURACIÓN POR DESGASIFICACIÓN

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.

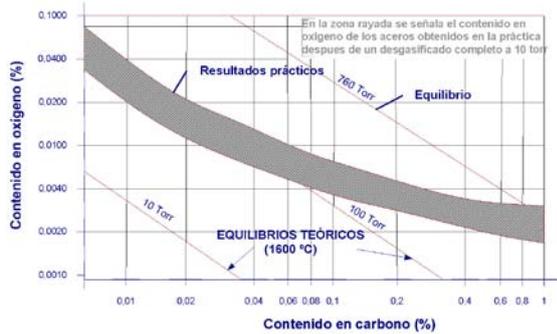
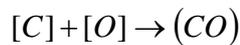


FIGURA 4 EQUILIBRIO DE OXÍGENO-CARBONO A 1600 °C: A DIFERENTES PRESIONES Y TRAS SOMETER AL ACERO A DESGASIFICACIÓN A 10 TORR

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.

En la figura 5 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 mmHg y con ello ha disminuido la cantidad de carbono y oxígeno que contienen. Teóricamente, de acuerdo con la ecuación $C + O = CO$, 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 %.

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.

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.

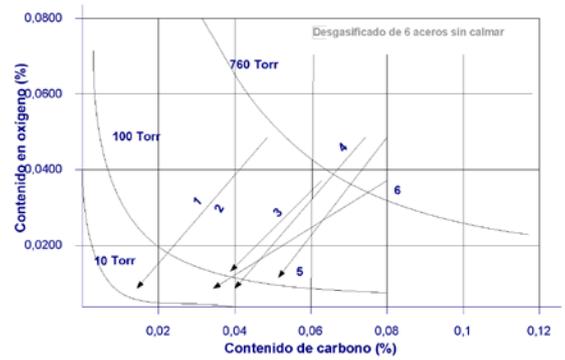


FIGURA 5 VARIACIÓN DURANTE EL DESGASIFICADO DEL CONTENIDO CARBONO-OXÍGENO EN ACEROS QUE INICIALMENTE CONTIENEN 0,05-0,08%

2.1.4 TERMODINÁMICA DE LA DESCARBURACIÓN

2.1.4.1 INTRODUCCIÓN

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) o mezclas de gases diversos (AOD, CLU).

Ambas innovaciones, que simplemente son aplicaciones de principios termodinámicos bien conocidos, han resultado en progresos significativos de aceria y causado una verdadera revolución en la fabricación de aceros inoxidables.

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 ferrosilicio, tiempo de colada más largo, etc. Dado que esta situación ha de evitarse es evidente que el operador del horno debe estar con 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.

2.1.4.2 EQUILIBRIO CARBONO-CROMO

El equilibrio carbono-cromo puede calcularse, basándose en los equilibrios carbono-oxígeno y cromo-oxígeno a partir de las ecuaciones (2), (3), (4) y (5).

$$[C] + [O] = CO \dots\dots\dots(2)$$

+

$$\frac{1}{4}Cr_3O_4 = \frac{3}{4}[Cr] + [O] \dots\dots\dots(3)$$

$$[C] + \frac{1}{4}Cr_3O_4 = \frac{3}{4}[Cr] + CO \dots\dots\dots(4)$$

$$K_3 = \frac{P_{CO} \cdot a_{[Cr]}^{3/4}}{a_{[C]} \cdot a_{Cr_3O_4}^{1/4}} = \frac{(f_{Cr} \cdot [Cr])^{3/4} \cdot P_{CO}}{f_C \cdot [C] \cdot a_{Cr_3O_4}^{1/4}} \dots\dots\dots(5)$$

Usando los valores “más probables” de K1 y K2, la constante de equilibrio K3 puede expresarse de acuerdo con la ecuación (6). El coeficiente de actividad de un elemento x (x = C, Cr, Si...) disuelto en el baño puede determinarse según la ecuación (7).

$$\log K_3 = -\frac{11955}{T} + 7,89 \dots\dots\dots(6)$$

$$f_x = \exp \left\{ 2,303 \left[e_x^x \cdot [\%x] + \sum_{n=1}^k (e_x^{Yn} [\%Yn]) \right] \right\} \dots\dots\dots(7)$$

Los parámetros de interacción e_y^x suelen darse con referencia a 1600 ° C de temperatura. Su valor para otras temperaturas puede deducirse con aproximación mediante la relación de Nelson (8).

$$e_T = \frac{1873}{T} e_{1873} \dots\dots\dots(8)$$

Combinando las ecuaciones (5), (6) y (7), y empleando los valores de los parámetros de interacción dados en la tabla que sigue, el equilibrio carbono-cromo viene dado en la forma implícita (9).

$$\log C - \frac{3}{4} \log Cr + \frac{1873}{T} (0,309C + 0,123Si - 0,002Mn - 0,024Cr + 0,015Ni) - \log P_{CO} - \frac{11955}{T} + 7,89 + \frac{1}{4} \log a_{Cr_3O_4} = \phi \dots\dots\dots(9)$$

Valores seleccionados de los parámetros de interacción a 1600 ° C se recogen en la tabla 1:

TABLA 1 COEFICIENTES DE INTERACCIÓN					
e_2^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	-

La solución exacta de (9) es imposible. Si embargo, puede emplearse una simple calculadora programable para

obtener una solución numérica. Resulta fácil elaborar un programa basado en (9) 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 6 presenta el contenido crítico de carbono en función de la temperatura y contenido de cromo del líquido.

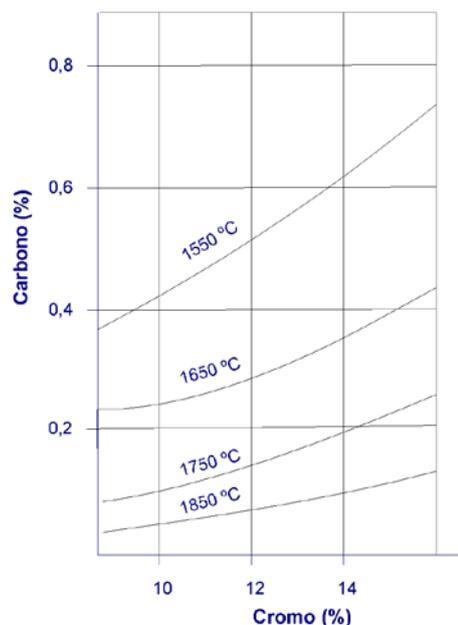


FIGURA 6 INFLUENCIA DEL CROMO Y LA TEMPERATURA SOBRE EL CONTENIDO EN CARBONO

2.1.4.3 EQUILIBRIO SILICIO-CROMO

Similarmente a como se hizo para la ecuación (9) puede deducirse la (10) que representa el equilibrio silicio-cromo.

$$\log Si - \frac{3}{2} \log Cr + \frac{1873}{T} (0,42C + 0,142Si - 0,01Cr + 0,014Ni) - \log a_{SiO_2} + \frac{1}{2} \log a_{Cr_3O_4} + \frac{3050}{T} + 0,675 = \phi \dots\dots\dots(10)$$

$$SiO_2 + 2[C] = [Si] + 2CO \dots\dots\dots(11)$$

$$\log K = -\frac{26960}{T} + 15,11 \dots\dots\dots(12)$$

$$\log Si - 2 \log C - \frac{1873}{T} (-0,20C - 0,105Si + 0,038Cr - 0,016Ni) + 2 \log P_{CO} - \log a_{SiO_2} + \frac{26960}{T} 15,11 = \phi \dots\dots\dots(13)$$

Este equilibrio silicio-cromo, en dependencia del contenido de carbono del fundido, se da en las gráficas de la Figura 7 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.

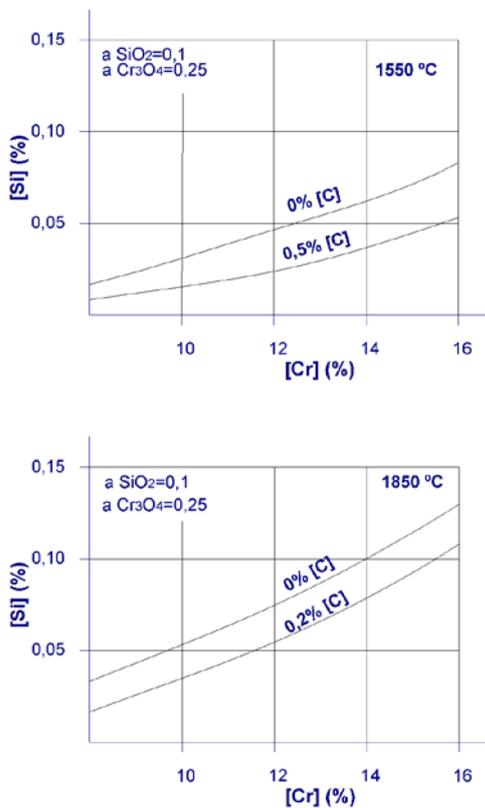


FIGURA 7 INFLUENCIA DEL CARBONO Y LA TEMPERATURA SOBRE EL EQUILIBRIO SILICIO-CROMO

2.1.4.4 EQUILIBRIO CARBONO-SILICIO

Este equilibrio viene expresado mediante las ecuaciones (11) y (12). Para empleo en ordenador se deduce la ecuación (13). El equilibrio carbono-silicio, tal como se calcula mediante la ecuación (13), se da en la figura 8 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.

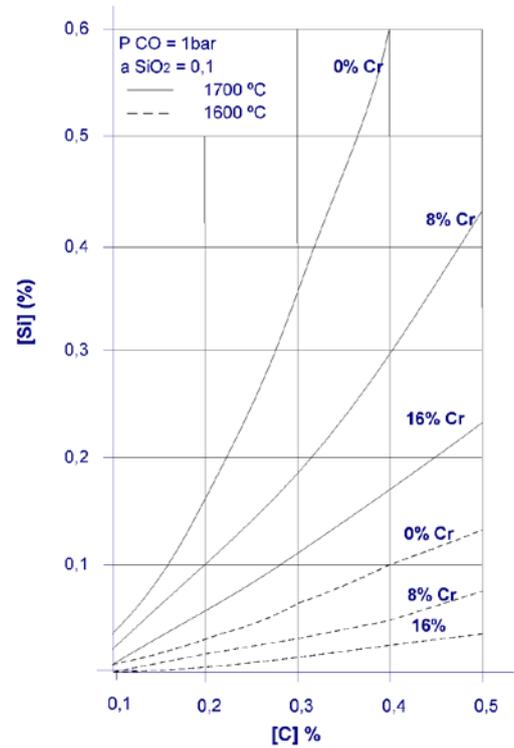


FIGURA 8 EQUILIBRIO CARBONO-SILICIO

En la figura 9 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.

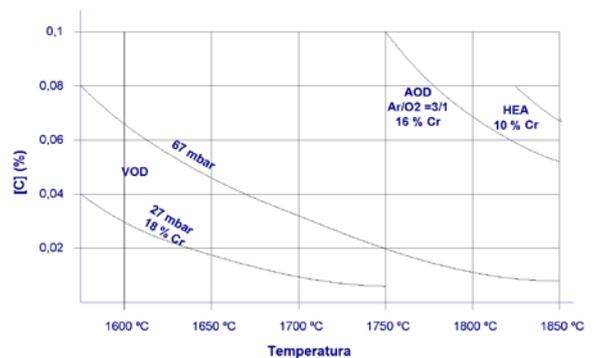


FIGURA 9 COMPARACIÓN POTENCIALES OPERATIVOS DE HEA, AOD Y VOD

3 OBJETIVOS Y VENTAJAS DE LA METALURGIA SECUNDARIA

La introducción de la Metalurgia Secundaria en las operaciones convencionales de acería, tanto integral como

eléctrica, ha permitido alcanzar objetivos y ventajas sustanciales.

En lo que concierne a productividad, se optimizan equipos y operaciones, se reducen los tiempos de colada, se trabaja con mayor flexibilidad y se mejora el funcionamiento de las máquinas de colada continua al ajustar con más precisión la composición y temperatura del acero líquido.

Se consigue ahorro de costos por control de temperaturas y consiguiente aprovechamiento eléctrico, así como por mayor recuperación de ferroaleaciones y posibilidad de emplear calidades más baratas.

Desde el punto de vista de calidad química se obtiene mejor ajuste de composición así como tasas más altas de descarbonación, defosforación, desoxidación, desulfuración y desgasificación.

Pensando en calidad estructural, se eliminan o modifican las inclusiones, obteniéndose aceros más limpios con la consiguiente mejora en las propiedades transversales o de tenacidad.

4 PROCESOS DE METALURGIA SECUNDARIA

Hay dos grandes grupos de procesos. El primero lo forman los que se realizan en vacío; el segundo son los que trabajan a presión atmosférica. Tanto uno como otro se subdividen en los que se efectúan sin calentamiento y los que reciben un caldeo adicional, que puede ser eléctrico o por oxígeno. En las tablas 2 y 3 se resumen los procesos en vacío y atmosféricos de metalurgia secundaria.

Más adelante se estudiarán en detalle los diferentes procesos, poniendo mayor énfasis a los usualmente empleados para fabricación de aceros inoxidables.

TABLA 2 PROCESOS EN VACÍO DE METALURGIA SECUNDARIA

En cámara (con agitación o sin agitación inductiva por gas)	
SIN APORTACIÓN TÉRMICA	ESTÁTICOS
	<ul style="list-style-type: none"> En chorro (Bochümer Verein) ➤ Del horno a la cuchara ➤ De cuchara a otra cuchara ➤ De cuchara a lingotera
CIRCULACIÓN EN VACÍO	<ul style="list-style-type: none"> Discontinua (Dortmund Hürder Hütteninn) DH Continua (Ruhrstahl Heræus) RH Mezclado pulsatorio (Pulsatory Mixing) PM
	<ul style="list-style-type: none"> ASEA-SKF Desgasificación por arco en vacío (VAD): ➤ FINKL-MOHR ➤ Horno de inducción de canal BBC-CEM-IRSID ➤ Stein-Heurtey-Safe Electric Steel Company ➤ Vacuum Melting VM ➤ Diodo Ladle Furnace LF (Davey McKee Vacmelt)
CON APORTACIÓN TÉRMICA	CALDEO ELÉCTRICO
	<ul style="list-style-type: none"> Descarbonación por oxígeno en vacío VOD Convertidor de descarbonación por oxígeno en vacío VODC VOD/LD VAC (Edelstahlwerk-Republic Steel) ASV V-R AVR (Allegheny Vacuum Refining) RH-OB Oxygen Bubbling (Nippon Steel)

TABLA 3 PROCESOS ATMOSFÉRICOS DE METALURGIA SECUNDARIA

SIN APORTACIÓN TÉRMICA	<ul style="list-style-type: none"> Metalurgia secundaria basada en argón (ASM) Purga con argón (AP) Inyección de desulfurante por lanza (IP TN) Alimentación por hilo Al, Ca, CaSi Lanzamiento de proyectiles Composition adjustment by sealed argon bubbling (CAS) Sealed argon bubbling (SAB) Capped argon bubbling (CAB)
	<ul style="list-style-type: none"> Horno cuchara (ladle furnace LF) Gas refining arc furnace (GRAF)
CON APORTACIÓN TÉRMICA	<ul style="list-style-type: none"> Argon oxygen decarburation (AOD) Creusot-Loire Uddeholm (CLU) CAS Oxygen bubbling (CAS-OB)

5 OPERACIONES Y PROCESOS EN METALURGIA SECUNDARIA

A continuación se verán con más detalles los procesos de Metalurgia Secundaria, especialmente en base a la aplicación a que irán destinados. Para cada exigencia planteada se verá el propósito a cumplir, operación a realizar, proceso que la cumple y aplicación última:

Exigencia: Ajuste de composición:
Propósito: Obtención de análisis concreto.
 Estrechar intervalos de composición.
 Mejorar rendimiento de ferroaleaciones.
Operación: Adición exacta de ferroaleaciones.
 Mezcla correcta de caldo.
Proceso: DH, RH..
 LF.
 VAD.
 CAS, CAB.
Aplicación : Todos los aceros.

Exigencia: Ajuste de temperatura.
Propósito: Cumplir temperatura
Operación: Enfriamiento (Chatarra, barboteo).
 Calentamiento (LF, RH-OB..).
Proceso: RH-OB.
 VAD.
Aplicación: Máquina colada continua.

Exigencia: Desoxidación.
Propósito: Eliminar exceso de oxígeno.
 Obtener acero limpio.
Operación: Generación de CO en vacío.
 Formación turbulenta de Al₂O₃
Proceso: Procesos al vacío.
 Adición de compuestos de calcio.
 Uso de escoria de bajo oxígeno.
 Barboteo de gases inertes.
Aplicación: Aceros calmados.

6 PROCESO ASEA SKF

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Aunque puede trabajar en serie con un convertidor, este proceso está diseñado prácticamente para tratar acero oxidado (descarburado y defosforado) procedente de un horno eléctrico de arco de ultra-alta potencia UHP. Después de la fusión primaria y oxidación en el horno UHP el baño de acero se somete a las siguientes operaciones que se esquematizan en las figuras 10 y 11

- Llenado de la cuchara y transporte a la estación de tratamiento.
- Desgasificado y agitación inductiva y/o por gas inerte.
- Calentamiento por arco eléctrico.
- Colada a lingotera o 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.

Exigencia: Desulfuración.
Propósito: Cumplir especificación de azufre. Obtener acero limpio.
Operación: Reacción metal-escoria. Adición de Ca Si, Ca C2, Mg...
Proceso: Escoria sintética. VAD. Inyección polvo IP o TN. LF.
Aplicación: Aceros 0,005 – 0.010 % de azufre.

Exigencia: Eliminación o modificación de inclusiones.
Propósito : Alcanzar características estructurales y mecánicas.
Operación: Tratamiento al vacío. Adición de Ca, Zr, Ti, tierras raras...
Proceso: Inyección polvo IP o TN. VAD. Inyección entubada.
Aplicación: Aceros estructurales.

Exigencia: Descarburación.
Propósito: Bajar carbono.
Operación: Reacción carbono – oxígeno en vacío.
Proceso: Procesos vacío (ASEA-SKF, VOD, DH, RH, RH-OB...) Arrastre por gases (AOD, CLU...).
Aplicación: Fleje eléctrico. Sustitución de efervescentes. Inoxidables.

Exigencia: Eliminación de hidrógeno.
Propósito: Prevenir grietas.
Operación: Tratamiento en vacío.
Proceso: Procesos vacío (DH, RH, RH-OB...).
Aplicación: Aceros de alta fiabilidad.

Yendo al caso concreto de la fabricación de aceros inoxidables, cuya exigencia primordial es la obtención de contenidos bajísimos de carbono (y también de azufre), los procesos que se han utilizado o se utilizan con mayor asiduidad son ASEA-SKF, VOD y RH-OB al vacío y el AOD y su variante CLU de arrastre por gases. Se estudian en detalle a continuación.

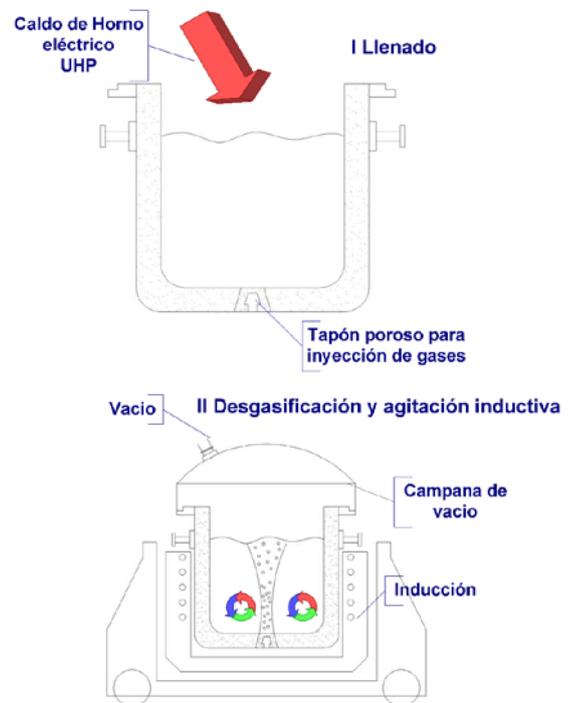


FIGURA 10 PROCESO ASEA-SKF: AGITACIÓN Y LLENADO

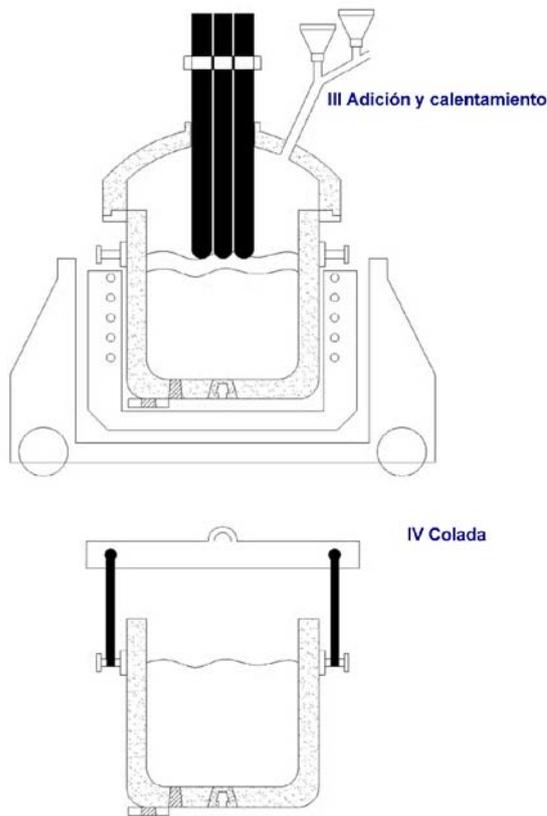


FIGURA 11 PROCESO ASEA-SKF: TRATAMIENTO Y COLADA

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

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 (c), 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.

6.2 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, el cual 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 un sistema denominado “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.

6.3 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 descarbura 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 otras 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.

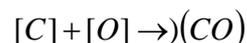
6.4 PROCESOS SIMILARES

Hay otros procesos, también de vacío con caldeo eléctrico, que pueden considerarse derivados o relacionados con el ASEA-SKF. Estos procesos ya se enumeraron en la tabla 2. En algunos de ellos, como el ASEA, la cuchara hace de cuba del horno 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.

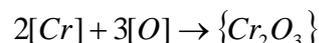
7 PROCESO VOD

7.1 OBJETIVO Y FUNDAMENTO

Este procedimiento, como otros de Metalurgia Secundaria, ha nacido para fabricar aceros extrabajos en carbono y azufre, en general, e inoxidables, en particular. 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, Cr₂O₃, que pasa a la escoria.

7.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

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 por eyectores de vapor A través de la tapa hermética pasa la lanza de soplado de oxígeno (figuras 12). 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.

7.3 PRACTICA OPERATIVA

Las figuras 13, 14 y 15 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 SiO₂ 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.

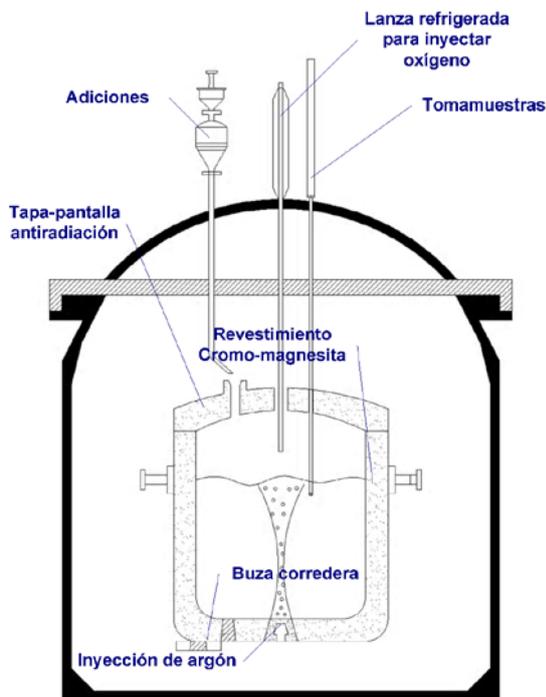
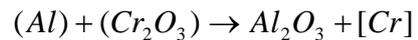
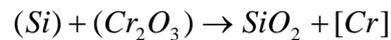


FIGURA 12 PROCESO VOD/LD

- 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 Nm³/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.

- 5) Al final de esta fase de tratamiento el acero queda a 1690 ° C y con menos de 0,10 % de carbono.
- 6) 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.
- 7) Ajuste final. Una vez completada la descarbonación 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. Como calmante se añade una mezcla de ferrosilicio y ferroaluminio. Éstos reducen el óxido de cromo Cr₂O₃ que pasó a la escoria:



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, CaF₂ 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.



FIGURA 13 ETAPAS EN EL HORNO DE ARCO ANTES DEL PROCESO VOD

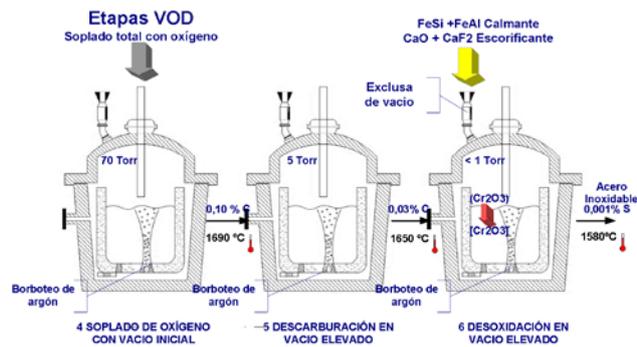


FIGURA 14 ETAPAS DEL PROCESO VOD

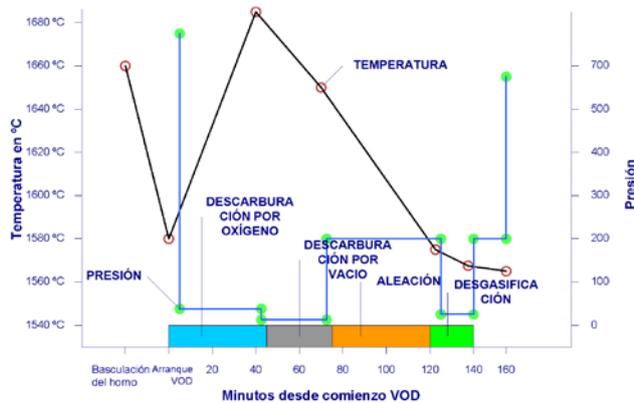


FIGURA 15 DESARROLLO OPERATIVO DEL PROCESO VOD

8 PROCESO RH-OB

8.1 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 DH y RH que se describen a continuación. En ellas se realiza el desgasificado, descarbura ción y desoxidación.

La idea fundamental del método DH (Dortmund Hörder, Hütten Union) consiste en colar el acero en una cuchara normal de colada. De ella, el acero es luego aspirado y elevado intermitentemente en fracciones a 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 ("snorkel", como el periscopio de los submarinos antiguos) dispuesto en la parte inferior de la cámara de vacío, y que llega a introducirse en el acero líquido de la cuchara. (figura 16) Con este equipo se consiguen ventajas metalúrgicas como

- Descarburar y desoxidar (figura 17), gracias a la reacción Vacher-Hamilton en vacío.

- Eliminar inclusiones (figura 18), 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.

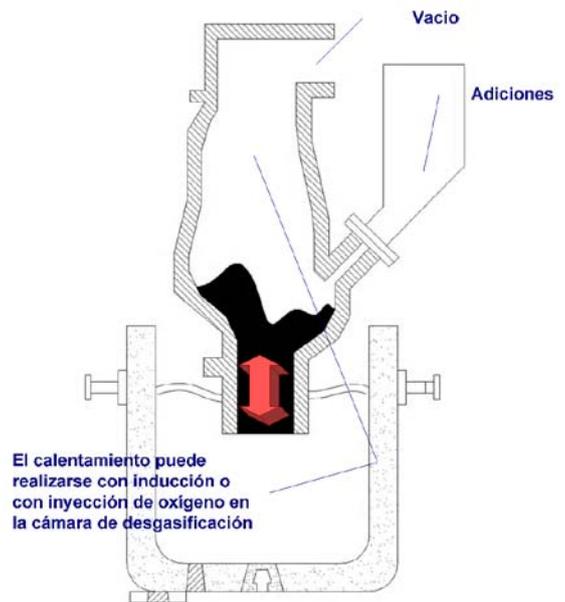


FIGURA 16 MÉTODO DE RECIRCULACIÓN EN VACÍO DH

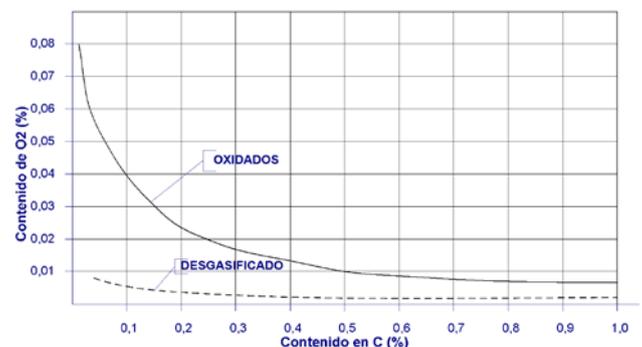


FIGURA 17 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO EN OXÍGENO DE ACEROS OXIDADOS, CON DIFERENTE CONTENIDO EN CARBONO Y DESGASIFICADOS POR DH



FIGURA 18 ELIMINACIÓN DE INCLUSIONES POR TRATAMIENTO DH

8.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DH

La parte fundamental es la cámara de reacción (figura 19). 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 instala un sistema enfriador de los gases de salida.

La cámara está conectada también a las tolvas y dosificadores automáticos mediante esclusas de presión. La cámara cuenta con un sistema de calentamiento inicial que puede ser por resistencia calefactora, quemador de Oxigás o sistema aluminotérmico, aunque este última ha de tomarse con precaución por el riesgo de inclusiones de alúmina. También hay un orificio para inyectar gases, especialmente oxígeno descarburador.

En la parte inferior la cámara está unida al snorkel, que está también protegido por un revestimiento refractario cuya duración suele ser de unas 800 operaciones. 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.

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.

8.3 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 fija, es la cámara de vacío la que se mueve con la grúa y sube o baja hasta colocarla en su lugar.

Inmediatamente después de la inmersión del 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 mmHg (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.

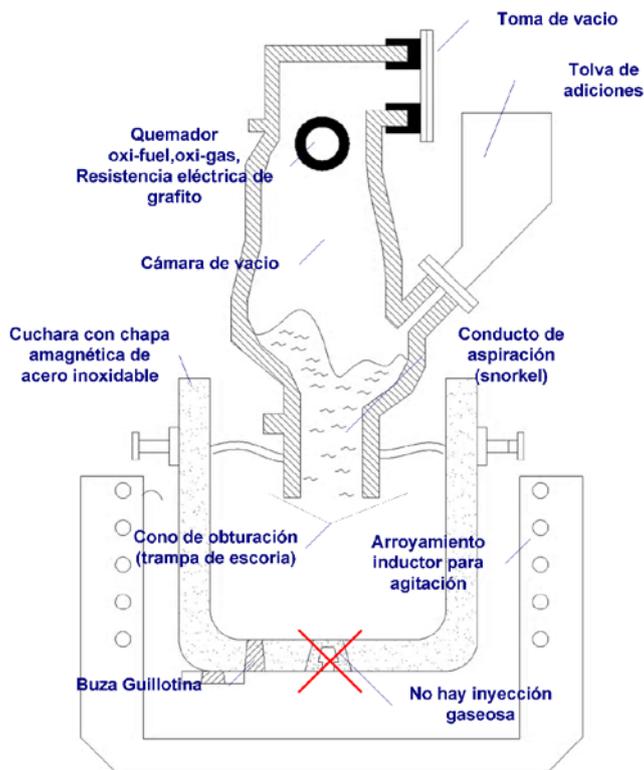


FIGURA 19 PROCESO DH: DESGASIFICACIÓN POR ELEVACIÓN INTERMITENTE

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.

8.4 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 especiales y luego, para conseguir una buena homogeneización de la composición y temperatura, se realizan unos 4 o 6 ciclos finales.

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

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 gasoil 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.

8.5 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO RH

En este proceso, desarrollado en colaboración por la acería Ruhrstahl AG y la empresa de vacío Heræus hay una cámara de vacío (Figura 20 y 24) que, a diferencia del DH tiene dos snorkels en lugar de uno.

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.

Existe una alimentación de escorificantes 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 esclusas 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 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 de grafito.

En cuanto a los snorkels, ambos 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.

El snorkel de elevación tiene una conexión lateral, ligeramente inclinada, por la que se inyecta argón. 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” o proceso Stokes.

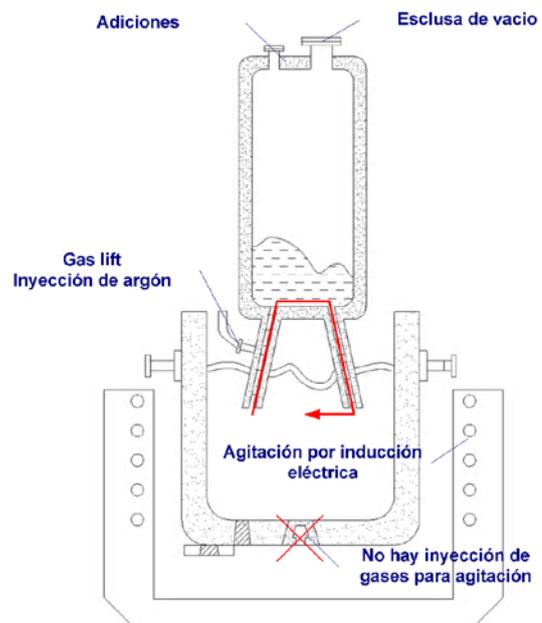


FIGURA 20 PROCESO DE CIRCULACIÓN CONTINUA EN VACIO RH

8.6 OPERACIÓN DEL EQUIPO RH

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.

En esta operación suelen pasar a la cámara de desgasificación unas 15 t de acero por minuto, si se utilizan cucharas de 120 t, y 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 litros por tonelada de acero.

8.7 VENTAJAS E INCOVENIENTES

La figura 21 representa en un solo cuadro las posibilidades metalúrgicas que brinda el proceso RH



FIGURA 21 PROCESOS METALÚRGICOS QUE PUEDEN UTILIZAR REACTOR RH

8.8 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO RH-OB

Las figuras 22, 23 y 24 representan esquemáticamente el proceso tal como fue desarrollado por la Nippon Steel Corporation. 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.
- 3) Se pasa el caldo de la cuchara, junto con chatarra refrigerante, a un convertidor LD. Allí se sopla oxígeno hasta descarburation

completa. Al final del soplado el metal tiene la siguiente composición:

$$\sim 0,100 \% \text{ C } < 0,010 \% \text{ P } < 0,010 \% \text{ S } \\ \text{Trazas Cr } \text{Temperatura} = 1680 - 1700^\circ \text{ C}$$

- 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:

$$(0,50 - 0,80) \% \text{ C } (0,020 - 0,035) \% \text{ P } \\ < 0,009 \% \text{ S } \sim 10,50 \% \text{ Cr } \\ \text{Temperatura} = (1740 - 1770)^\circ \text{ C}$$

- 7) Se lleva la cuchara hasta el reactor RH, en el que, en condiciones de vacío se sopla con oxígeno hasta descarburation 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:

$$(0,040 - 0,060) \% \text{ C } (0,020 - 0,035) \% \text{ P } \\ < 0,009 \% \text{ S } (16,30 - 16,50) \% \text{ Cr } \\ \text{Temperatura} = 1590^\circ \text{ C}$$

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

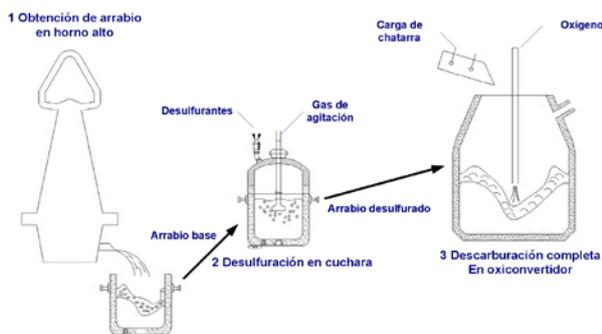


FIGURA 22 ETAPAS DEL PROCESO RH (1): DESULFURACIÓN Y DESCARBURACIÓN DEL ARRABIO

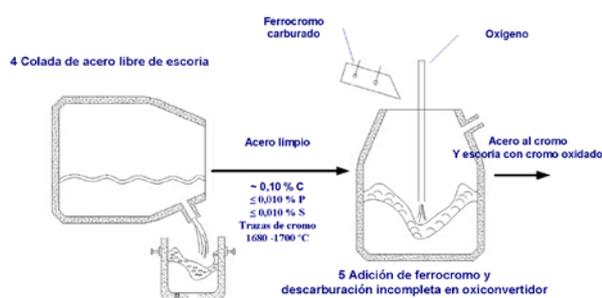


FIGURA 23 ETAPAS DEL PROCESO RH (2): ADICIÓN DE FERROCROMO Y DESCARBURACIÓN INCOMPLETA

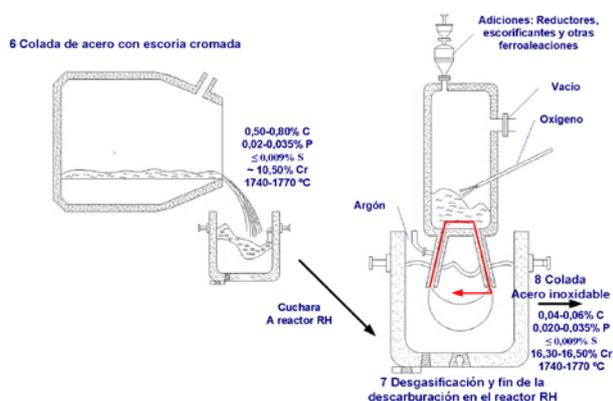


FIGURA 24 ETAPAS DEL PROCESO RH (3): DESGASIFICACIÓN FINAL

9 EL PROCESO AOD

9.1 GENERALIDADES

El procedimiento AOD (Descarburación por Oxígeno y Argón) utiliza un convertidor especial con soplado 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. Se aplica, por ejemplo, para fabricar aceros con 0,020 % de carbono, 18 % de cromo y 9 % de níquel y 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.

Hasta 1953 había dificultades para fabricar en hornos de arco aceros inoxidables 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 de 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.

9.2 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 25. 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.

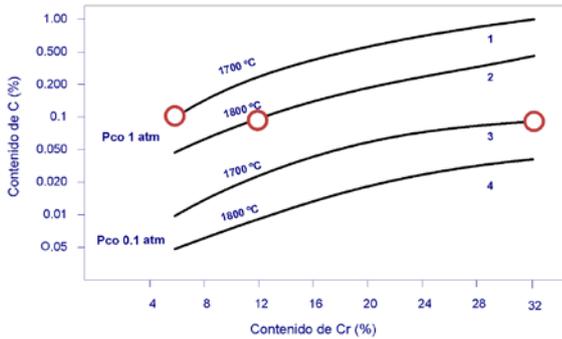


FIGURA 25 CONTENIDOS EN CROMO Y CARBONO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y PRESIONES DE CO

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 de 1 atm, cuando en el proceso de oxidación disminuye el carbono del baño, también disminuye mucho el cromo, se ve en la curva 1 de la misma figura:

- Carbono = 0,3 % Cromo = 16 %
- Carbono = 0,2 % Cromo = 12
- Carbono = 0,1 % Cromo = 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 0,2 % 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-1atm P_{CO})
C=0,1% Cr=12%
- **Curva 1** (1700 °C- 1atm P_{CO})
C=0,1% 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 25, curva 3)

- **Curva 3** (1700 °C-0,1atm P_{CO})
C=0,1% Cr=32%
- **Curva 1** (1700 °C- 1atm P_{CO})
C=0,1% 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 26, 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:

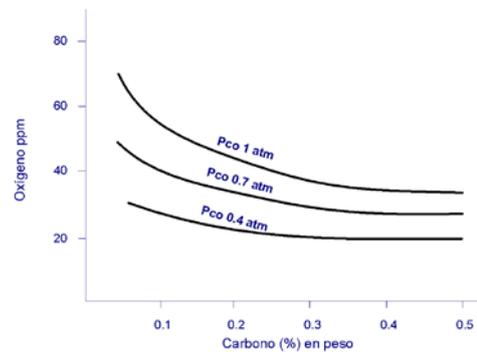
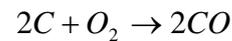


FIGURA 26 PRESIÓN DE EQUILIBRIO DE CO EN EL ÚLTIMO LÍQUIDO EN SOLIDIFICAR EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO EN CARBONO Y OXÍGENO

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:

- a) 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.
- b) 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, y 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 de este proceso, se puede disminuir, por lo tanto, la presión del CO y, por ello, es posible la fabricación de aceros inoxidables bajos en carbono y altos en cromo, sin que se produzca una fuerte oxidación y pérdida del cromo, como ocurre en el antiguo proceso clásico de fabricación de aceros altos en cromo en el horno eléctrico de arco.

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.

9.3 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 27 representa las dos etapas que componen este proceso dúplex.

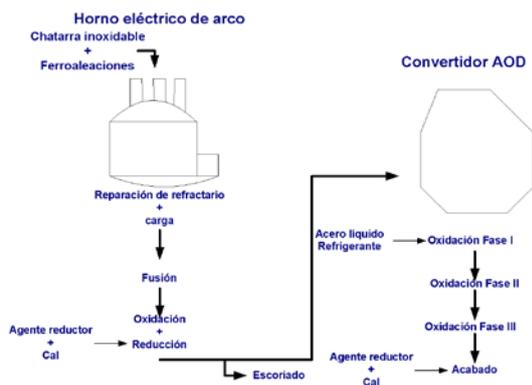


FIGURA 27 EJEMPLO DE OPERACIÓN HORNO ELÉCTRICO-CONVERTIDOR

9.3.1 FUSIÓN DE 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 hervido) formado por lingote de moldería, afino o chatarra de fundición gris. También el ferrocromo duro (alto en carbono), 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 composición aproximada es:

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

En algunos casos se puede hacer un ligero hervido que favorezca la desfosforación. Este hervido puede provocar pérdida de cromo que se oxida hasta Cr₂O₃ y pasa a la escoria y se pierde con ella. La adición de cal magnésica o dolomita frena este efecto desfavorable tal como se ve en la gráfica de la figura 28.

En la figura 29 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).

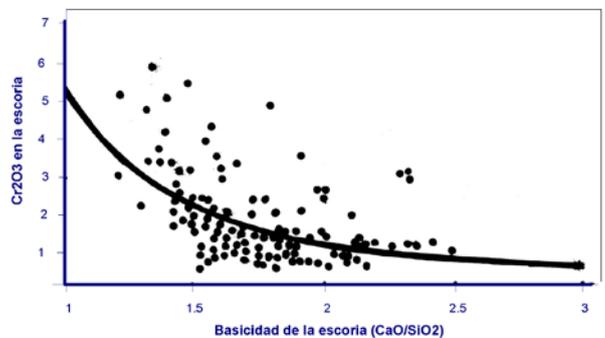


FIGURA 28 INFLUENCIA DE LA BASICIDAD DE LA ESCORIA EN LA OXIDACIÓN DEL CROMO EN COLADAS DE INOXIDABLE

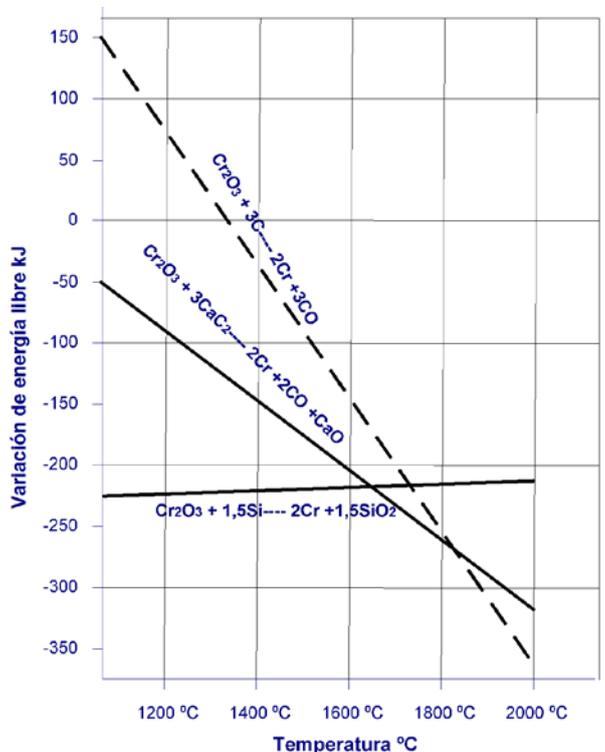


FIGURA 29 ENERGÍA LIBRE DE LAS REACCIONES DE REDUCCIÓN DEL CROMO EN LA ESCORIA ESPUMOSA FORMADA EN LA COLADA DE ACERO INOXIDABLE

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.

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.

Como el carburo de calcio es reductor más enérgico 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 prevaletientes 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.

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.

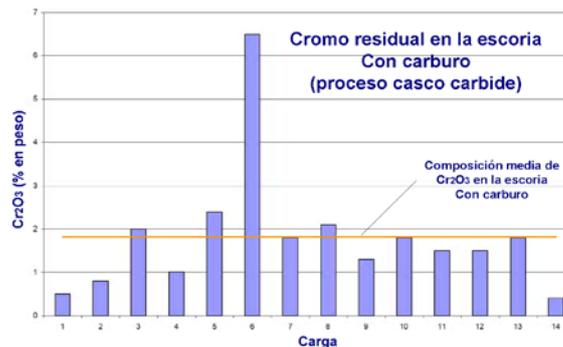


FIGURA 30 CROMO RESIDUAL EN LA ESCORIA UTILIZANDO EL PROCESO CASCO CARBIDE

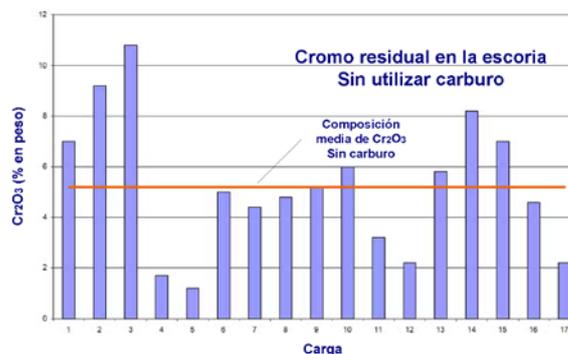


FIGURA 31 CROMO RESIDUAL EN LA ESCORIA SIN UTILIZAR CARBURO COMO REDUCTOR

El diagrama de barras de las figuras 30 y 31 ilustra la disminución de formación de Cr₂O₃ mediante la adición de carburo en coladas de acero 18/8 con molibdeno. Las tablas 4 y 5 expresan cuantitativamente los ahorros obtenidos.

Al final de la fase de fusión y ligero afino 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.

TABLA 4 AHORRO EN EL PROCESO CASCO CARBIDE (1)				
	AHORRO EN ESCORIA Y REDUCCIÓN			AHORRO EN COLADA (€/colada)
	CONVENCIONAL	PROCESO CASCO CARBIDE	COSTOS (€/unidad)	
CARBURO (CASCO CARBIDE) (kg)	0	1000	0,60	-600,00
CAL. DOLÍMIA (kg)	3700	2500	0,18	210,00
FERROSILICIO (kg)	300	300	0,40	0,00
POVLO DE CARBÓN (kg)	800	400	0,20	80,00
OXIGENO (Nm ³)	400	200	0,20	40,00
TOTAL €/COLADA				-270
AHORRO EN ALEANTES				
Cr ₂ O ₃ (%)	15	5		
Cr EN ESCORIA (kg)	626	198	0,90	385,2
HERRO EN ESCORIA (kg)	90	20	0,15	10,50
Mn EN ESCORIA (kg)	80	20	0,80	48,00
TOTAL (€/colada)				443,52

TABLA 5 AHORRO EN EL PROCESO CASCO CARBIDE (2)				
	AHORRO EN EL PROCESO			AHORRO EN COLADA (€/colada)
	CONVENCIONAL	PROCESO CASCO CARBIDE	COSTOS (€/unidad)	
TIEMPO DE CORRIENTE (min)	74	71	80,00	240,00
Energía (kWh)	39100	38600	0,021	(cuello de botella)
TOTAL € COLADA				250,50
AHORRO EN ESCORIA				
CANTIDAD DE ESCORIA DE HEA (kg/colada)	6100	5795		
TREATAMIENTO DE EVACUACIÓN DE LA ESCORIA	6100	5795	50,00	15,25
TOTAL € COLADA				15,25

9.3.2 TRATAMIENTO DEL BAÑO EN CONVERTIDOR AOD

La figura 32 representa esquemáticamente la disposición y revestimiento refractario (dolomita o magnesia casi siempre) de un convertidor AOD. La figura 33 presenta un cuadro-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 34):

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).

Se hacen adiciones de cal CaO y ferrosilicio FeSi ajustadas de forma que la escoria resultante de la oxidación del silicio a sílice SiO₂ y posterior reacción con la cal tenga una relación de basicidad CaO/SiO₂ aproximadamente igual a 2,5. Esta escoria será desoxidante y desulfuradora.

Se barbotea argón para agitar y favorecer el contacto del baño con la escoria desulfuradora.

Se ajusta la composición y temperatura del acero.

Se bascula el convertidor y se pasa el acero elaborado a la cuchara de colada.

Al comenzar el soplado, Fase I, con altas proporciones de oxígeno, se produce una fuerte oxidación del acero. El carbono baja a 0,15 % 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 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.

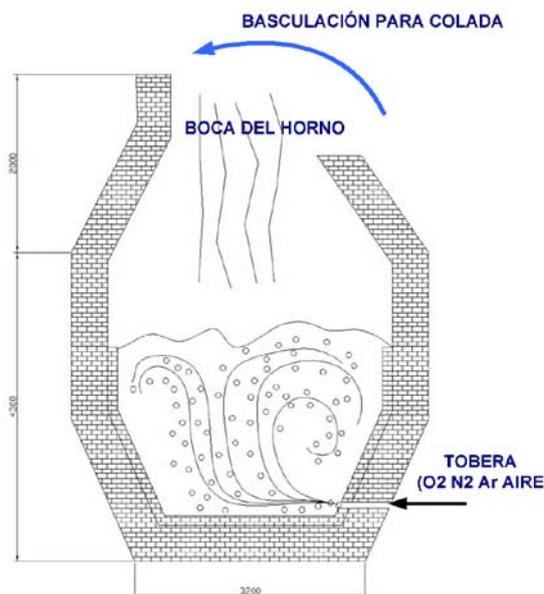


FIGURA 32 CONVERTIDOR AOD

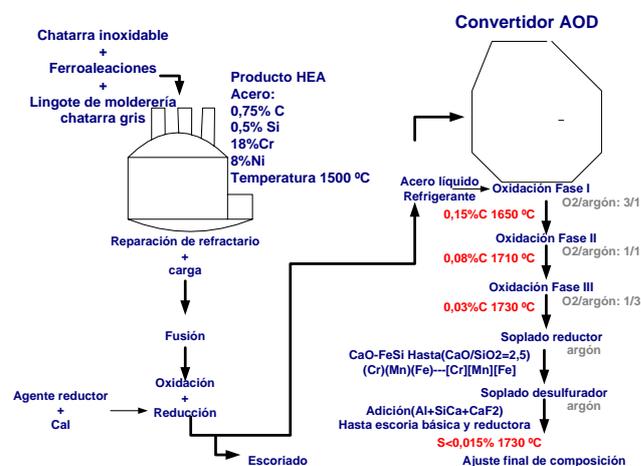


FIGURA 33 PROCESO AOD PARA FABRICACIÓN DE ACERO INOXIDABLE

En los convertidores iniciales se han experimentado 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.

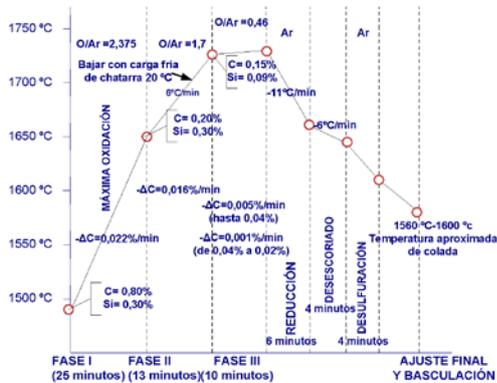


FIGURA 34 EVOLUCIÓN DEL PROCESO AOD: TEMPERATURA, COMPOSICIÓN, TIEMPO

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 descarbonación. 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 descarbonación y el conocimiento de la cantidad exacta de oxígeno introducido desde el principio dictan el tiempo de soplado de esta fase.

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 35 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.

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.

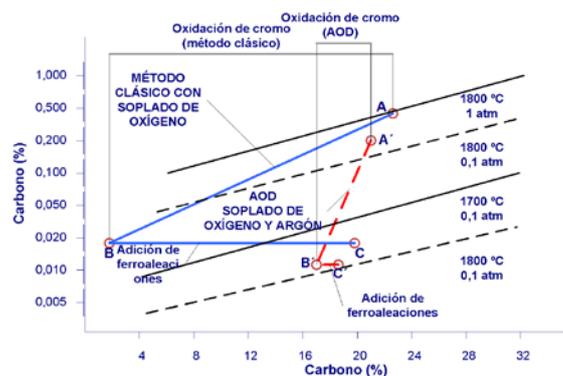


FIGURA 35 EVOLUCIÓN CARBONO-CROMO EN HEA Y AOD

En la tabla 6 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.

TABLA 6 DESULFURACIÓN EN UN CONVERTIDOR AOD DE 15 T				OPERACIÓN
No	GRADO	INICIAL	FINAL	
1	316	0,021	0,010	Ningún tratamiento especial
2	304L	0,022	0,004	180 kg de adicionales de cal en la mezcla reductora No más actuaciones
3	305	0,037	0,006	Desescoriado: 230 kg de cal +30 kg de espato 2 min soplado con argón a 336 m ³ /h
4	304	0,050	0,007	Desescoriado: 270 kg de cal + 20 kg de espato +45 kg de SiCa 3 min soplado con argón a 336 m ³ /h

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 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 dolomía.

En la figura 35 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 %.

9.4 COMPARACIÓN ENTRE PRÁCTICAS OPERATIVAS HEA 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.

a) 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 %.

b) 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 %.

9.5 CONVERTIDOR CLU

Es un proceso desarrollado por las acerías Creusot-Loire, de Francia, y Uddeholm, de Suecia. El fundamento termoquímico del procedimiento es el mismo que en el caso AOD, aunque el gas de dilución no es ahora argón sino vapor de agua a presión.

Este gas (figura 36) 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. No ha tenido gran difusión.

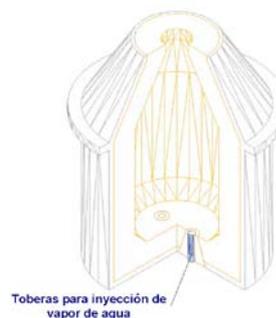


FIGURA 36 CONVERTIDOR CLU

10 CASOS PRÁCTICOS ACTUALIZADOS

10.1 CASO PRIMERO

En lo que sigue se comparan los equipos y operación de los procesos AOD y VOD. Se presta mayor atención a la capacidad del proceso a la hora de producir aceros inoxidables con tolerancias especiales de composición para satisfacer normas de alta pureza y microlimpieza a fin de llegar a características tecnológicas superiores.

El proceso AOD se caracteriza por su elevada productividad, sencillez de operación y versatilidad metalúrgica de cara a un amplio intervalo de aceros inoxidables normales y algunos especiales. El método VOD es en muchos aspectos similar al AOD, aunque resulta especialmente ventajoso para coladas relativamente pequeñas de aceros inoxidables de ultrabajo carbono (ULC) y extrabajos intersticiales (ELI); también para aquellas aplicaciones en que las restricciones de composición y microlimpieza son de importancia especial como; por ejemplo, los materiales para soldadura, conformación en frío y trefilado de alambre delgado. Más que competitivos entre sí, los dos procesos se consideran complementarios a la hora de satisfacer los variados requerimientos tecnológicos actuales.

10.1.1 ACERO FABRICADOS

El programa general de producción de la acería abarca desde aceros de construcción de baja aleación, aceros de herramientas, inoxidables y resistentes al calor hasta aceros de alta velocidad y aleaciones especiales de base hierro o níquel. Producen 125000 toneladas anuales de lingotes de inoxidable, destinados a producción que va desde barras a alambre. La distribución de composiciones es como sigue:

Austeníticos	58,1 %
Martensíticos	10,1 %
Ferríticos	13,1 %
De válvulas	18,7 %

Producción AOD	98,5 %
Producción VOD	1,5 %

10.1.2 EQUIPOS DE PLANTA

El proceso AOD (descarburación por oxígeno-argón) se emplea muy extensamente gracias a sus bien conocidas ventajas en la producción masiva de aceros inoxidables corrientes con requerimientos usuales de carbono y nitrógeno. Al aumentar la capacidad de los convertidores AOD las unidades de fusión primaria se cambiaron desde horno eléctrico convencional a horno UHP (Ultra alta potencia) de 90 toneladas que hasta entonces sólo se habían empleado para aceros de construcción. La productividad aumentó significativamente. Las características del conjunto AOD son las que siguen:

Horno eléctrico UHP:

Capacidad	90 t
Potencia	45 MVA
Diámetro de cuba	5800 mm
Diámetro electrodos	550 mm
Refrigeración por agua	Cuba y bóveda

Convertidor AOD:

Fecha instalación	1975
Fecha modificación	1986
Capacidad	80 t
Diámetro interior útil	3500 mm
Altura	6970 mm
Profundidad baño con 80 t	2100 mm
Revestimiento de seguridad	Magnesita
Revestimiento de trabajo	Dolomía
Duración revestimiento	52 coladas
Número de toberas	5
Caudal máximo de oxígeno	80 Nm ³ /min
Caudal máximo de gas inerte	70 Nm ³ /min
Número de tolvas de aleaciones	20

Posteriormente se modificó el equipo para alcanzar más consistencia de calidad y para ahorrar costos rebajando consumos y aumentando duración del refractario. En 1987 se instaló una "top lance" para soplado por arriba. Se supone también que una combinación futura de AOD y horno cuchara sería prometedora, tanto operativamente como en calidad, ya que aumentaría la flexibilidad necesaria para colada en lingotera y en máquina de colada continua.

La línea de producción VOD consta de un horno de arco convencional de 12,5 MVA, con dos cubas intercambiables de 20 T de capacidad, y de un sistema ASEA-SKF de afino en cuchara con estación de vacío para tratamientos según sistema VOD. El carro transfer de cucharas está dotado de un agitador de inducción a baja frecuencia y un sistema hidráulico de basculación de la cuchara para desescoriado con rableado mecánico. Este avanzado sistema combinando VOD y horno cuchara aporta gran flexibilidad operacional en coladas pequeñas de calidades especiales relacionadas con fabricación de grados especiales de aceros inoxidables destinados a aplicaciones específicas.

Las características del sistema VOD son las que siguen:

Horno eléctrico de arco:

Capacidad	20 t
Potencia	12,5 MVA
Diámetro de crisol	3800 mm
Diámetro de electrodos	300 mm
Revestimiento	Convencional

Estación de refino VOD:

Fecha instalación	1984
Bases de diseño	Bóveda de vacío sobre cuchara
Capacidad de cuchara	20 t
Profundidad del baño con 20 t	1800 mm
Altura libre de cuchara sobre baño	800 mm
Refractario de trabajo	Cromo-magnesita
Lanza de oxígeno	Consumible, con cinco salidas
Caudal máximo de oxígeno	10 Nm ³ /min
Bombas mecánicas de agua	3 bombas de anillo
Bombas de eyectores de vapor	4 etapas, 3 condensadores
Consumo máximo de vapor	4000 kg/h
Presión de operación	0,5 torr

Estación de horno cuchara:

Capacidad	20 t
Potencia del transformador	4,5 MVA
Diámetro de electrodos	250 mm
Regulación de electrodos	Hidráulica
Velocidad media de calentamiento	5 ° C /min para 20 t
Agitador inductivo	800 KVA
Intervalo de frecuencias	0,3 – 3 Hz
Caudal de argón	40 l/min

10.1.3 TECNOLOGÍA DEL PROCESO

Ambos procesos, AOD y VOD, pueden considerarse competitivos entre sí, pero en muchos casos sus posibilidades son complementarias. Aunque el proceso VOD se desarrolló antes, el AOD ha experimentado un extraordinario crecimiento de cara a la producción masiva de aceros inoxidables.

Una ventaja significativa de la operación del AOD es su adaptabilidad a materias primas muy variables, ya que se puede partir de contenidos muy altos de carbono y además desulfurar enérgicamente. Las elevadas velocidades del flujo de gases y la introducción de gran energía cinética aceleran espectacularmente las reacciones de intercambio entre el baño de acero, los gases inyectados y la escoria. Por tanto, el convertidor es un aparato muy adecuado para tratamientos metalúrgicos intensivos y para disminuir los contenidos de hidrógeno y elementos trampa volátiles.

El tratamiento inicial de oxidación (y descarburación), así como la subsiguiente fase reductora, son similares en el AOD y en el VOD. No obstante, la posibilidad de alcanzar y mantener muy bajos contenidos de carbono es algo más limitada en el AOD, ya que en el VOD la presión parcial del CO bajo exclusión de la atmósfera puede reducirse más; con ello se alcanzan contenidos de carbono extremadamente bajos y no es preciso transferir el acero a un recipiente de tratamiento. En uno u otro proceso puede efectuarse la descarburación final mediante un “hervido”

por purga de argón, aprovechando el oxígeno remanente en el baño y la escoria, generando una disminución adicional del contenido de carbono.

Empleando el VOD para aceros inoxidables ferríticos, una doble descarburación y una fase de hervido intensificado permite llegar a extremadamente bajos contenidos de carbono (50 ppm) y nitrógeno (< 80 ppm).

Durante la fase reductora se consigue una recuperación casi completa de todo el cromo oxidado. En la escoria se alcanzan niveles muy bajos de óxido de cromo residual después de la fase reductora en el AOD, lo cual se debe en gran parte a que se produce un mezclado muy íntimo en el convertidor. En el VOD el franco bordo de las cucharas es muy limitado, lo que impide efectuar una agitación muy intensa, de manera que se pierde más óxido de cromo con la escoria.

De una forma general, se prefiere el VOD para disminuir hasta el mínimo los contenidos de gas y para la adición de elementos altamente reactivos y microadiciones, tales como las requeridas para la producción de aceros resistentes al calor y superaleaciones de endurecimiento por precipitación.

Una ventaja del AOD en lo que concierne a desulfuración es que pueden hacerse cambios de escoria de forma rápida para llegar a niveles de sólo 0,001 - 0,003 % de azufre.

Desde el punto de vista de obtención de aceros muy limpios, y de cara a la separación y eliminación de inclusiones, es muy importante el ajuste de basicidad de la escoria y tener un buen grado de agitación en la cuchara. En este sentido, la agitación inductiva en el VOD y la posibilidad de recalentar el acero en la estación LF de horno cuchara se han revelado especialmente útiles en la fabricación de aceros ultralimpios. No obstante, la diferencia entre VOD y AOD no es demasiado grande en este aspecto.

10.1.4 CALIDAD Y APLICACIONES

Para los aceros inoxidables de los tipos 304 y 316, a los que se exige un carbono regular o bajo ($\leq 0,030$ %) sin ser, en cambio, estrictos en lo que a nitrógeno concierne, el proceso AOD es una respuesta económicamente muy atractiva, gracias a su versatilidad metalúrgica, adaptabilidad y elevada productividad. La tendencia a buscar contenidos más bajos de carbono para mejorar la resistencia a la corrosión puede ser satisfecha con un cuidadoso control del proceso.

Niveles ultrabajos de carbono (ULC < 0,015 %) y/o contenidos de nitrógeno particularmente bajos (grados ELI < 0,015 %) en austeníticos se alcanzan más fácilmente con el VOD. Algunas especificaciones de alambre fino y para soldadura entran en esta categoría, como también aceros ferríticos ultrabajos en intersticiales y superferritas de alta aleación.

Para un extenso intervalo de productos o para tamaños limitados de coladas el VOD presenta ciertas ventajas operativas, de flexibilidad y de calidad que no entran en las posibilidades generales del AOD. La pequeñez del tamaño de colada y la disponibilidad de otros equipos metalúrgicos en la línea VOD, tales como el horno-cuchara y estaciones inyectoras, constituyen requisitos previos para enfrentarse a materiales fuera de lo ordinario o adaptarse a necesidades del cliente.

El VOD puede producir composiciones especiales como, por ejemplo, bajos contenidos de fósforo (< 0,010 %) para varilla de aportación de soldadura, tolerancias muy estrechas de composición, la aleación exacta con adiciones reactivas o alcanzar excelente limpieza.

Finalmente, hay que decir que una evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales producidos mediante ambos procesos no ha mostrado diferencias medibles. Igualmente, las características tecnológicas son muy similares. Ambos procesos son mutuamente sustituibles cuando las circunstancias económicas o de tecnología de producción para llegar a propiedades finales específicas de los productos.

10.2 CASO SEGUNDO

En este segundo caso la acería ha ampliado sus equipos de metalurgia secundaria con la introducción de una unidad VOD enfocados a la producción de aceros de alta aleación para colada en lingotera o máquina de colada continua. Se comparan los resultados operativos obtenidos, en comparación con los derivados de los equipos VAD (Desgasificación por Arco en Vacío) y LF (Horno-Cuchara).

La producción anual es de 500.000 toneladas. Esto a base de fusión eléctrica y VAD y LF a las que se ha añadido un equipo VOD. Como ya es sabido, el proceso de descarburación por oxígeno en vacío se basa en la oxidación preferente del carbono en aceros conteniendo alto cromo durante la inyección de oxígeno con lanza en condiciones de vacío.

El objetivo de la instalación VOD es reducir costos de materias primas en la producción de aceros martensíticos o aumentar la eficiencia de producción de aceros de muy bajo carbono, como los dúplex austeno-ferríticos cada vez más empleados en los campos del petróleo y gas.

10.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA VOD

El Vacmetal VOD ha requerido la modificación del ya existente tanque desgasificador para permitir la descarburación de coladas de 60 – 80 t manteniendo la posibilidad de desgasificación al vacío de cucharas de hasta 150 t de aceros al carbono y aleados.

La modificación ha traído consigo la instalación de lanzas refrigeradas por agua para inyección de oxígeno, un sistema eyector de dos etapas dotado de colector de polvos

y una pantalla térmica tubular refrigerada por agua para proteger la tapa del tanque. Se modificó la base de cucharas para acomodar tanto las cucharas de 150 t para desgasificación al vacío como las de 100 t para VOD.

En lo que sigue se dan algunos detalles técnicos de los equipos implicados:

Tanque de vacío:

Diámetro	6,10 m.
Altura	7,44 m.
Desplazamiento tapa	50 mm.

Sistema de vacío:

Nuevo sistema eyector de dos etapas con sistema colector de polvos durante el soplado de oxígeno. Este equipo se une al ya existente de cinco etapas con impulsores para desgasificación en vacío de menos de 1 torr. Equipo de emergencia de purga con nitrógeno disponible en el caso de fallo del eyector durante el soplado de oxígeno.

Lanza de oxígeno:

De tres salidas, punta de cobre, refrigeración por agua, protección consumible de refractario.

Presión de operación	10 bar.
Capacidad de soplado	2000 Nm ³ / h.
Altura de operación sobre el baño	(1500 – 180)mm.
Recorrido de operación	(0 – 1800) mm.
Longitud 3180 mm	Diámetro 70 mm.

Cucharas:

Diámetro	2,93 m.
Capacidad	60 – 80 t acero líquido.
Francobordo	1000 – 1500 mm.
Refractarios	Magnesita-cromo, pared 150 mm, solera 225 mm, calidad especial en línea de flotación de escorias.

Agitación:

Nitrógeno o argón (hasta 40 Nm³ / h) a través de tapón poroso montado centralmente.

Protección antiproyecciones:

Cubierta de refractario con agujero de 1500 mm.

Fabricante

Vacmetal U.K.

10.2.2 RUTA DEL PROCESO

Después que 80 t de acero se han fundido en el horno eléctrico de arco de 50 MVA, se sopla oxígeno para eliminar el silicio y parte del carbono. Se hacen adiciones de aleantes para llevar los contenidos de manganeso y cromo a los valores previstos y se cuela el horno, libre de escoria, con un contenido de carbono aproximado del 0,50 %. Se añade cal a la cuchara durante la basculación para neutralizar la pequeña cantidad de sílice formada durante el soplado de oxígeno en el VOD.

Una vez en el VOD, se coloca la tapa refractaria antiproyecciones, se cierra la tapa hermética del tanque y se hace el vacío hasta 50 torr antes de comenzar el soplado de oxígeno. Durante el tratamiento se barbotea argón, con un caudal de unos 5 Nm³ / h, a través de un tapón poroso posicionado centralmente.

Para tipos de bajo carbono hasta que los sensores de control de proceso indican que la reacción carbono / oxígeno se ha completado, momento en que el contenido de carbono está aproximadamente por debajo de 0,10 %. Se detiene el soplado de oxígeno y se continúa evacuando hasta que la presión es 1 torr, manteniéndose a esa presión durante 10 o 15 minutos. Al actuar así, la reacción carbono / oxígeno recomienza. El contenido de carbono en el baño de acero queda ahora en 0,010 % y la temperatura es de 1700 ° C.

Para tipos de carbono más alto se emplea una técnica "catch carbon" para evitar excesiva recarburación después del soplado.

Según el uso futuro del acero, se añade aluminio /en forma de ferroaluminio) o silicio (en forma de ferrosilicio) para reducir el óxido de cromo que haya pasado a la escoria. Se adiciona también una mezcla CaO / CaF₂ para fluidificar la alúmina o sílice formadas y para desulfurar. La unidad se evacua hasta quedar a menos de 1 torr durante 10 minutos para maximizar la recuperación de cromo y la desulfuración.

Cuando la fase reductora se ha completado se hace el ajuste final de aleantes. Puede efectuarse la inyección de ciertos elementos para optimizar el control de análisis; después se barbotea el acero para ajustar temperatura.

10.2.3 CONTROL DEL PROCESO

Durante la fase de soplado de oxígeno el proceso se monitorea continuamente en lo que respecta a tres parámetros de operación:

➤ Actividad de oxígeno

Un medidor de actividad de oxígeno emplazado en la chimenea de salida del eyector determina la actividad de oxígeno libre en los gases de salida. Mientras se está realizando la eliminación del carbono, el medidor indica una presencia mínima de oxígeno en los gases de salida. Sin embargo, cuando disminuye el ritmo de disminución de carbono, aumenta la actividad de oxígeno y un rápido

aumento de la marcación del medidor avisa del final de la descarburación y, por tanto, es una señal de "fin de soplado".

➤ Presión en el tanque de vacío

Antes de comenzar el soplado la presión en el tanque de vacío es de 50 torr. Cuando comienza la reacción carbono /oxígeno aumenta el volumen de gases generados lo que a su vez da lugar a un aumento de la presión de operación dentro de la cámara. La presión crece continuamente hasta un punto en el cual la reacción entre carbono y oxígeno está en el máximo (100 torr) a mitad de camino del soplado. Desde este punto la presión comienza a descender y eventualmente alcanza el nivel de pre-soplado.

➤ Temperatura de gas de salida

Este parámetro muestra un aumento continuo durante las etapas iniciales del soplado y alcanza un máximo en la altura de la reacción carbono / oxígeno antes de declinar lentamente.

La experiencia ha mostrado que los parámetros anteriores suministran una respuesta continua de operación para cualquier tipo de acero, permitiendo por tanto un control satisfactorio de la operación del VOD. En el caso de que la respuesta de cualquier parámetro individual no sea la prevista, el proceso se detiene hasta que se identifique y corrija la causa de esa reacción.

10.2.4 PRÁCTICA DEL MATCH CARBON

En la fabricación de inoxidables de alto carbono como, por ejemplo, el AISI 410 (0,10 % C, 13 % Cr) y AISI 420 (0,20 % C, 13 % Cr) es preferible mantener al mínimo los niveles de recarburación. No obstante, los sistemas de monitoreo del control de proceso vistos en epígrafe anterior sólo pueden emplearse para determinación de fin de soplado. Por ello se ha desarrollado la técnica de "catch carbon" empleando velocidades prefijadas de consumo de oxígeno para alcanzar el final requerido de los niveles de tratamiento de carbono para estos grados de aceros.

Se han determinado las eficiencias previsibles de eliminación de carbono para un contenido de partida determinado de este componente. Como ejemplo, para 0,50 % de carbono de inicio, se requiere un relación de volumen de oxígeno (m³) a peso de carbono a eliminar (kg) igual a 1,6 / 1. Haciendo uso de esta práctica, puede calcularse el oxígeno requerido para alcanzar una exactitud de ± 0,01 % en el nivel final de carbono.

Cuando se producen austeníticos de bajo carbono se genera suficiente calor durante el soplado de oxígeno para el refinado posterior. Sin embargo, en la práctica "catch carbon" pueden ser necesarias adiciones termógenas de silicio o aluminio, que se oxidan en el curso del soplado, a fin de alcanzar un sobrecalentamiento adecuado para las etapas de reducción y acabado.

10.2.5 RENDIMIENTO DE LA OPERACIÓN

Desde que se instaló el VOD se han alcanzado progresos para extraer todo el potencial posible del procedimiento. Entre otros logros, se ha conseguido descarburar hasta el nivel deseado para cualquier tipo de acero.

No se ha conseguido llegar a niveles muy bajos de nitrógeno (< 50 ppm) ya que éstos no eran exigidos en los tipos de aceros fabricados. Más aún, la mayoría de los grados austeníticos producidos necesitaban adición de nitrógeno para controlar la presencia de ferrita. Este nitrógeno se adicionaba barboteando en la cuchara caudales de hasta 40 m³ / h a través de tapón poroso; el rendimiento de adición era del 100 %.

El mejor criterio de excelencia de la metalurgia secundaria en el VOD es alcanzar una buena recuperación de cromo. Pues bien, los resultados obtenidos en aceros con 11,5 – 20 % Cr muestran un rendimiento medio superior al 98 % desde el nivel anterior al AOD al nivel de post-reducción.

Una vez conocido y dominado plenamente el proceso, se ha implantado el SPC para monitorear y controlar los parámetros clave del mismo.

10.2.6 CALIDAD DEL PRODUCTO

Los resultados iniciales deducidos de la extensa e intensa evaluación del procedimiento indican, por ejemplo, que se alcanzan valores más elevados de limpieza que en la acería basada en horno y VAD (Desgasificación por Arco en Vacío). El método de tratamiento Ultra Clean Steel Package implica protección con gas inerte del chorro en la cuchara y circulación a través de refractarios de alta calidad. Este procedimiento permite prever una mayor utilización del VOD. Por ejemplo, se contempla la fabricación de materia prima para proceso VAR (Vacuum Arc Remelting, refusión por arco en vacío).

10.2.7 DESARROLLOS FUTUROS DEL VOD

- Lanza de oxígeno, diseño de la boquilla

Durante el período de soplado de oxígeno en el VOD, la interacción entre el oxígeno y la superficie del baño da lugar a salpicaduras cuya severidad es función del momento del chorro de oxígeno, altura de la lanza sobre el baño, caudal de purga de argón y presión de operación. En las primeras coladas se produjeron excesivas proyecciones; para mitigar el efecto se aumentó la altura del extremo (boquilla) de la lanza sobre el baño. Se consiguió disminuir salpicaduras sin pérdida sensible de rendimiento de descarburación.

Sin embargo, la máxima capacidad de velocidad de soplado de oxígeno aún no se ha alcanzado, y se está investigando en factores adicionales como, dimensiones de la boquilla de salida de la lanza, tipo de boquilla (lisa o Laval) y características del chorro de gas en vacío a fin de

optimizar las condiciones para mínimas salpicaduras y máxima velocidad de descarburación.

- Acería VOD / VAD

Se está desarrollando un proceso combinado VOD / VAD de metalurgia secundaria que se espera sea beneficioso, tanto para calidad como para productividad. En la persecución de alta integridad y productos ultra-limpios de acero, la adopción de prácticas prolongadas de refinado secundario es importante para la flotación de inclusiones. Con este propósito se están realizando ensayos para verificar los beneficios que se derivarían de acabar el acero saliente del VOD en el VAD.

En el trabajo con máquinas de colada continua es muy favorable con un “colchón” o “embalse” entre la acería y la colada continua. Esto es particularmente importante si se trabaja según la planificación de colada secuencial. Pues bien, este colchón lo aporta el equipo VAD.

10.3 CASO TERCERO

Esta acería ha trabajado en la preparación de acero inoxidable según el proceso VOD Standard Messo Method. El resultado de los ensayos ha sido el lanzamiento de una nueva tecnología VOD de fabricación de aceros resistentes a la corrosión con limpieza metalúrgica mejorada. En las marchas antiguas se sopla oxígeno hasta llegar concentraciones muy bajas de carbono (0,03 % C). Esto provoca efectos desfavorables, tales como sobrecalentamiento del baño y sobresaturación de oxígeno en el mismo. En el método desarrollado se corta el soplado de oxígeno algo más pronto (entre 0,05 y 0,10 % C) desgasificando después el baño con algunas adiciones de escorias oxidantes.

Al proceso de soplado sigue el período desoxidante que se realiza según cuatro variantes con desoxidantes complejos como Si Mg, Ca Si Al, Si Zr y Fe Si, con adiciones de escoria sólida compuesta por Ca O y Ca F₂. Se efectuaron los siguientes análisis:

- Contenidos de oxígeno, azufre y nitrógeno, tanto en el acero líquido como en los lingotes colados.
- Observación microscópica de NI (inclusiones no metálicas), según normas PN-64/H-04510 y Stahl Eisen Prüfblatt SEP 1570-71.
- Microanálisis por Rayos X de las NI características (Joel JXA-50^a).
- Análisis informatizado de la distribución superficial de las NI (Quantimet 720).

Los resultados del análisis muestran que todas las variantes ensayadas resultan en una limpieza satisfactoria del acero fabricado. Los ratios obtenidos son mucho más bajos que el ratio máximo K4 impuesto por los importadores europeos de acero.

10.3.1 INTRODUCCIÓN

La limpieza metalúrgica de los aceros inoxidable es uno de los factores más importantes impuestos por los clientes de aceros. El término “limpieza metalúrgica del acero” viene a ser la composición cuantitativa y cualitativa y la distribución espacial de cuerpos indeseables como gases (nitrógeno, hidrógeno, oxígeno), azufre, arsénico o inclusiones no metálicas.

La eliminación de hidrógeno e, incluso, azufre puede realizarse hasta un nivel satisfactorio por métodos ajenos a la metalurgia secundaria. Sin embargo, la desoxidación a fondo y/o la eliminación de las NI (inclusiones no metálicas) introducen algunas dificultades definidas en el procesado del acero. Este caso se da cuando se fabrican aceros aleados resistentes a la corrosión (inoxidables). La implantación de la tecnología sugerida en el VOD Standard Mezo Method en la planta Huta Baildon ha resuelto muchos de estos problemas.

10.3.2 SOPLADO DE OXÍGENO EN VACÍO

El soplado de oxígeno sobre el baño metálico en condiciones de vacío en la instalación VOD resulta en una descarburación relativamente rápida del acero así como un aumento de la temperatura lo suficientemente acusado como para continuar con otros procesos de afino como la desoxidación en vacío o la adición de ferroaleaciones para ajuste de composición.

El paso del chorro de oxígeno a través del baño resulta, incluso en condiciones de vacío, en sobrecalentamiento del baño de acero y a sobresaturación de oxígeno. Esta sobresaturación puede dar lugar a pérdidas sustanciales de cromo, que se evitan si se detiene el soplado de oxígeno cuando el baño alcanzó un 0,05 – 0,10 % de carbono, es decir, antes que en otros procesos anteriores. Después, por desgasificado del baño en presencia de escoria, uno puede alcanzar los niveles de carbono y oxígeno deseados para el acero en cuestión.

En este método, una vez que se corta el soplado empieza a trabajar un vacío de menos de 1 torr durante 8 – 15 minutos a temperaturas en la región de 1923 – 1973 ° K. Durante este proceso se producen los siguientes efectos:

- Descarburación del baño.
- Alguna desoxidación por carbono.
- Eliminación de un 25 – 45 % del nitrógeno inicial.
- Eliminación sustancial de las NI más grandes.

La velocidad de descarburación del baño después de cortar el flujo de oxígeno está dentro del intervalo $3,0 \times 10^{-3} - 7,5 \times 10^{-3} \% C / \text{min}$, que lleva a un contenido final de carbono de 0,010 – 0,020 %. La desoxidación por carbono que se produce simultáneamente a una velocidad de 23 – 45 ppm / min, lo que hace que el contenido final de oxígeno venga a ser menor de 200 ppm. Este contenido tan bajo de oxígeno era difícil de conseguir en los procedimientos antiguos. Se sabía que para

fluctuaciones en torno a 500 ppm el proceso era difícil de controlar.

En cualquier caso, para alcanzar oxidación efectiva del carbono es preciso un pequeño exceso de oxígeno, el cual exceso es aportado por la reducción de la escoria.

El proceso se acelera mediante mezclado con argón. Al final de estas operaciones el baño de acero está en condiciones adecuadas para el afino energético que sigue.

10.3.3 AFINO

La etapa de afino en los procesos de fabricación de inoxidable constan de las siguientes subfases:

- Desoxidación preliminar con desoxidantes fuertes (Al, Ca Si).
- Desoxidación con desoxidantes complejos.
- Desgasificado al vacío (< 1 torr) con purga simultánea de argón.

La desoxidación preliminar se hacía con aluminio, el cual se introducía en el baño sujeto a una barra de acero. Como resultado se producía un rápido descenso del contenido de oxígeno, quedando el metal con 80 – 100 ppm. Los productos de la desoxidación abandonaban el baño con gran velocidad.

El proceso principal de desoxidación se efectúa por adición simultánea de los siguientes desoxidantes complejos: Si Mg, Ca Si Al, Si Zr, Fe Si, así como una escoria sintética formada por Ca O y Ca F₂. Esta escoria intensifica el afino completo del acero desde el punto de vista de azufre e inclusiones.

En la tercera subfase el metal se desgasifica durante 10 - 15 min y se transfiere después a la máquina de colada continua, ya a presión atmosférica.

10.3.4 LIMPIEZA METALÚRGICA DEL ACERO

Los aceros fabricados han sido:

- Austenítico con 18 % Cr y 9 % Ni.
- Austenítico con 18 % Cr, 13 % Ni y 2 % Mo.
- Ferrítico con 13 % Cr.
- Martensítico con 17 % Cr y 2 % Ni

Estos aceros se sometieron a los cuatro grupos de controles citados en el capítulo inicial. Los resultados obtenidos muestran que:

La concentración final de oxígeno obtenida por los cuatro métodos llega hasta 90 ppm, siendo el valor medio menor de 75 ppm (unas 55 ppm).

No hay evidencia inequívoca de la superioridad de alguno de los cuatro métodos sobre los otros, aunque el método 4 que emplea Si Zr deja contenidos de oxígeno considerablemente menores.

Se ha visto también que la colada al aire influye mucho en la limpieza del acero debido al atrape de oxígeno que puede hacer aumentar el contenido de este elemento en el baño hasta llegar a ser 150 ppm. Se están haciendo ensayos de protección del chorro metálico al entrar al molde. Se supone que el empleo de argón o dióxido de carbono puede bajar el contenido de oxígeno hasta ser menor de 30 ppm.

En cuanto a inclusiones no metálicas, todos los métodos ensayados han llevado a buenos resultados de limpieza superiores, incluso, a las especificaciones exigidas por los clientes.

Las coladas de implantación, desarrollo y puesta a punto de este proceso y sus variantes han llevado a las siguientes conclusiones generales:

La nueva tecnología en todas sus variedades garantiza un afino satisfactoriamente efectivo de los aceros resistentes a la corrosión.

En cuanto a oxígeno e inclusiones (óxidos), el método 4 (Si Zr) parece superior a los otros.

El proceso VOD no sólo elimina inclusiones sino que garantiza una buena desulfuración y deshidrogenación del acero líquido.

En cuanto a desnitrogenación, los resultados no parecen satisfactorios.

Actualmente se están empleando los métodos 1 y 3 para inoxidable, mientras que el 4 sólo se emplea ocasionalmente.