

3.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1.- EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA ESCORIA

La escoria siderúrgica se genera en el proceso de producción del acero, existen básicamente tres procesos de fabricación, que se distinguen según el tipo de horno utilizado, el Siemens- Martin, el Convertidor al oxígeno y el Horno de Arco Eléctrico.

Los dos procesos mundialmente más utilizados son el de fusión y afino de chatarra en hornos de arco eléctrico, y el de afino en convertidores al oxígeno. La utilización de hornos Siemens-Martin está actualmente en desuso, ya que en ellos se inyecta aire en lugar de oxígeno y con eso el rendimiento energético es mucho menor.

En Cataluña el único productor de acero existente es CELSA, y la totalidad de su producción la lleva cabo mediante hornos de arco eléctrico. Es por este motivo que este estudio está centrado únicamente en la escoria obtenida en los hornos de arco eléctrico de la factoría de Castellbisbal.

El horno de arco eléctrico es cilíndrico y está recubierto de refractario, dispone de una bóveda por donde se alimentan las diferentes materias primas con la ayuda de una cesta, una compuerta utilizada durante la fusión y para desescoriar, y una piquera situada en el fondo o en un costado del horno que se utiliza para colar el acero.

La materia prima fundamental es la chatarra junto con pequeñas cantidades de mineral de hierro, prerreducidos, ferroaleaciones, cal, espato-flúor, coke y oxígeno.

El prerreducido es la carga virgen que se utiliza para diluir los metales indeseables que pueda contener la chatarra utilizada para la fabricación de acero.

Las etapas básicas de la fabricación de acero por el procedimiento de horno eléctrico son la fusión de las chatarras por una corriente eléctrica y el afino posterior del baño fundido.

La etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar las impurezas de manganeso y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas.

La etapa de afino incluye la desoxidación que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero.

Cuando los electrodos entran en contacto con la chatarra y se hace saltar el arco eléctrico, se producen saltos entre los electrodos del horno y la chatarra, que empieza a fundirse. La aparición de líquido fundido hace que el trabajo sea más regular.

Se alimenta el horno con oxígeno puro, cal y cal dolomítica. La reacción de oxidación del hierro es la primera en producirse debido a la cantidad de hierro presente en la chatarra. A continuación el óxido de hierro oxida al manganeso y silicio. Estas reacciones son altamente exotérmicas, por lo que producen un aumento brusco de la temperatura de fusión, reduciéndose el consumo energético.

Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de la escoria que cubre el líquido fundido.

Finalmente, cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso, la escoria tiene suficiente porcentaje de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO. Con ello se genera monóxido de carbono, gas que al desprenderse del líquido produce lo que se conoce como hervido del baño, que facilita la uniformización de la composición y temperatura del baño así como la eliminación de gases.

Además el paso de monóxido de carbono a través de la escoria, que produce lo que se conoce como escoria espumante, facilita la penetración de la escoria en los electrodos e incrementa la eficiencia energética.

La reducción de la ebullición del líquido fundido es un indicador de que la mayor parte del carbono se ha oxidado.

La presencia de cal asegura la eliminación de fósforo del líquido, que de otro modo se manifestaría en una gran fragilidad del acero en frío.

Esta escoria es la que se conoce como escoria negra o oxidante, es de colores muy oscuros, tiene aspecto poroso, morfología irregular, cúbica y de fractura puntiaguda.

A continuación comienza la fase de afino, con la finalidad de obtener un metal de bajo contenido en oxígeno y eliminar la mayor parte del azufre.

El líquido fundido alimenta al horno de afino (también llamado hornocuchara) y se cubre inmediatamente con una escoria reductora, formada por tres partes de cal, una de espato-flúor y una de coke o grafito.

En esta etapa se consigue la desoxidación del líquido fundido, por simple contacto del mismo con la escoria fuertemente reductora. El líquido tiende a oxidar la escoria y ésta a desoxidar el líquido fundido, por lo que en ese momento la mayor preocupación del encargado del afino es la de mantener la escoria reductora añadiendo el carbono en polvo necesario, ya que supone una buena garantía de la correcta desoxidación del líquido fundido.

La desoxidación definitiva del acero se consigue cuando se añaden ferroaleaciones de silicio y manganeso. Conviene añadir primero el manganeso y luego el silicio. Así se consigue formar en el baño metálico partículas líquidas, primero de óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO_2) que tienen tendencia a cohesionarse entre sí dando lugar a partículas de que suben a la escoria.

Paralelamente a esta etapa se produce la desulfuración. Su finalidad es minimizar la presencia de azufre en el acero, ya que éste hace que los cristales de hierro pierdan cohesión. La desulfuración se da en presencia de una cantidad suficiente de óxido de calcio y carbón.

Antes de colar el líquido fundido se vuelve a desescoriar, eliminando la escoria blanca.

En el caso de fabricación de aceros aleados se procederá al ajuste de otros parámetros como nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, carbono, etc, en función de las especificaciones del acero a fabricar.

En general, se calcula que aproximadamente por cada tonelada de acero se generan de 110 a 150 kg de escoria negra y de 20 a 30 kg de escoria blanca.

A continuación se muestra un esquema del proceso de fabricación:

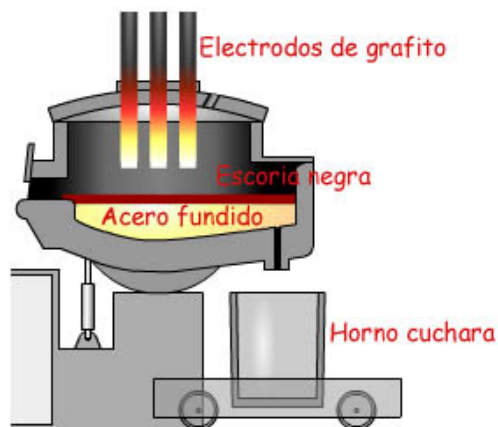


Figura 1.- Horno de arco eléctrico y horno de afinado

3.2.- CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

3.2.1.- CARACTERIZACIÓN FÍSICA

En la bibliografía consultada, los distintos autores coinciden en citar las siguientes características físicas y mecánicas como las principales propiedades a ser evaluadas en los áridos:

- Densidad.
- Forma.
- Resistencia a la fragmentación.
- Resistencia a compresión.
- Absorción de agua.
- Resistencia a los ciclos de hielo- deshielo.
- Estabilidad volumétrica.
- Resistencia a la abrasión.

De modo general, las escorias de acería presentan elevada masa específica, forma angular, textura superficial áspera, gran dureza y absorción de agua media. En relación a su uso como árido, presentan buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión.

De hecho, al comparar el árido siderúrgico con el convencional se observa que el primero tiene un comportamiento semejante o superior a los áridos de roca granítica.

Propiedad	Árido siderúrgico	Árido granítico
Masa específica (g/cm ³)	3,5	2,5
Forma (% de partículas alargadas)	< 10	< 10
Resistencia al impacto (%/masa)	18	12
Absorción de agua (%/masa)	0,7	0,5
Resistencia al hielo-deshielo (%/masa)	< 0,5	< 0,5
Adhesividad a matriz (%)	> 90	> 90

Tabla 1.- Propiedades físicas de la escoria

Mirando este cuadro se ve como claramente como el árido siderúrgico de horno de arco eléctrico, una vez madurado y tratado constituye una alternativa de calidad a los áridos convencionales.

Cabe recordar que para cada colada de acero producida en una factoría de horno de arco eléctrico, se originan dos tipos de escoria distintos. En el horno de fusión se produce lo que se denomina escoria negra u oxidante, mientras que en el horno de refinado se produce lo que se conoce como escoria blanca o reductora.

A la escoria negra tiene propiedades mucho más resistentes que a la blanca y un color gris muy oscuro, casi negro. En cambio la escoria blanca es de color blanquecino, pulverulenta y se disgrega al tocarla.



Figura 2.- Aspecto de la escoria negra



Figura 3.- Aspecto de la escoria blanca, con impurezas de hierro y escoria negra

Como la escoria blanca se produce en el proceso de afino, posterior al de fusión, puede contener impurezas de escoria negra que se hayan movilizado con el vertido del caldo de acero del horno de fusión al de cuchara.

En el siguiente apartado se abordarán las diferencias entre ambos tipos de escoria desde un punto de vista químico.

3.2.2.- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

Escorias siderúrgicas procedentes de distintas acerías de horno de arco eléctrico poseen características comparables en lo que se refiere a caracterización química y mineralógica, a pesar de sus heterogeneidades. Las principales diferencias vienen dadas por la utilización de dolomita frente a cal, lo que produce un aumento del valor de MgO en la escoria.

Mientras que los valores de CaO dependen básicamente de la cantidad de cal adicionada en el proceso, los valores de MgO dependen fundamentalmente de la utilización de dolomita y de las interacciones entre la escoria y el revestimiento refractario del horno, hecho de un material rico en MgO. La disolución de refractario en la escoria lleva a un aumento del valor de MgO, perjudicando su calidad. Esta tasa de disolución depende básicamente de las características químicas de la escoria, la composición química y porosidad del refractario y de la temperatura de operación. En cuanto a las características químicas de la escoria se ha observado que cuánto menor es la relación CaO/SiO₂ mayor es la tasa de disolución de MgO.

Además la composición de la escoria también puede depender del tipo de acero que se esté fabricando.

A continuación se presentan los valores típicos de la composición química de un árido siderúrgico de horno de arco eléctrico según referencias encontradas de varios países.

País	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)
Japón	40	4	25	5	19	7	-	0,006
Suecia	46	5	11	5	28	4	0,7	-
EEUU	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
Alemania	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
Brasil	33	10	18	6	30	5	-	-
Italia	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
Cataluña*	31	5	14	9	27	4	0,35	-
Horquilla	31-46	4-10	11-25	4-9	18-31	4-7	0,35-1,4	0,006-0,2

*A título orientativo, según informe nº 151_15 de la Sección de Materiales de la Construcción de la UPC, realizado sobre árido siderúrgico 0/ 25 de la factoría de Celsa en Castellbisbal.

Tabla 2.- Caracterización química de la escoria

Tipo de escoria	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Fe _{tot} (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	CaO _{libre} (%)
Escoria negra	25-40	10-17	18-30	2-15	3-10	5-7	0-1,5	0-3	< 3
Escoria blanca	51,0	27,0	1,5	7,0	9,0	1,0	-	-	-

Tabla 3.- Diferencias químicas entre la escoria negra y blanca

La composición mineralógica también puede ser bastante variable. Las fases presentes en la escoria enfriada y la cantidad relativa entre las mismas dependen básicamente del proceso de producción de acero y del sistema de enfriamiento a que se somete la escoria.

Mineralógicamente, las escorias de acería consisten principalmente en silicatos de calcio, ferritas y óxidos metálicos. En general las principales fases mineralógicas presentes en las escorias de acería son el silicato dicálcico (larnita – β -C₂S), la ferrita dicálcica (C₂F), y la wusita (óxido de hierro – FeO).

Además de estas fases, también son minerales comunes la olivina (Mg₂SiO₄), mervinita (Ca₃Mg(SiO₄)₂), silicato tricálcico (C₃S), millerita marrón (CA₄AF), óxido de calcio libre (CaO) y óxido de magnesio libre (MgO).

Además, dentro de una misma factoría también puede darse cierta heterogeneidad en la escoria resultante según la colada de acero que se produzca en ese momento.

Actualmente en la factoría de Celsa en Castellbisbal se realizan seis tipos de carga de horno de fusión distintos, que vienen determinados por la utilización de una mezcla de cinco clases de chatarra y arrabio en distinta medida.

3.3.- EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA DE LA ESCORIA DE ACERO DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

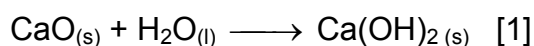
3.3.1.- ORIGEN QUÍMICO DE LA EXPANSIVIDAD VOLUMÉTRICA

Como se ha venido comentando la escoria siderúrgica al salir del horno requiere de un tratamiento que modifique sus características para que las propiedades técnicas sean plenamente satisfactorias. La concienciación sobre este aspecto a nivel mundial, hace que las posibilidades de uso del árido siderúrgico estén aumentando.

La utilización masiva de la escoria siderúrgica como material para la construcción pasa por acotar su estabilidad volumétrica.

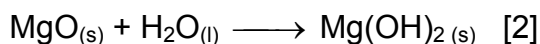
La estabilidad está asociada principalmente a la hidratación de la cal libre (CaO) y la magnesia (MgO), además de a la corrosión y oxidación del hierro metálico residual, la transformación de fase del silicato dicálcico y la carbonatación del hidróxido cálcico. Estas reacciones son responsables de un considerable aumento de volumen en relación a las dimensiones originales del cristal.

El óxido de calcio libre (CaO) presente en la escoria de acería constituye un factor de inestabilidad volumétrica por su transformación en hidróxido de calcio, que puede causar expansión al mismo tiempo que disgregación del material. El proceso de hidratación de este material se da según la siguiente ecuación química:



Donde los subíndices indican el estado físico del compuesto: s=sólido, l=líquido.

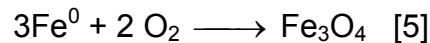
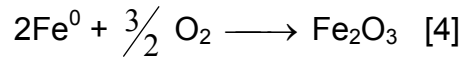
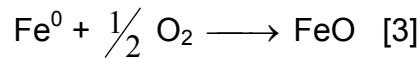
La utilización de cal dolomítica y el desgaste del revestimiento refractario del horno en el proceso de refinado del acero, son responsables de la presencia de óxido magnésico o magnesia (MgO) en la escoria. Este compuesto, en presencia de humedad se hidrata lentamente formando hidróxido de magnesio o brucita (Mg(OH)₂), conforme la ecuación:



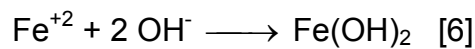
Si la magnesia (MgO) aparece químicamente combinada en solución sólida en combinación con otros elementos, en general no presenta comportamiento inestable.

La mayor parte de la expansividad volumétrica ocurre a corto plazo debido a las reacciones de hidratación del óxido de calcio, fenómeno rápido comparado con la hidratación de la magnesia (MgO), que se hidrata lentamente y se observa a más largo plazo.

La escoria de acería de horno de arco eléctrico posee en su composición una gran cantidad de partículas de hierro. El hierro metálico (Fe^0) después de sufrir procesos de corrosión y oxidación puede aparecer en forma de iones Fe^{+2} y Fe^{+3} , siendo estos los estados de corrosión y oxidación más comunes. Las principales ecuaciones de oxidación son las siguientes:



Y las de corrosión son:



El aumento de volumen del hierro debido a estas reacciones, conforme Mehta y Monteiro (1994), es el que se observa en la siguiente figura:

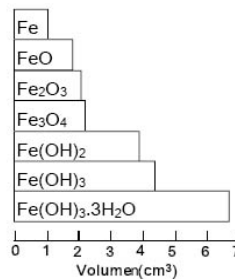


Figura 4.- Aumento de volumen del hierro en función del estado de oxidación

El silicato dicálcico o C_2S (donde $\text{C} = \text{CaO}$ y $\text{S} = \text{SiO}_2$) también contribuye al fenómeno de la estabilidad volumétrica de la escoria, ya que la forma β (larnita) a través de reacciones de hidratación puede pasar a la fase γ , lo que produce un aumento de volumen. Pero cabe decir que la mayor parte de la larnita no desarrolla este cambio de fase y tiene una importante contribución a la resistencia del material.

El hidróxido de calcio (portlandita) puede dar lugar a reacciones de carbonatación y formación carbonato cálcico, creando depósitos ricos en calcio junto a la superficie de los granos. Esto ocasiona una variación volumétrica poco importante, que por otra parte ayuda a estabilizar los hidróxidos. Dicha reacción sigue la siguiente ecuación química:



El carbonato cálcico es también el principal constituyente de la tufa, un precipitado que puede afectar a las salidas de los sistemas de drenaje.

Por otro lado, los procesos de envejecimiento asociados a la carbonatación juegan un papel muy positivo en el uso del árido siderúrgico porque ayudan a estabilizar ciertas especies químicas como el bario, reduciendo su valor en los lixiviados.

El grado de envejecimiento de una escoria viene determinado principalmente por la hidratación y la carbonatación.

En resumen, la expansividad de las escorias de acería es resultado del proceso de hidratación del óxido de calcio libre y del óxido de magnesio reactivo. Además también pueden causar reacciones expansivas la transformación de fase del β -silicato dicálcico, los procesos de corrosión y oxidación del hierro, y la carbonatación del hidróxido cálcico.

La siguiente tabla recoge las distintas especies químicas, parámetros y mecanismos, por los cuales se produce la expansividad.

Especies químicas	Parámetros que influyen en la expansión	Mecanismo
CaO, MgO y C ₂ S	↑ Valor de la especie en estado libre ↑ Humedad ↑ Temperatura ↑ Valor de CO ₂ ↓ Tamaño de los granos de escoria	Hidratación
Fe ⁰ , Fe ⁺² y Fe ⁺³	↑ Valor de Fe ⁰ ↑ Humedad ↑ Tiempo de exposición al aire ↓ Valor de oxígeno en el enfriamiento ↓ Tamaño de los granos de escoria	Corrosión y oxidación
Ca(OH) ₂	↑ Valor de CO ₂ ↑ Humedad ↑ Temperatura ↓ Tamaño de los granos de escoria	Carbonatación

Tabla 4.- Resumen de los factores que actúan sobre la estabilidad volumétrica

3.3.2.- CLASIFICACIÓN DE LA ESCORIAS DE ACERÍA SEGÚN SU POTENCIAL EXPANSIVO. NORMAS UNE Y PG-3.

La normativa UNE contempla dos clasificaciones distintas de la escoria de acería según su potencial expansivo, en función de la aplicación que se le quiera dar.

Así pues, en áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carretera, aeropuertos y otras áreas pavimentadas prescribe la normativa UNE 146130, mientras que en áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes, lo hace la UNE-EN 13242.

La UNE-EN 146130 clasifica las escorias en:

Tipo de escoria de acería	Expansión máxima (% en volumen)	Duración del ensayo (h)	Categoría
ECO ¹ /EHEA ² (MgO ³ ≤5%)	≤ 3,5	24	A
ECO/EHEA (MgO>5%)	≤ 3,5	168	
ECO/EHEA (MgO≤5%)	≤ 6,5	24	B
ECO/EHEA (MgO>5%)	≤ 6,5	168	
ECO/EHEA (MgO≤5%)	≤ 10	24	C
ECO/EHEA (MgO>5%)	≤ 10	168	

¹ ECO: Escoria de convertidor al oxígeno

² EHEA: Escoria de horno eléctrico de arco

³ A los efectos de determinar la duración del ensayo de estabilidad de volumen, se considerarán aceptables los valores del contenido de MgO de la escoria declarados por el fabricante de la misma.

La determinación del contenido en MgO de la escoria se realizará según el procedimiento descrito en la norma UNE 80127.

El contenido total de MgO se utiliza como medida del MgO libre debido a la ausencia de un método fiable para la determinación de éste. Cuando se desarrollase un método adecuado, se redefinirán los valores en función del contenido en MgO libre.

Tabla 5.- Clasificación de las escorias por su potencial expansivo, según la norma UNE-EN 146130

Por otra parte, la clasificación que establece la UNE-EN 13242 es la siguiente:

Tipo de árido siderúrgico	Expansión máxima (% volumen)	Categoría (V)
Árido siderúrgico procedente de: - Acería de convertidor de oxígeno - Acería de horno eléctrico de arco	≤ 5	V ₅
	≤ 7,5	V _{7,5}
	≤ 10	V ₁₀
	> 10	V _{Declarado}
	Sin requeritos	V _{NR}

NOTA 1.- Si el contenido en MgO determinado según la norma EN 196-2 es igual o menor al 5%, la duración del ensayo debería ser 24 h. Si el contenido en MgO es superior al 5%, la duración del ensayo debería ser 168 h.

NOTA 2.- El contenido total en MgO se emplea como medida del MgO libre, a falta, por el momento, de un método fiable para determinar el contenido en MgO libre. Si se desarrollase un método fiable, los tipos de escoria deberían ser definidos de nuevo en términos de su contenido en términos de MgO libre. Los valores declarados de MgO por los fabricantes de acero podrán ser aceptados para su utilización en la determinación del tiempo de ensayo de las escorias de acero.

Tabla 6.- Clasificación de las escorias por su potencial expansivo, según la norma UNE-EN 13242

En esta tabla se aprecia una diferenciación del tiempo de ensayo en función del contenido en MgO de la escoria de horno de arco eléctrico, lo que no se contempla en la UNE-EN 1744-1 de *ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos*, ya que en ella se especifica que para escorias de acerías de horno de arco eléctrico, el ensayo durará siempre 168 horas.

El PG-3, en su artículo 510 referente a *zahorras*, prescribe que el árido siderúrgico de acería deberá presentar una expansividad inferior al cinco por ciento según la UNE-EN 1744-1. La duración del ensayo nuevamente queda fijada en 24 horas cuando el contenido de óxido de magnesio, según la UNE-EN 196-2, sea menor o igual al cinco por ciento y de 168 horas en los demás casos, pero además establece que los áridos no deberán ser susceptibles de ningún tipo de alteración físico-química bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo.

Además el mismo artículo limita el uso a las categorías de tráfico T2 a T4 y expresa que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

La misma filosofía se recoge en el artículo 542 de *mezclas bituminosas en caliente* del PG-3, pero en él no se hace referencia a limitaciones según categoría de tráfico ni al ensayo de estabilidad volumétrica UNE-EN 1744-1.

3.3.3.- MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LA ESCORIA SIDERÚRGICA DE ACERO DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO A NIVEL MUNDIAL

A lo largo de los años se han ido desarrollado diversos métodos de tratamiento de la escoria de acería de horno de arco eléctrico que para promover la estabilización volumétrica de la escoria, entre los cuales según Mancio (2001) destacan los siguientes:

- Envejecimiento de la escoria estocada en pilas expuestas a la intemperie durante un cierto periodo de tiempo, con el objetivo de hidratar el CaO y el MgO libres, formando hidróxidos. En algunos casos se esparce agua sobre las pilas con el fin de acelerar la hidratación del MgO.
- Envejecimiento acelerado de la escoria a través de la cura al vapor. Este tipo de aceleración del proceso de envejecimiento está siendo muy usado con éxito por algunas siderúrgicas japonesas, aunque supone un aumento muy significativo de los costes de curado.
- Tratamiento de la escoria líquida a través de la adición de materiales silicosos e inyección de oxígeno, en una cuchara de escoria separada del proceso de fabricación de acero, de modo que este tratamiento no influya para nada en la calidad del acero producido.

Adicionando arena y oxígeno a la escoria líquida se genera un calor adicional que mantiene la escoria líquida y disuelve la arena. En consecuencia la relación CaO/SiO_2 se reduce y la cal libre reacciona químicamente estabilizándose. Además se ha constatado que el MgO libre reacciona de modo semejante al de la CaO libre.

La composición química de la escoria también puede ser alterada a través de la adición de fragmentos de vidrio en combinación con la inyección de oxígeno.

- Separación de la escoria blanca procedente del horno de afino (que típicamente posee valores más elevados de óxidos hidratables), del resto de escoria, procedente del horno de fusión (escoria negra) y someterla a un estricto control de calidad que evite la presencia de materiales de desecho (refractario, madera, etc.) en el producto final.

MORINO e IWATSUKI (1999) analizaron escorias oxidantes (negras) de acería de horno de arco eléctrico sometida a tres sistemas diferentes de enfriamiento: rápido (solidificación de la escoria a través de chorros de aire), semi-rápido (aspersión de agua sobre la escoria cuando esta estaba a 800 °C), y lento (vertido de escoria al aire y enfriamiento a velocidad natural). En todas las muestras analizadas, no se observaron diferencias significativas entre los valores de CaO y MgO libre.

A pesar de esto, hay ensayos de expansividad realizados con escorias de acería eléctrica sometida a diferentes sistemas de enfriamiento que verifican que a igual edad, las escorias de acería sometidas a un enfriamiento rápido (a través de la solidificación en agua) se muestran volumétricamente más estables que aquellas que se han dejado enfriar lentamente al aire.

A nivel mundial, cabe destacar el avanzado estado de la legislación alemana, japonesa, belga y pensilvana en los requisitos exigidos para garantizar la estabilidad volumétrica del material, que son los siguientes:

Especificación	Alemania	Japón	Bélgica	Pensilvania	Cataluña
CaO libre máximo	No	No	≤ 4,5%	No	No
Envejecimiento al aire libre	No	≥ 3 meses	12 meses	> 6 meses	No
Ensayo de expansividad	Si	Si	Si	Si	Si
Materiales de desecho	Si	No	No	No	No

Tabla 7.- Especificaciones normativas sobre el tratamiento de la escoria a nivel internacional

En la tabla anterior se observa que el ensayo acelerado de expansividad es de aplicación en todos los países, aunque la ejecución de éste varía según las normativas de cada lugar. También se aprecia que sólo Bélgica establece un límite máximo en el contenido de CaO libre.

A pesar de que el envejecimiento al aire libre es el método de envejecimiento históricamente más utilizado, no existe un consenso en cuanto al tiempo de cura necesario para estabilizar la escoria, si no al contrario. Son exigidos periodos de estocaje que varían entre 0 y 12 meses, la

heterogeneidad de la escoria y la variabilidad de las condiciones climáticas de un país a otro, hace que sea muy difícil fijar un tiempo.

Además, cabe resaltar que el periodo de envejecimiento puede variar considerablemente en función de otros factores, tales como: composición química de la escoria, dimensiones de las pilas de estocaje, temperatura, humedad relativa del aire e índice pluviométrico local.

La elección de uno de los métodos de tratamiento generalmente depende de varios factores, tales como aspectos operacionales, inversiones necesarias, plazos para la estabilización y requisitos a ser atendidos en cuanto a la estabilidad volumétrica.