



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

PROPUESTA DE USO DE LA ESCORIA DE ACERACION

(ESCORIA DE HORNO BÁSICO DE OXIGENO Y ESCORIA DE HORNO DE
ARCO ELÉCTRICO)

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O Q U Í M I C O
P R E S E N T A

JOSÉ ALEJANDRO AGUILAR DINORÍN

ASESOR:

DR. ALEJANDRO ROGEL RAMÍREZ



MÉXICO D.F. SEPTIEMBRE 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/018/08

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: AGUILAR DINORIN JOSÉ ALEJANDRO
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. Eduardo Loyo Arnaud
VOCAL	Dr. Alejandro Rogel Ramirez
SECRETARIO	I. Q. Rene de la Mora Medina
SUPLENTE	I. Q. Delfino Galicia Ramirez
SUPLENTE	M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D. F., a 26 de Mayo de 2008
JEFA DE LA CARRERA

I. B. Q. HILDA OLIVERA DEL VALLE



DEDICATORIA

En honor a la única persona en el mundo que siempre está dispuesta a apoyarme en cualquier decisión que tome, a esa persona que confió en mí y sobre todo que nunca perdió la fe en mí, en mis ideales; y que a pesar de todas las circunstancias adversas siempre salió adelante con un solo propósito, darle lo mejor a sus hijos.

Este trabajo lo dedico de con todo mi amor a mi **mamá** porque ella ha sido la base en mi andar por esta vida que a veces se torna dura, por todo su amor incondicional, su comprensión y por todo lo que me enseñaste y me seguirás enseñando.

No sé como describir cuan agradecido estoy contigo mamá y con la vida que me han dado tanto, y solo te puedo decir que te **amo mamá** con todo mi corazón y muchas gracias por ser mi mamá...

“El amor intenta entender, convencer, vivificar. Por este motivo, el que **ama** se transforma constantemente. **Capta** mas, **observa** mas, es más **productivo**, es mas **el mismo**” ERICH FROM

AGRADECIMIENTOS

A la vida por darme todas las cualidades para terminar este trabajo que no es más que el principio de una nueva etapa en mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a su facultad de estudios superiores Zaragoza, por darme una formación profesional invaluable.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM y en especial al laboratorio de geotecnia por facilitarme el equipo necesario para la realización de la parte experimental de este trabajo.

A Adriana Núñez Austria por su constante apoyo y amor que es fuente de mi inspiración.

Al Dr. Alejandro Rogel Ramírez por brindarme la confianza para la realización de esta tesis.

A él I.Q. Eduardo Loyo Arnaud, a él I.Q. Rene de la Mora Medina, a él I.Q. Delfino Galicia Ramírez y a la M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle por sus oportunos comentarios para la elaboración de esta tesis.

A todos los compañeros y amigos por todos los momentos que compartimos, jugando, peleando y compartiendo conocimientos y sobre todo por esa amistad que existe entre nosotros.

Y a todas las personas que voluntariamente o involuntariamente ayudaron a que este humilde servidor pudiera ser una persona de bien.

INDICE

	PAGINA
RESUMEN	I
JUSTIFICACION Y OBJETIVOS	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CAPITULO I GENERALIDADES	
1. Introducción	2
1.1 Panorama mundial del acero	2
1.1.1 Situación nacional del acero	5
1.2 Procesos de producción de acero	5
1.2.1 Alto horno	7
1.2.2 Horno Básico de Oxígeno	8
1.2.3 Horno de Arco Eléctrico	9
1.3 Obtención de la escoria	10
1.4 Usos de la escoria	11
CAPITULO II PRODUCCIÓN DE ESCORIAS	
2. Introducción	14
2.1 Proceso del alto horno	14
2.1.2 Escorias del alto horno	19
2.1.3 Usos de la escoria de alto horno	19
2.2 Proceso del Horno Básico de Oxígeno	20
2.3 Proceso del Horno de Arco Eléctrico	29
2.3.2 Escorias del Horno de Arco Eléctrico y Escorias del Horno Básico de Oxígeno	38

2.3.3 Usos de la escoria del Horno de Arco Eléctrico y del Horno Básico de Oxígeno	38
--	----

CAPITULO III CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS

3. Introducción	40
3.1 Propiedades físicas y factores que las determinan	41
3.1.1 Procesos de solidificación y curados de escorias	42
3.2 Propiedades químicas y Factores que la determinan	48
3.2.1 Métodos y estándares para caracterización de escorias.	59

CAPITULO IV Propuesta de uso de escoria (parte experimental)

4. Introducción	61
4.1 Agregados asfálticos	61
4.2 Propiedades físicas y químicas requeridas	61
4.2.1 Tamaño de partícula y graduación de los agregados	62
4.2.2 Resistencia al desgaste	66
4.2.3 Durabilidad o resistencia al intemperismo acelerado	67
4.2.4 Densidad relativa	69
4.2.5 Estabilidad química de los agregados	71
4.2.6 Otras propiedades de los agregados	72
4.3 Proceso para mejora de escorias	72
4.4 Demanda de escoria para este uso	73

Conclusiones y sugerencias

Bibliografía

Glosario

LISTA DE TABLAS	PÁGINA
TABLA 1.1 Producción mundial de acero	3
TABLA 2.1 Composición y temperatura de carga al Horno Básico de Oxígeno	21
TABLA 2.2 Componentes de la escoria de Horno de Arco Eléctrico	35
TABLA 3.1 Índice de actividad de las escorias	51
TABLA 3.2 Composición de la escoria de alto horno	53
TABLA 3.3 Composición de la escoria de Horno Básico de Oxígeno	60
TABLA 4.1 Resultados de la prueba de los Ángeles	67
TABLA 4.2 Resultados de la prueba de intemperismo acelerado	68
TABLA 4.3 Resultados de la prueba de densidad relativa	70
LISTA DE FIGURAS	
FIGURA 1.1 Producción mundial de acero	4
FIGURA 2.1 Alto horno	18
FIGURA 2.2: vista esquemática de un Horno Básico de Oxígeno	22
FIGURA 2.3: velocidades de reacción para reacciones de oxidación en el Horno Básico de Oxígeno	24
FIGURA 2.4: reacciones al impacto del chorro de oxígeno en convertidores soplados por arriba	26
FIGURA 2.5: reacciones al impacto del chorro de oxígeno en convertidores soplados por el fondo	27
FIGURA 2.6 Horno básico de Oxígeno	28
FIGURA 2.7 Retiro de los electrodos	29
FIGURA 2.8 Carga del horno	30
FIGURA 2.9 Horno cargado	30

FIGURA 2.10 Electrodo formado el arco	31
FIGURA 2.11 Retiro de la escoria	35
FIGURA 2.12 Retiro del acero fundido	36
FIGURA 2.13 Horno de Arco Eléctrico	37
FIGURA 3.1 Diagrama ternario SiO_2 , Al_2O_3 y CaO	51
FIGURA 3.2 Efecto de la temperatura sobre la extensión del dominio de escorias líquidas en el sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-2\% P}_2\text{O}_5\text{-1.5\%Al}_2\text{O}_3\text{-3\%MnO-5\%MgO}$ a 1600, 1650 y 1700 °C.	54
FIGURA 3.3 Evolución de la escoria durante el soplado	57
FIGURA 3.4 Cambios en la composición del metal fundido durante el soplado	55
FIGURA 3.5 Cambios en la composición de la escoria durante el soplado	55
FIGURA 3.6: Variación de la acidez de la escoria	58
FIGURA 4.1 Gráfica de granulometría	62
FIGURA 4.2 Gráfica de granulometría experimental	63
FIGURA 4.3 curva granulométrica para carpetas asfálticas con un tránsito esperado de un millón de ejes equivalentes o menor	64
FIGURA 4.4 curva granulométrica para carpetas asfálticas con un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes	65
FIGURA 4.5 Máquina de los Ángeles	66
FIGURA 4.6 Usos de agregados en Canadá	73

RESUMEN

El presente trabajo describe un procedimiento para la utilización de los materiales de desecho producidos en el Horno de Arco Eléctrico y Horno Básico de Oxígeno, como la escoria durante el proceso de producción de acero.

El papel de las escorias tiene una gran importancia en la fabricación de acero, el régimen de escoria, el que se determina por su cantidad, composición y propiedades, ejerce una gran influencia en la calidad del acero terminado, la estabilidad del revestimiento y el rendimiento metálico.

La idea central es procurar que las características fisicoquímicas de las escorias producidas en el Horno Arco Eléctrico y Horno Básico de Oxígeno sean tales que se puedan utilizar en la elaboración de superficies de rodamiento o como agregados asfálticos. Por otro lado, la composición química y la capacidad espumante tienen repercusiones directas en la vida del material refractario, el desgaste de los electrodos y la eficiencia energética global del proceso.

La presente propuesta pretende establecer sistemas apropiados para la preparación y elaboración de superficies de rodamiento y agregados asfálticos, para obtener una composición óptima de la escoria, de modo que pueda ser utilizada. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es proporcionar un método para la utilización de escorias de horno de arco eléctrico y horno básico de oxígeno.

La utilización de las escorias del Alto Horno y Horno Básico de Oxígeno ha tenido aplicaciones en la construcción de edificios y carreteras desde hace más de cien años. El punto de partida para el desarrollo de las escoria ha sido sus propiedades físico-químicas. El uso de escoria de acero en forma de agregados se considera una práctica normal en muchas jurisdicciones de los EUA, con aplicaciones que incluyen su utilización en la bases y sub-bases, superficies de carreteras y en la mezcla de asfalto caliente.

Basados en los procedimientos N-CMT-4-04/03 que determina la Secretaría de Comunicaciones y Transportes se realizaron pruebas para determinar la escoria de acero cumple con las características o requisitos de un agregado asfáltico y de no cumplir con dichas características acondicionar la escoria para ajustarla a dichos requerimientos.

JUSTIFICACION

En México cerca del 60% del total de la producción de acero (en el año 2004 cerca de 15 millones de toneladas por año) es procesado en hornos de arco eléctrico.⁽²²⁾

En el proceso especial del acero en un horno de arco eléctrico cerca de 65 a 80Kg., de escoria de acero es producida en una tonelada de acero crudo. De 97,500 a 1,200,000 de toneladas de escoria de acero por año. Se han hecho esfuerzos por desarrollar tecnologías que hagan uso de esta escoria, para disponer de los espacios físicos ocupados por los patios de escoria, disminuir los riesgos de deslave de los montones de la misma y coadyuvar a la eficiencia global del proceso de aceración.

Este problema se presenta actualmente en México y en particular en la compañía de acero Arcelor Mittal (antes Sicartsa). Considerando la gran cantidad de escoria que se produce al año en México y tomando en cuenta que solo reducen el espacio de la planta al almacenar la escoria; se trata de que las escorias de acero tengan un valor agregado utilizándolas en procesos industriales; tema que la presente investigación desarrolla. Y analizar si es técnicamente posible que las escorias de aceración producidas en México tengan las aplicaciones que en otros países tiene la escoria de acero.

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Se propone un uso a la escoria de aceración.

OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Caracterizar las escorias de aceración producidas en nuestro país.
- ❖ Analizar los posibles usos de escoria de aceración en México.
- ❖ Proponer un procedimiento para el uso de escoria de aceración.

HIPOTESIS

Si la escoria de la industria del acero cumple con los requerimientos técnicos de calidad establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de materiales pétreos para mezclas asfálticas, la escoria de acero se puede utilizar en superficies de rodamiento y/o en agregados asfálticos.

CAPITULO UNO

GENERALIDADES

**1.
Introducción**

**1.1
Panorama
mundial
del
acero**

**1.1.1
Situación
nacional
del
acero**

**1.2
Procesos
de
producción
de acero**

**1.2.1 Alto
horno**

**1.2.2 Horno
Basico de
oxigeno**

**1.2.3 Horno
de Arco
Electrico**

**1.3
Obtención
de la
escoria**

**1.4
Usos
de la
escoria**



1. INTRODUCCIÓN

El hierro en estado puro no posee la resistencia y dureza necesarias para las aplicaciones de uso común. Sin embargo, cuando se combina con pequeñas cantidades de carbono se obtiene un metal denominado acero, cuyas propiedades varían en función de su contenido en carbono y de otros elementos en aleación, tales como el manganeso, el cromo, el silicio o el aluminio, entre otros.

El acero se puede obtener a partir de dos materias

primas fundamentales:

1. El arrabio

El arrabio es el producido en un alto horno y es obtenido a partir de mineral de hierro (proceso integral). En líneas generales, para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno

2. La chatarra

Las chatarras férricas son obtenidas a partir de desechos y residuos de acero y hierro, estas condicionan el proceso de fabricación. En líneas generales, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza exclusivamente el horno de arco eléctrico (proceso electro-siderúrgico).

1.1 Panorama mundial del acero.

El IISI calcula que la producción de acero bruto mensual para sus 67 países fue de 1,322 millones de toneladas en 2007, un 7.3% más que en el año 2006 con un total de 1,232 millones de toneladas. Sin embargo, China representó el 37% de este total, y el total excluyendo a China aumentó en sólo 3.2% en comparación con 2006. En diciembre la producción de acero bruto de los 67 países aumentó un 5% a 110.6 millones de toneladas. El IISI estima que la producción de acero bruto al año para 100 países que fue 1343 millones de toneladas en 2007, con todas las regiones que muestran un aumento de la producción.

El comercio de acero en el 2007 es probable que exceda de 410 millones de toneladas, de los que cerca del 17% de las exportaciones chinas son de poco menos de 69 millones de toneladas. Con base en los once primeros meses Japón es el segundo mayor exportador en 33 millones de toneladas, mientras

que Alemania, a 27.7 millones, es sólo por delante de Ucrania en 27.4 millones, seguido de Rusia en 27.1 millones. El mayor importador de acero en el mundo sigue siendo Estados Unidos seguido por Alemania y Corea del Sur.⁽¹⁰⁾

LUGAR	PAIS	PRODUCCION EN 2007 (MILLONES DE TON)
1	CHINA	489
2	JAPON	120.2
3	EUA	97.2
4	RUSIA	72.2
5	INDIA	53.1
6	COREA DEL SUR	51.4
7	ALEMANIA	48.6
8	UCRANIA	42.8
9	BRASIL	33.8
10	ITALIA	32
11	TURQUIA	25.8
12	TAIWAN	20.5
13	FRANCIA	19.3
14	ESPAÑA	19.1
15	MEXICO	17.2
16	CANADA	16.7
17	REUNO UNIDO	14.3
18	POLONIA	10.7
19	BELGICA	10.7
20	IRAN	10.1
21	SUDAFRICA	9.1
22	EGIPTO	6.2
23	MALASIA	6.1
24	TAILANDIA	5.5
25	ARGENTINA	5.4
26	VENEZUELA	5
27	KAZAJASTAN	4.8
28	ARABIA SAUDITA	4.6
29	CHILE	1.7
30	SERBIA Y MONTENEGRO	1.5
31	COLOMBIA	1.3
32	SUECIA	1.3

TABLA 1.1 PRINCIPALES PAISES PRODUCTORES DE ACERO. FUENTE INTERNATIONAL IRON & STEEL INSTITUTE

PRODUCCION MUNDIAL DE ACERO 2007



PAISES PRODUCTORES

TABLA 1.1 GRAFICA DE PAISES PRODUCTORES DE ACERO FUENTE INTERNACIONAL IRON & STEEL INSTITUTE

1.1.1 Situación nacional del acero.

La producción de acero en México será este 2008 de 17.8 millones de toneladas, 3.6% mayor respecto a 2007, estimó el vocero de la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (Canacero).

"Este año vamos a tener un crecimiento de alrededor de 3.6%, esperemos que el mercado este fuerte, hay grandes expectativas sobre todo por los planes de construcción e infraestructura que ha anunciado el gobierno federal". El líder empresarial sostuvo que en los próximos cinco años la industria siderúrgica del país invertirá unos 4.000 millones de dólares para ampliar su planta productiva.

Este año los precios del acero se mantendrán al alza debida al aumento en los insumos del sector.

"Para el 2008 la producción estará sobre 17.8 millones de toneladas, y la demanda va a ser alrededor de 26 millones de toneladas".

Por otro lado consideró que "las importaciones estarán cercanas a las 9 millones de toneladas, vamos a tener crecimiento de importaciones, sobre todo de aceros especiales que no se producen en México para la industria automotriz".

Los sectores que más impulsarán la demanda acerera en 2008 serán la construcción, el sector automotriz y todo lo relacionado con la infraestructura, carreteras, puertos, aeropuertos y electrodomésticos.

El directivo expresó que la desaceleración norteamericana va a hacer un dólar más débil y eso impulsará las exportaciones de México a Estados Unidos.⁽⁷⁾

1.2 PROCESOS DE PRODUCCION DE ACERO.

El hierro se obtiene a partir del producto de alto horno, el arrabio líquido, en los convertidores o en otros hornos que trabajan con carga líquida dentro de la misma instalación industrial. El arrabio, lingote de horno alto o lingote de hierro, pues de estas maneras suele denominarse, es frágil y poco resistente. Su composición, que es distinta según la procedencia del mineral de hierro, está constituida por un elevado tanto por ciento de carbono (4-5%) y otras impurezas como azufre, fósforo, silicio, manganeso, etc. Se transforma en acero mediante un proceso de descarburación y regulación de las otras impurezas.

Desde el punto de vista químico-metalúrgico, todos los procesos de fabricación de acero se pueden clasificar en ácidos y básicos (según el refractario y composición de la escoria utilizada), y cada proceso tiene funciones específicas según el tipo de afino que puede efectuar. Los procesos ácidos utilizan

refractarios de sílice, y por las condiciones de trabajo del proceso hay que poder formar escorias que se saturen de sílice. Los procesos ácidos pueden utilizarse para eliminar carbono, manganeso y silicio; no son aptos para disminuir el contenido en fósforo y azufre, y por esto requieren el consumo de materias primas seleccionadas, cuyo contenido en fósforo y azufre cumple las especificaciones del acero final que se desea obtener. Los procesos básicos utilizan refractarios de magnesita y dolomía en las partes del horno que están en contacto con la escoria fundida y el metal. La escoria que se forma es de bajo contenido de sílice compensada con la cantidad necesaria de cal. El proceso básico elimina, de manera tan eficaz como el proceso ácido, el carbono, manganeso y silicio, pero además eliminan el fósforo y apreciables contenidos de azufre. De aquí las grandes ventajas del proceso básico, por su gran flexibilidad por consumir diversas materias primas que contengan fósforo y azufre, y por los tipos y calidades de acero que con él se pueden obtener.

En la fabricación de acero existen las fases hierro, escoria y gases. Este sistema heterogéneo tiende a un estado de equilibrio si se adicionan unos elementos reaccionantes o varía la temperatura o la presión. Al fabricar un acero se pretende eliminar de la fase hierro los elementos perjudiciales en acceso y añadir los que faltan para conseguir el análisis final previsto. Por las reacciones reversibles entre las tres fases (hierro, escoria y gases) se consigue, al producirse un desequilibrio, la segregación o paso de elementos, eliminar del hierro la escoria, o viceversa. Es necesario un profundo conocimiento de estas reacciones para fabricar un acero con buen resultado. Todo el proceso de obtención de acero consta de un primer período oxidante o de afino, en el que se elimina el Carbono en fase gaseosa; el silicio y el manganeso se oxidan formando compuestos complejos con la escoria, que puede eliminarse; si la escoria es además básica, se elimina el fósforo. El segundo período es reductor y debe eliminar el exceso de óxido de hierro disuelto en el baño del hierro durante el período oxidante, a fin de poder eliminar después el azufre; o puede también recuperar el manganeso oxidado que pasó a la escoria. Finalmente, hay un período de desoxidación o refino por acción de las ferro-aleaciones de manganeso y silicio, que se adicionan en el baño a la cuchara, y de aluminio metálico, en la lingotera. Estos períodos pueden tener mayor o menor duración e importancia y realizarse netamente separados o entrelazados, y a mayor o menor velocidad en unos procesos que en otros. El proceso de vaciado de escoria puede ser total o parcial en cada período, o transformar las primeras escorias oxidantes en reductoras. Todo ello dependerá del horno o proceso utilizado, de las condiciones de las materias primas, de los elementos que interesa que pasen a la escoria y no retornen de ésta al baño de hierro, etc. Desde el punto de vista tecnológico existen tres tipos fundamentales de procesos:

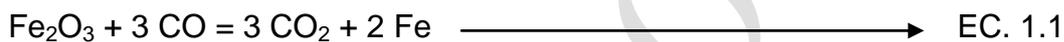
- Alto horno
- Horno básico de oxígeno (BOF).
- Horno de arco eléctrico (AEF).

1.2.1 ALTO HORNO

Cualquier proceso de producción de acero a partir del arrabio consiste en quemar el exceso de carbono y otras impurezas presentes en el hierro.

Una dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1.400°C aproximadamente, que impide utilizar combustibles y hornos convencionales.

Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son mineral de hierro, coque y caliza. El coque se quema como combustible para calentar el horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. La ecuación de la reacción química fundamental de un alto horno es:



La caliza de la carga del horno se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico. El silicato de calcio y otras impurezas forman una escoria que flota sobre el metal fundido en la parte inferior del horno. El arrabio producido en los altos hornos tiene la siguiente composición: un 92% de hierro, un 3 o 4% de carbono, entre 0,5 y 3% de silicio, del 0,25% al 2,5% de manganeso, del 0,04 al 2% de fósforo y algunas partículas de azufre.

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el hierro se sangra cinco veces al día.

El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una temperatura comprendida entre los 550 y los 900 °C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros con estructuras de ladrillo refractario. El ladrillo se calienta durante varias horas quemando gas de alto horno, que son los gases de escape que salen de la parte superior del horno. Después se apaga la llama y se hace pasar el aire a presión por la estufa. El peso del aire empleado en un alto horno supera el peso total de las demás materias primas.

El proceso de sangrado consiste en retirar a golpes un tapón de arcilla del orificio del hierro cercano al fondo del horno y dejar que el metal fundido fluya por un canal cubierto de arcilla y caiga a un depósito metálico forrado de ladrillo, que puede ser una cuchara o una vagoneta capaz de contener hasta 100 toneladas de metal. Cualquier escoria o sobrante que salga del horno junto con el metal se elimina antes de llegar al recipiente. A continuación, el contenedor lleno de arrabio se transporta a la fábrica siderúrgica.

Los altos hornos modernos funcionan en combinación con hornos básicos de oxígeno, y a veces con hornos de crisol abierto, más antiguos, como parte de una única planta siderúrgica. En esas plantas, los hornos siderúrgicos se cargan con arrabio. El metal fundido procedente de diversos altos hornos puede mezclarse en una gran cuchara antes de convertirlo en acero con el fin de minimizar el efecto de posibles irregularidades de alguno de los hornos.

La inyección de aire precalentado a 1,000 °C, aproximadamente, facilita la combustión del coque, generando elevadas temperaturas y gases reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, transformándolos en arrabio (hierro líquido) y en escoria, respectivamente.

En general los altos hornos tienen un diámetro mayor a 8 m y llegan a tener una altura superior de los 60 m. Están revestidos de refractario de alta calidad.

Los altos hornos pueden producir entre 800 y 1,600 toneladas de arrabio cada 24 h. La caliza, el coque y el mineral de hierro se introducen por la parte superior del horno por medio de vagones que son volteados en una tolva. Para producir 1000 toneladas de arrabio, se necesitan 2,000 toneladas de mineral de hierro, 800 toneladas de coque, 500 toneladas de piedra caliza y 4,000 toneladas de aire caliente.

El arrabio es recibido en carros torpedo para ser transportado a la Acería de Convertidores al Oxígeno; la escoria, separada del arrabio por su menor densidad, se hace fluir hacia un foso donde es "apagada" y granulada por un chorro de agua.⁽²⁸⁾

1.2.2 HORNO BASICO DE OXIGENO

Este proceso en periodo relativamente corto obtuvo una difusión extraordinariamente alta en todos los países, debido al elevado rendimiento, reduciendo gasto para su construcción, una gran flexibilidad y alta calidad del producto.

El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con chatarra de acero fría (cerca de un 25%) y luego con hierro derretido, después de ser devuelto a su posición vertical, se hace descender hacia la carga una lanza de oxígeno refrigerada por agua y se fuerza sobre ella un flujo de oxígeno puro a alta

velocidad durante 20 minutos. Este actúa como fuente de calor y para la oxidación de las impurezas.

Tan pronto como el chorro de oxígeno comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximada de 1,650° C. El oxígeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria.

Después de haberse completado la inyección de oxígeno, se analiza el contenido de carbono y la composición química de diversas muestras de la masa fundida. Cuando la composición es correcta, el horno se inclina para verter el acero fundido en una olla de colada.

Aunque se pueden producir algunos aceros de aleación con este proceso, el ciclo de tiempo aumenta considerablemente, eliminando así su ventaja principal. Consecuentemente, el proceso de oxígeno básico, como el del hogar abierto, se emplea generalmente para producir altos tonelajes de acero con un bajo nivel de carbono, que son los de mayor consumo. Estos aceros con bajo nivel de carbono se utilizan para barras, perfiles y planchas gruesas y delgadas.⁽²⁸⁾

1.2.3 HORNO DE ARCO ELECTRICICO

Es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. No solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1,930°C, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión. Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas. El resultado es un acero más limpio.

Consecuentemente, puede producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidable y aceros especiales para los cuales se emplea principalmente. Otra ventaja sobre el Horno de Oxígeno Básico es que puede operar con grandes cargas de chatarra y sin hierro fundido.

El Horno de Arco Eléctrico se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada. El arrabio fundido se emplea raramente. Si la carga de chatarra es muy baja en carbono, se agrega coque (el cual es casi puro carbono) o electrodos de carbono de desecho, para aumentar así su nivel.

Los hornos de arco eléctrico funcionan con tres electrodos de grafito los que pueden llegar a tener 760mm de diámetro y longitud de hasta 12m. La mayoría de los hornos operan a 40V y la corriente eléctrica es de 12,000A.

Estos equipos tienen un crisol o cuerpo de placa de acero forrado con refractario y su bóveda es de refractario también sostenida por un aro de acero, por lo regular enfriado con agua. Para la carga del horno los electrodos y la bóveda se mueven dejando descubierto al crisol, en el que se deposita la carga por medio de una grúa viajera.

Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos. La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente.

Para acelerar la remoción del carbono, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de un tubo o lanza. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes.

Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada. Este horno puede producir una hornada de acero en un período de dos a seis horas, dependiendo del horno individual.⁽²⁸⁾

1.3 OBTENCION DE LA ESCORIA.

En la industria del acero, dos principales tipos de escoria son producidos la del alto horno y la escoria de acero. La escoria es un subproducto del proceso de elaboración de acero. El hierro no se puede producir en un alto horno sin producir escoria de alto horno. Del mismo modo no se puede producir acero en un horno básico de oxígeno o en un horno de arco eléctrico sin producir escoria de acero. Debido a sus singulares propiedades físicas y químicas como en usos de aplicaciones finales, es importante diferenciar la escoria de acero y la escoria del alto horno.

Las escorias de acero se han utilizado comercialmente por lo menos desde mediados del siglo XIX. En la actualidad se utiliza en todos los países industrializados, donde se produce el acero. Comenzando en el siglo XX, muchos de los nuevos usos de la escoria de acero se han desarrollado en una variedad de industrias. Las fábricas de acero y procesadores de escoria trabajan en estrecha colaboración para garantizar que las escorias de acero

siguen siendo un producto de alta calidad para las actuales y futuras aplicaciones.

Los rangos de producción de escoria de BF oscila entre unos 220 a 370 kilogramos por tonelada de arrabio producido, y los minerales de menor calidad puede producir mayor fracciones de escoria. Sobre la base de datos de producción 1997, unos 13 millones de toneladas de escoria de BF fueron producidas en los Estados Unidos. La escoria de BOF y EAF comerciable es de un 10 a 15 por ciento en peso de salida de acero.^x En Estados Unidos la producción de escoria de (BOF / EAF) en 1997 ascendió a unos 17 millones de toneladas. En 1997, la escoria de hierro y acero consume un total de aproximadamente 21.4 Millones de toneladas con un valor de unos 147 millones de dólares. De este total, la escoria de BF representaban aproximadamente el 65 por ciento del tonelaje y tuvo un valor de alrededor de \$118 millones. Las escorias de acero se consideran para el resto.⁽²⁷⁾

^x Una parte de la escoria de acero que se genera es arrastrada en el acero que, en general, se recupera y regresa al horno.

1.4 USOS DE LA ESCORIA

La forma física de las partículas de escoria es crucial para su valor como un producto. Las partículas de la escoria tienden a ser cúbicas con superficies que permiten que las partículas de la escoria se entrelacen. En consecuencia, la escoria de acero es mucho más estable que otros en la formación de los agregados. Proporciona una excelente adherencia en el concreto asfáltico, y forma una mejora a la resistencia de materiales en la carretera de forma espectacular. La escoria es muy estable cuando está mojada, impide la formación de hielo, no tiene problemas de superficies irregulares comunes a otros agregados, y es fácilmente compactada.⁽¹⁹⁾

Principales usos de la escoria de acero



Como lastre del Ferrocarril



Concreto y agregados como ingredientes en el cemento



Agregados antideslizantes (para el control total de nieve y hielo)

Como bases y sub-bases



Relleno granular, como los de estacionamiento sin pavimentar y áreas de almacenamiento. Tuberías y tanque de relleno.



Usos agrícolas, como la re-mineralización y acondicionamiento del suelo, suplemento de pH. Fertilizantes



Neutralización de las minas de drenaje y de la gestión industrial



Como material pétreo para agregados asfálticos.

CAPITULO DOS

PRODUCCION DE ESCORIAS

4. INTRODUCCIÓN

2.1 PROCESO DEL ALTO HORNO

2.1.1 ESCORIAS DE ALTO HORNO

2.1.2 USOS DE ESCORIA DE ALTO HORNO

2.2 PROCESO DEL HORNO BASICO DE OXIGENO

2.3 PROCESO DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO

2.3.1 ESCORIAS DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y ESCORIAS DEL HORNO BÁSICO DE OXIGENO

2.3.2 USOS DE LA ESCORIA DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y DEL HORNO BÁSICO DE OXIGENO

2. INTRODUCCION

Tecnología relacionada con la producción del hierro y sus aleaciones, en especial las que contienen un pequeño porcentaje de carbono, que constituyen los diferentes tipos de acero. A veces, las diferencias entre las distintas clases de hierro y acero resultan confusas por la nomenclatura empleada. En general, el acero es una aleación de hierro y carbono a la que suelen añadirse otros elementos. Algunas aleaciones denominadas 'hierros' contienen más carbono que algunos aceros comerciales. El hierro de hogar abierto y el hierro forjado contienen un porcentaje de carbono de sólo unas centésimas. Los distintos tipos de acero contienen entre el 0.04 y el 2.25% de carbono. El hierro colado, el hierro colado maleable y el arrabio contienen entre un 2 y un 4% de carbono. Hay una forma especial de hierro maleable que no contiene casi carbono alguno. Para fabricar aleaciones de hierro y acero se emplea un tipo especial de aleaciones de hierro denominadas ferroaleaciones, que contienen entre un 20 y un 80% del elemento de aleación, que puede ser manganeso, silicio o cromo. Los procesos para obtener hierro y acero se describen a continuación.

2.1 ALTO HORNO

PROCESO DEL ALTO HORNO

En el funcionamiento de un alto horno tienen lugar dos flujos continuos a contracorriente. De arriba hacia abajo desciende el mineral de hierro, coque, fundentes, y de abajo hacia arriba se mueven los productos de combustión del coque y el aire caliente. Al descender, el coque es calentado por los gases ascendentes, y al ponerse en contacto con el aire de la parte inferior del horno se quema de acuerdo con la siguiente reacción:



Cuando se efectúa el proceso de combustión del coque, la temperatura se eleva de 1600°C hasta aproximadamente 1750°C. El bióxido de carbono que se forma, entra en reacción con nuevas capas del coque calentado al rojo, reduciéndose a monóxido de carbono según la reacción:



La mezcla gaseosa calentada, compuesta del monóxido de carbono, bióxido de carbono y el nitrógeno del aire, asciende, y entrando en contacto con los materiales de carga que descienden los calienta ininterrumpidamente, obteniéndose en diferentes partes del horno las zonas de temperatura correspondientes. En la zona del tragante y en la parte superior de la cuba el mineral introducido se seca, apareciendo en él grietas. En la parte media e inferior, a temperaturas que oscilan entre 40-900°C, el monóxido de carbono, actuando sobre el mineral, contribuye a la reducción gradual del hierro según las reacciones:



Como reductor del hierro actúa también el carbono sólido, el que se forma como resultado de la descomposición del CO según la reacción:



La reducción del hierro por el carbono se realiza según la siguiente reacción:



Los granos reducidos de hierro empiezan a soldarse, creando pedazos pequeños de hierro esponjoso. En la zona del etalaje con temperaturas aproximadas a 1100 a 1200°C se reducen el manganeso, silicio y fósforo que se disuelven en el hierro. El mecanismo de la reducción del fósforo y su disolución en el hierro líquido será explicado posteriormente. Paralelamente se verifica la saturación del hierro según la reacción:



El carburo de hierro formado, así como el carbono sólido se disuelven en el hierro esponjoso, el cual, a medida que se satura, se convierte en hierro fundido. En el hierro también se disuelven las combinaciones sulfúricas del mineral y del coque. La disolución de carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre en el hierro se llama hierro fundido. En la zona del etalaje aparecen gotas de hierro fundido que caen gradualmente en el crisol. El mineral contiene ganga. Esta es bastante refractaria, es decir, funde a una temperatura muy alta. Para rebajar la temperatura de fusión de la ganga se introduce caliza en la carga. La caliza, poniéndose en interacción (fundándose), forman escoria con la ganga. En las escorias se disuelve una parte de las impurezas perjudiciales (sulfúricas, fosfóricas) y la ceniza. Las escorias con un gran contenido de SiO₂ se llaman ácidas y con un contenido elevado de CaO, básicas. Las escorias muy básicas contribuyen a una eliminación considerable de azufre en el hierro fundido. Las escorias, lo mismo que el hierro fundido, caen en gotas en la parte inferior del alto horno.

El hierro se sangra unas seis veces al día. Para sangrar el hierro fundido se interrumpe el suministro de aire y se abre la piquera. Este sale del horno por canales y se vierte en grandes cucharas revestidas (recipientes del metal) que se llaman también "mixer", por medio de las cuales el hierro fundido se transporta en estado líquido a la planta de aceración y el resto se vierte en máquinas especiales para obtener bloques.

PARTES IMPORTANTES DE UN ALTO HORNO:

Tragante: es la zona más alta del horno y cuenta con un sistema de carga para alimentar las materias primas al proceso, además a través de esta zona salen los gases y polvos como producto de las reacciones que se efectúan en el interior del reactor.

Cuba: Comienza inmediatamente después de la zona del tragante, tiene la forma de un cono truncado ensanchado hacia abajo y sirve para calentar las materias primas usadas, tales como: mineral de hierro, coque metalúrgico y caliza. Esta parte del alto horno tiene esta forma para evitar que el material se atasque en el descenso a las zonas más bajas del reactor.

Vientre es una zona de transición suave entre la zona ancha de la cuba y el etalaje. Es la parte más ancha del horno, tiene forma cilíndrica y sirve para evitar un Angulo obtuso en la unión de estas dos zonas, lo cual traería como resultado el atascamiento de los materiales sólidos.

Etalaje: tiene la forma de un cono truncado invertido debido a que en esta zona se realiza una reducción drástica del volumen de los materiales de carga, ocasionado principalmente por la combustión del coque y el paso del estado sólido al estado líquido de los productos de la fusión. Es decir, esta forma se justifica debido a la contracción que sufren los materiales al pasar del estado sólido al líquido.

Crisol: es la parte más baja del horno y sirve como receptor de los productos de la fusión en estado líquido. La parte inferior de este crisol es de forma cilíndrica y recibe el nombre de solera. Al nivel de la solera se encuentra el orificio llamado piquera, el cual sirve para descargar el metal en estado líquido. Un poco más arriba se encuentra el orificio llamado bigotera de escoria, que como su nombre lo indica, sirve para la eliminación de las escorias. En la parte superior del crisol están distribuidas por su circunferencia e 12 a 18 orificios, en los cuales encajan los aparatos de las toberas, por donde se suministra aire caliente (1200-1600K). Ocasionándose con esto que el coque incandescente se queme en esta zona, suministrándose así el calor necesario para que se efectúen las reacciones de reducción y para el calentamiento y fusión de la carga. También se alimentan hidrocarburos, ya sea en forma de gas, líquida o sólida. Estos hidrocarburos suministran cantidades adicionales de gases reductores (CO e H_2) al proceso. Los más usados son combustóleo y alquitrán. También se usa gas natural y polvo de carbón. La mampostería del horno (revestimiento) se hace de ladrillos de chamota ($=35\% \text{Al}_2\text{O}_3$, $=60\% \text{SiO}_2$).

Dentro de la camisa, a la altura del etalaje y del crisol se instalan tubos (como enfriadores), por los cuales circula a una determinada temperatura, cuya función es evitar deformaciones por las altas temperaturas que imperan en estas zonas. El aire caliente es alimentado a través de un tubo que circunda al horno, de este se ramifican unas mangas en forma de codo, las cuales están conectadas con las toberas del horno.

El calentamiento del aire que llega al alto horno a través de las toberas se realiza en recuperadores (estufas), que constan de una torre revestida con ladrillos refractarios y encerrada en una caja de acero. En el interior de la torre se encuentra la cámara de combustión y el enrejado de ladrillos. La mezcla de aire y gas de alto horno se suministra al recuperador por medio de una tubería cilíndrica. La mezcla se quema en la cámara de combustión, de donde los productos son calentados al rojo, se conducen a la cúpula para ser enviados a la atmósfera a través de la chimenea y por el enrejado. Después de calentar el enrejado (2-3 horas), se termina el suministro de la mezcla, se cierra la chimenea y por la tubería correspondiente se abastece el aire frío, el cual, al pasar por el enrejado, se calienta hasta una temperatura aproximada a 800°C y sale hacia los conductos de aire caliente que están unidos al tubo circundante del alto horno. El aire caliente se suministra durante una hora aproximadamente. El horno está asistido por alrededor de 3 a 5 recuperadores de aire que funcionan en serie, uno elabora el aire y los restantes realizan el calentamiento. ^(13,23)



FIGURA 2.1 ALTO HORNO

FUENTE: NATIONAL SLAG ASSOCIATION

2.1.2 ESCORIAS DEL ALTO HORNO.

La sociedad americana de pruebas y materiales define la escoria de alto horno como un producto no metálico consistente esencialmente de silicatos y silicatos de aluminio o calcio y otras bases, que son evolucionadas en condiciones de fundición simultáneamente con hierro en un alto horno.

2.1.3 USOS DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO

Escoria enfriada por aire

- Mayor rendimiento para todas las aplicaciones de construcción
- Mejora la resistencia y la estabilidad antideslizante en el asfalto
- Alto ángulo de fricción interna el cual se traduce en un mejor agregado
- Bajo peso unitario
- Mejora de la resistencia al fuego de mampostería y aplicaciones concretas
- Reduce los gastos de flete y costos de mano de obra debido a la menor unidad de peso
- Conveniencia física y química para la producción de lana mineral

Escoria enfriada por control de agua

- La escoria expandida de alto horno es un agregado de productos de especialidad para la industria de bloques de mampostería.
- La escoria expandida de alto horno es un agregado que posee muchas propiedades que serían deseables, como la reducción de peso, la mejora de la absorción acústica excelente y propiedades térmicas.
- La introducción de mejoras sustanciales en la eficiencia del trabajo también puede ser realizado por albañiles que puedan manejar menos unidades de peso por día.

Escoria por enfriamiento acelerado “pellets”

Además de servir como un excelente agregado para la construcción y unidades de albañilería, la escoria “pelletizada” también puede tener aplicaciones en el cemento de escoria. Las mezclas de concreto que incorporan el uso de cemento de escoria muestran la mejor factibilidad y características. También hay una notable reducción en el calor de hidratación, que puede ser importante en aplicaciones de colocación de concretos en masa. La escoria de cemento también ofrece una alta resistencia al ataque de azufre y la reacción álcali-sílice.

La escoria “pelletizada” en albañilería y estructuras de cemento ofrece ventajas en resistencia al fuego, absorción acústica, propiedades térmicas y una reducción de las cargas muertas.

Aplicaciones

- Materia prima para la fabricación de cemento de escoria.
- agregado para su uso en estructuras de cemento.

Escoria granulada

Aplicaciones generales

- Materia prima para la fabricación de cemento
- Reducción de permeabilidad de sales
- Mejora de la resistencia al ataque de sulfato
- Reducción del calor de hidratación en el concreto en masa
- Mejora de la compresión y la flexión
- Reducción de la reacción álcali-sílice⁽¹³⁾

2.2 PROCESO DEL HORNO BASICO DE OXIGENO (BOF).

En la antigüedad, el acero se producía martillando en aire el hierro sólido caliente. Los procesos modernos de acería comenzaron alrededor del año 1850 con Bessemer, quien procesó el acero soplando aire por el fondo, a través de un baño de arrabio líquido contenido en un convertidor revestido con materiales refractarios de silicio.

En 1879, Thomas introdujo el uso del revestimiento básico (dolomítico) y de un fundente básico, posibilitando así el uso del método neumático para el afino de arrabios fundidos a partir de minerales de alto contenido de fósforo comunes en muchos lugares de Europa.

La metalurgia en el convertidor LD (BOF) es el proceso más ampliamente usado para producir acero crudo a partir de arrabio líquido (metal caliente). El proceso implica el soplado de oxígeno a través del metal caliente a fin de reducir el contenido de carbono por oxidación. Existen muchos tipos diferentes de hornos, también denominados convertidores ya que son utilizados para convertir el metal caliente en acero. Los mismos son generalmente divididos en soplado por arriba, soplado por el fondo y soplado mixto.

El soplado por arriba a través de una lanza vertical fue inventado en 1952-53 por Linz y Donawitz en Austria y el proceso es conocido como LD (Linz Donawitz), o BOF (Horno Básico de Oxígeno). Los procesos de soplado por el fondo usan, además de oxígeno, hidrocarburos gaseosos (propano o gas natural) o hidrocarburos derivados de petróleo (fuel-oil) que enfrían el refractario en la zona de la tobera. Estos procesos se conocen como OBM (Soplado de Oxígeno por el Fondo Maxhütte), Q-BOP (Proceso Básico Rápido

al Oxígeno) y LWS (Loire-Wendel-Sidelor). Una de sus ventajas es una agitación metal-escoria muy eficiente a través del soplado de oxígeno.

El soplado mixto desarrollado hacia fines de la década de 1970 constituye el avance más reciente. Un soplado limitado de gas neutro (argón o nitrógeno) u oxígeno a través del fondo del recipiente de convertidores soplados por arriba brinda una agitación efectiva. Los procesos correspondientes se los conoce como LBE (Lanza Burbujeo Equilibrio), LET (Lanza Equilibrio Toberas), K-BOP (Kawasaki –Proceso Básico con Oxígeno), K-OBM (Kawasaki – Soplado de oxígeno por el fondo Maxhütte), etc.; estas facilidades ahora equipan a la mayoría de los convertidores soplados por arriba.

La desulfuración del arrabio es normalmente realizada antes de su carga en el horno. Diferentes fundentes son usados para los distintos niveles de azufre; por ejemplo: cal, carburo de calcio y magnesio.

La defosforación del arrabio fue desarrollada en Japón a principios de la década de 1980. En esta operación de tratamiento previo, la mayor parte del P es eliminada mediante el uso de fundentes oxidantes (mezclas de cal y mineral de hierro) en la cuchara de arrabio, antes de cargarlo en el convertidor.

El procesamiento en el convertidor LD (BOF) tiene por objeto afinar el metal caliente - arrabio producido en el alto horno – en acero líquido bruto, que luego podrá ser nuevamente afinado por metalurgia secundaria.

Las principales funciones del Convertidor LD (BOF) son la decarburación y la eliminación del fósforo del arrabio y la optimización de la temperatura del acero, para que cualquier otro tratamiento, previo a la colada, pueda realizarse con el mínimo recalentamiento o enfriamiento del acero.

Las reacciones exotérmicas de oxidación que ocurren durante el proceso en el convertidor LD (BOS) generan gran cantidad de energía térmica más de la necesaria para lograr la temperatura final del acero. Este calor adicional se utiliza para fundir chatarra y/o adiciones de mineral de hierro.

Las composiciones y temperaturas típicas de la carga de arrabio y del acero colado son las siguientes:

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%O	Temperatura / °C
Arrabio	4.7	0.2-0.3	0.2-1.5	0.06-0.12	0.02	0.0	1350-1400
Acero	0.05	0.1	0.0	0.01-0.02	0.01-0.02	0.06	1620-1720

TABLA 2.1: COMPOSICION Y TEMPERATURA DE CARGA AL BOF

FUENTE: UNIVERSITY STEEL

Una vez obtenido el arrabio, es transportado a la planta de aceración, donde, generalmente mediante un proceso de refinación utilizando el horno básico de oxígeno se efectúa una depuración de este material, de tal forma que por medio de una lanza situada en la parte superior del baño metálico se sopla una cantidad de oxígeno para oxidar cierta cantidad de carbono e impurezas no deseadas en el acero a producir.

Descripción del recipiente

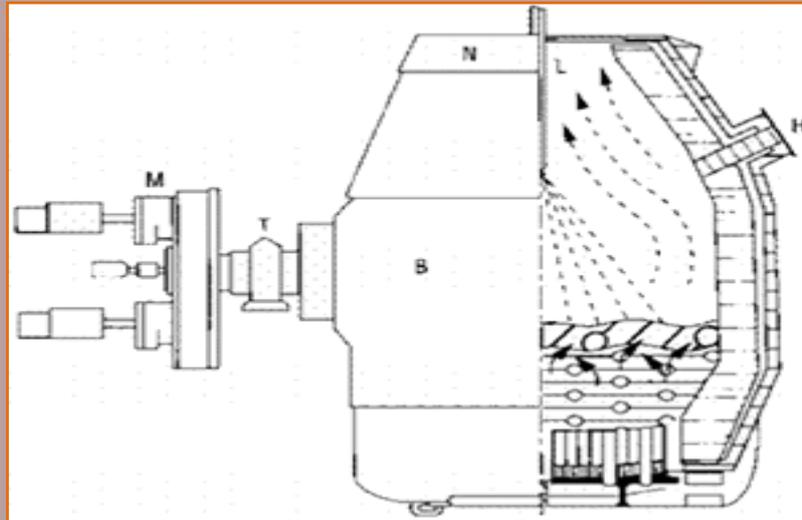


FIGURA 2.2: VISTA ESQUÉMÁTICA DE UN BOF

FUENTE: UNIVERSITY STEEL

El recipiente (reactor o convertidor) está compuesto por una carcasa de acero, revestida internamente con ladrillos refractarios (magnesita o dolomita), sostenida por un robusto anillo de acero equipado con muñones, cuyo eje es accionado por un sistema basculante o de volcado. El volumen interno del recipiente es entre 7 a 12 veces mayor que el volumen del acero a procesar, para que la mayor parte de las proyecciones de metal generadas por la inyección de oxígeno queden confinadas, conjuntamente con la escoria expandida durante los períodos de espumado.

Esta geometría típica de un convertidor muestra la nariz (N), la lanza de oxígeno (L), el anillo de muñones (B), el muñón (T), el mecanismo basculante (M), y la piqueta (H).

La capacidad típica es de 200 a 300 toneladas métricas de acero líquido y el ciclo entre colada y colada es de aproximadamente 30 minutos, con un período de soplado de oxígeno de 15 minutos.

Una lanza enfriada por agua es utilizada para inyectar una corriente de oxígeno a gran velocidad en el baño líquido. Los chorros supersónicos son producidos

con boquillas convergentes / divergentes y brindan características de penetración bien definidas y controladas, a fin de producir eficientemente las reacciones metalúrgicas deseadas y de maximizar la vida útil de la lanza (típicamente de 200 a 400 coladas). Por lo general, las puntas de lanza presentan de 3 a 5 orificios.

Antes de introducir el arrabio al horno, se pueden cargar productos escorificantes (fundentes), así como cierta cantidad de chatarra, esto se hace con la finalidad de proteger el material refractario del horno. A continuación se introduce la lanza y se comienza a inyectar oxígeno para oxidar las impurezas contenidas en el baño metálico, obteniéndose como resultado una aleación de hierro con bajo contenido de carbono llamada acero. El soplo de oxígeno también sirve para agitar el baño, dando como resultado que las impurezas contenidas en el material reaccionen más eficientemente con los materiales escorificantes y que floten más rápidamente a la superficie.^(17,14)

Las materias primas que se cargan en el convertidor son:

- "Metal caliente" líquido, arrabio proveniente del alto horno después de haberlo sometido a tratamientos específicos previos, tales como la desulfuración o la defosforación
- Otras adiciones que contienen hierro, en especial chatarra y mineral, calculadas para ajustar el balance térmico y obtener la temperatura de acero requerida
- Las adiciones necesarias para formar una escoria de composición apropiada, que incluyen, principalmente, cal (CaO) y cal dolomítica (CaO-MgO), generalmente en la forma de trozos de 20 a 40 mm
- Oxígeno puro inyectado ya sea a través de una lanza con múltiples orificios o a través de toberas en el fondo del convertidor

Una vez completada la operación de soplado, los materiales producidos son:

- Acero líquido
- Gas de escape rico en CO (entre 80 y 90%), recuperado a través de la campana extractora cerrada o de combustión suprimida y es frecuentemente usado en los quemadores de los hornos de recalentamiento
- Escoria, vaciada del recipiente después del acero

Tanto el gas como la escoria constituyen valiosos sub-productos, siempre y cuando sean adecuadamente recuperados y almacenados.

Etapas del proceso de soplado de oxígeno

Existen tres períodos de reacción típicos a considerar durante el soplado; oxidación del silicio, decarburación total y difusión del carbono. Los tres tienen mecanismos de reacción muy diferentes. En la Figura 6-1 se tiene una visión general.

Periodo de oxidacion del silicio

Durante el primer tercio (aproximadamente) del soplado la mayor parte del Si se oxida junto con algo de Fe. Una buena práctica es aumentar el contenido de FeO y obtener una buena escoria espumante al comienzo del soplado y luego estabilizarla bajando la lanza hasta que la espuma deja de subir.

Es también durante este período que la mayoría del P y del Mn se oxidan. El remanente del oxígeno suministrado reacciona con el carbono.

Periodo de decarburacion total

Bajo condiciones normales, todo el oxígeno suministrado reacciona con el carbono. Sin embargo, si la posición de la lanza es muy alta, una porción del oxígeno oxidará el Fe. Por otra parte, cuando la lanza está demasiado baja, el FeO previamente formado (y la escoria espumante) se reduce y el oxígeno liberado reacciona con el C.

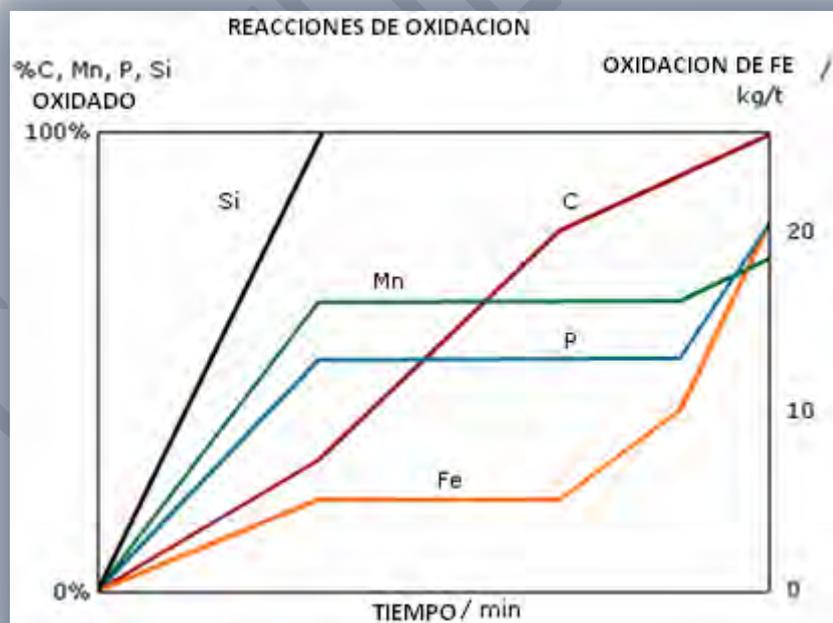


FIGURA 2.3: VELOCIDADES DE REACCIÓN PARA REACCIONES DE OXIDACIÓN EN EL BOF

FUENTE UNIVERSITY STEEL

Reacciones químicas

Las reacciones de oxidación del carbono y del silicio contenido en el arrabio son del tipo exotérmico, esto quiere decir, liberan calor, el cual sirve para mantener el baño metálico en estado líquido.

La carga de metal caliente se afina mediante reacciones rápidas de oxidación al contacto con el oxígeno inyectado, en condiciones alejadas del equilibrio termodinámico con los otros elementos presentes:



El CO es parcialmente oxidado a CO₂ por encima del metal fundido (post-combustión). Estos productos de reacción gaseosa son evacuados a través de la campana extractora. La relación CO₂/(CO+CO₂) es denominada relación de combustión secundaria (PCR). Otras reacciones de oxidación que se producen durante el proceso de afino incluyen:



Estos óxidos se combinan con los otros óxidos cargados (cal, cal dolomítica) para formar una escoria líquida que flota sobre la superficie del baño de metal

Reacciones producidas por el impacto del chorro de oxígeno en convertidores soplados por el arriba.

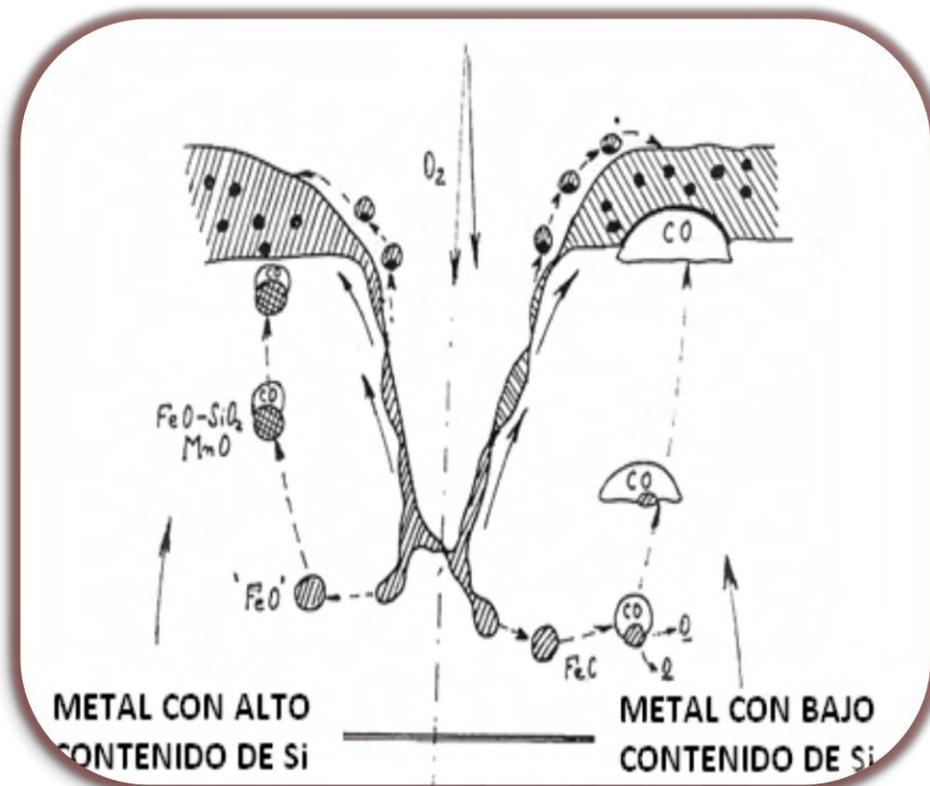


FIGURA 2.4: REACCIONES AL IMPACTO DEL CHORRO DE OXIGENO EN CONVERTIDORES SOPLADOS POR ARRIBA
FUENTE:UNIVERSITY STEEL

El diagrama muestra la competencia entre la decarburación y la oxidación del hierro ante el impacto del chorro en un convertidor soplado por arriba. Al momento del impacto, los elementos son oxidados en proporción a su contenido en el metal (Fe, C, Si, etc.). Estos productos de oxidación primaria son luego descartados, principalmente a través del metal (chorro penetrante, lanza baja) o a la escoria (soplado suave, lanza alta). Todo FeO contenido en las gotas que atraviesan el metal es reducido por el C, sólo parcialmente cuando el contenido de Si es alto (al comienzo del soplado) o cuando el contenido de carbono es bajo (al final del soplado). El FeO en gotas eyectado directamente a la escoria aumenta su contenido de FeO. Esta escoria espumante puede reaccionar violentamente ante la presencia de gotas de metal causando un "derrame".

Reacciones producidas por el impacto del chorro de oxígeno en convertidores sopladados por el fondo

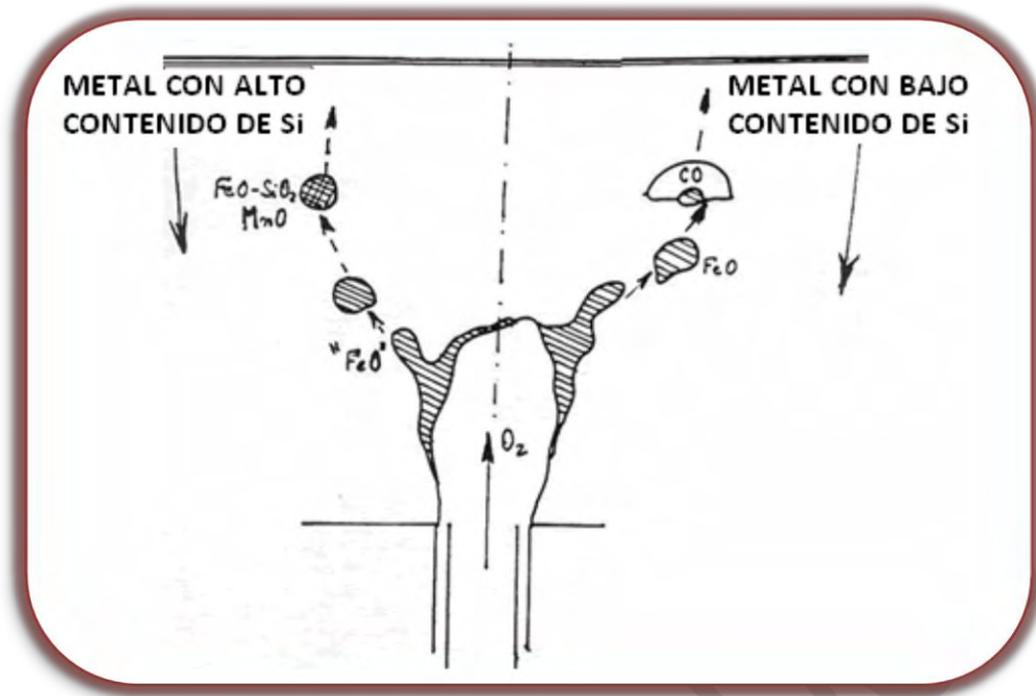


FIGURA 2.5: REACCIONES AL IMPACTO DEL CHORRO DE OXIGENO EN CONVERTIDORES SOPLADOS POR EL FONDO FUENTE:UNIVERSITY STEEL

El diagrama anterior muestra la competencia entre la decarburación y la oxidación del hierro ante el impacto del chorro en un convertidor soplado por el fondo. Al momento del impacto, los elementos son oxidados en proporción a su contenido en el metal (Fe, C, Si, etc.). Estos productos de oxidación primaria transitan por el metal y son eficazmente reducidos por el C. Sólo al final del soplado el FeO puede llegar a la escoria y acumularse en ella. Es recién en esta etapa cuando se forma una capa de escoria defosforante. Sin embargo, la eliminación del fósforo es muy efectiva debido a la fuerte mezcla metal - escoria. ^(15,29)

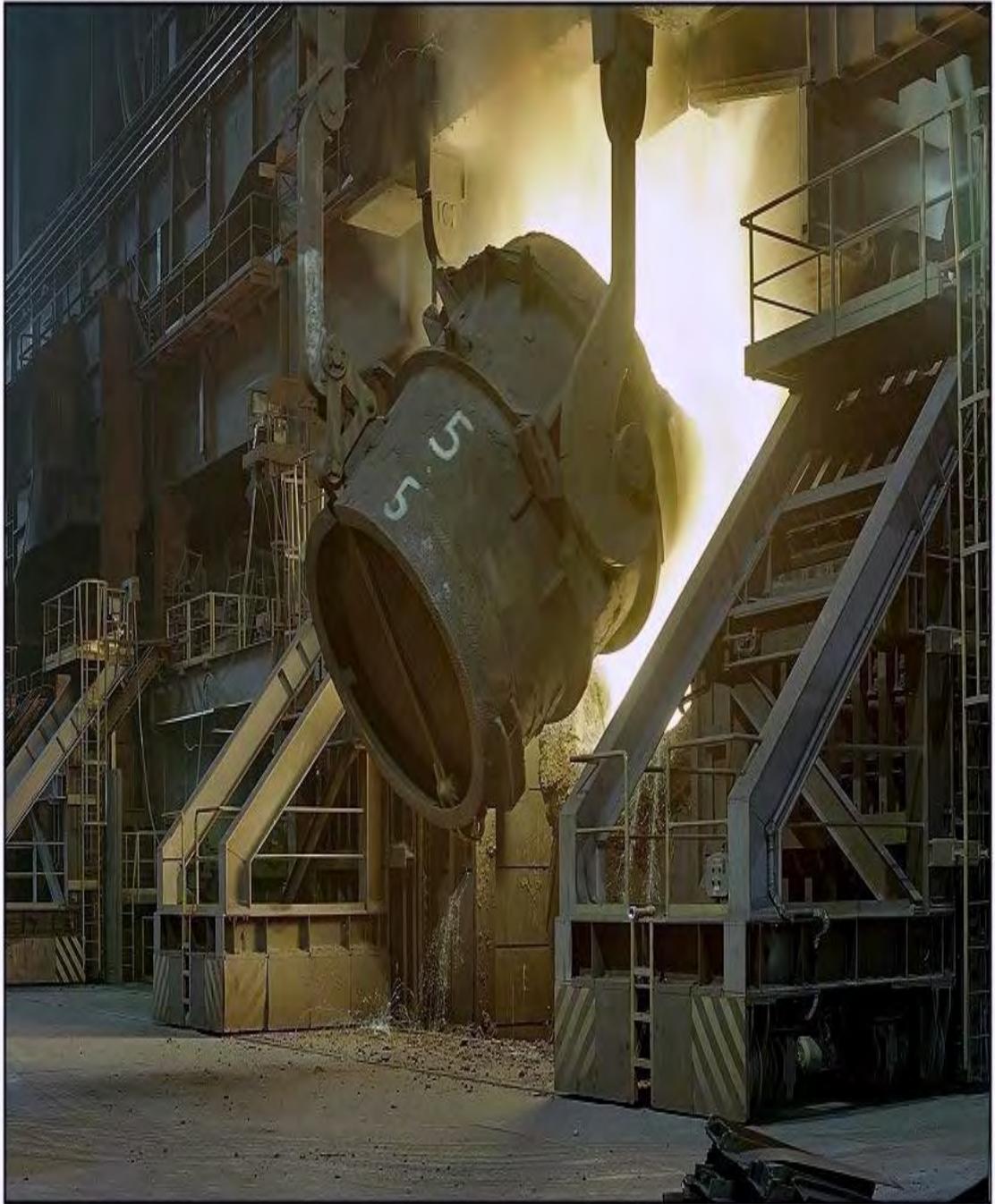


FIGURA 2.6: HORNO BASICO DE OXIGENO
(BOF)

FUENTE: BEFÜLLEN DES KONVERTERS

2.3 OPERACIONES DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO (EAF)

El horno de arco eléctrico funciona como un proceso de fundición intermitente (batch), produciendo lotes de acero fundido conocidos como calentamiento. El ciclo de operación del horno de arco eléctrico es llamado el ciclo o vaciado a vaciado (TAP-to-TAP) y se compone de las siguientes operaciones:

- Carga del horno
- Fundición
- Refinamiento
- Retiro de escoria
- Vaciado
- Girar el horno

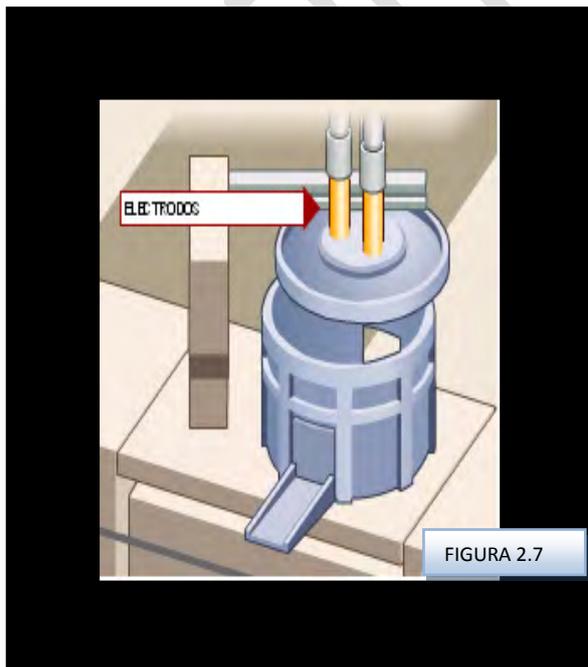
Las operaciones modernas procuran un ciclo vaciado a vaciado a un tiempo menor de 60 minutos. Algunas operaciones en hornos dobles son realizadas en el ciclo vaciado a vaciado en tiempos de 35 a 40 minutos

CARGA DEL HORNO

El primer paso en la producción de cualquier calentamiento es seleccionar el grado de acero a producir. Usualmente un horario (programa) se desarrolla antes de cada cambio de producción. Así el fundidor sabrá por adelantado un horario para su cambio. El operador del patio de desecho prepara los cubos de desecho según las necesidades de la fundición. La preparación de la carga del

cubo es una operación importante ya que aseguran no solamente la química apropiada sino también asegurar buenas condiciones de fundición.

El desecho se debe acomodar en el cubo según su tamaño y densidad para promover la rápida formación de una piscina de acero líquido en el hogar (crisol) mientras que proporciona la protección a las paredes y a la azotea (techo) contra la radiación del arco eléctrico.



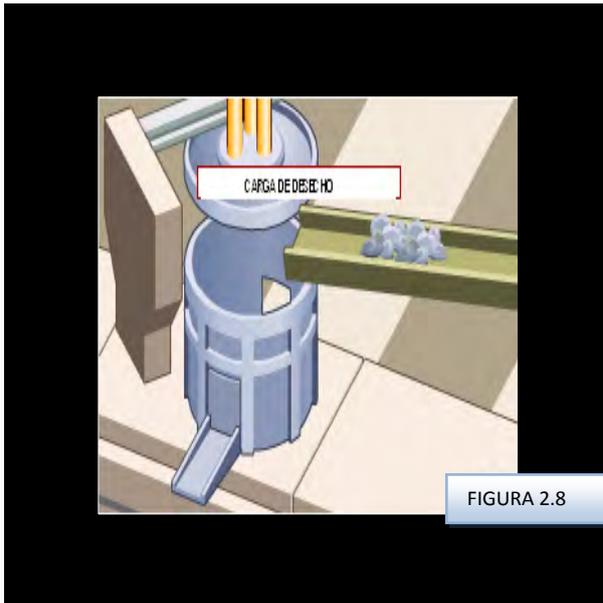


FIGURA 2.8

Otras consideraciones incluyen la minimización de los derrumbes de desecho que pueden romper los electrodos y asegurarse de que los pedazos grandes y pesados de desecho no mienten directamente frente a los puertos del quemador que darían lugar al soplo-atrasado de la flama sobre los paneles de agua fría.

La carga puede incluir la cal y el carbón o estos se pueden inyectar en el horno durante el calentamiento. Muchas operaciones agregan algo de cal y carbón en el cubo de desecho y suplen con esto la inyección.

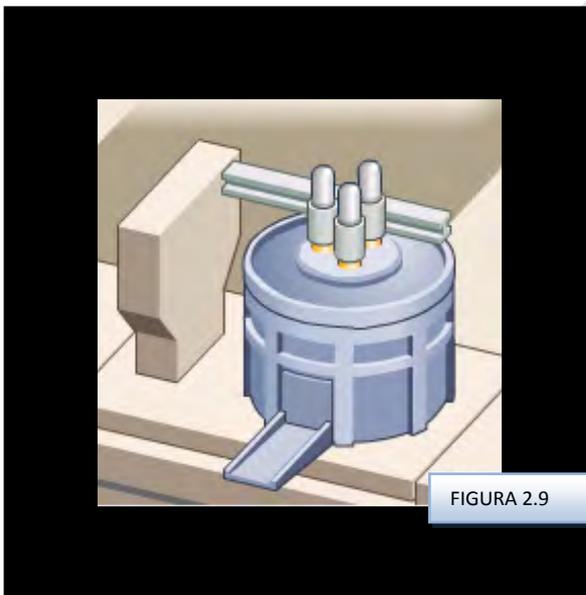
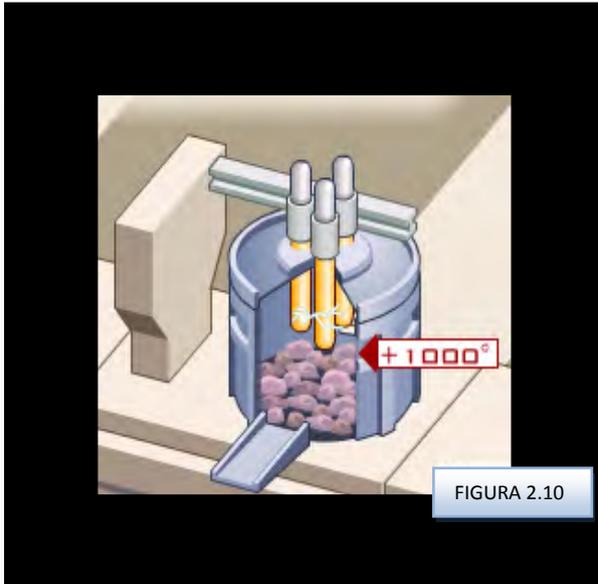


FIGURA 2.9

El primer paso en cualquier ciclo vaciado a vaciado es “cargar” el desecho. La azotea y los electrodos se levantan y se hacen pivotar al lado del horno (fig. 2.7) para permitir que la grúa de carga del desecho mueva un cubo lleno de desecho en un lugar dentro del horno (fig. 2.8). El fondo del cubo es generalmente el diseño de la cáscara de almeja, es decir, el cubo se abre

contrayendo dos segmentos en el fondo del cubo. El desecho cae en el horno y la grúa del desecho quita o remueve el cubo de desecho. La azotea es bajada y entonces los electrodos son bajados y produciendo un arco en el desecho (fig. 2.9).

Esto comienza la porción de fundición del ciclo (fig. 2.10). El numero de carga de cubos de desecho requeridas para producir un calentamiento de acero es dependiente sobre todo del volumen del horno y de la densidad del desecho. La mayoría de los hornos modernos son diseñados para operar con un mínimo respaldo de cargas (cargas en espera). Esto es ventajoso porque la carga es



un tiempo muerto donde el horno no tiene energía encendida y por lo tanto no está fundiendo. La minimización de estos tiempos muertos ayudan a la maximización de productividad del horno. Esto puede ascender a 10-20KWh/ton para cada ocurrencia.

Muchas operaciones apuntan para dos o tres cubos de desecho por calentamiento y tratar de mezclar su desecho para resolver este requisito. Algunas

operaciones alcanzan una sola carga del cubo.

FUNDICION

El periodo de fundición es el corazón de la operación del EAF. El EAF se ha desarrollado en un aparato de fundición altamente eficiente y modernos diseños se enfocan en la capacidad de fundición del EAF. La fundición es lograda dotando energía al interior del horno. Esta energía puede ser eléctrica o química. La energía eléctrica es provista a través de los electrodos de grafito y es generalmente el contribuyente más grande de operaciones de fundición. Inicialmente, se selecciona un vaciado intermedio de voltaje hasta que los electrodos perforan en el desecho. Generalmente, el desecho ligero se coloca encima de la carga que acelera la perforación hacia dentro. Aproximadamente 15% del desecho se funde durante el periodo inicial de la perforación interior. Después de algunos minutos, los electrodos habrán penetrado el desecho lo suficientemente para poder utilizar un vaciado largo del arco (alto voltaje) sin el temor del daño a la azotea por radiación. El arco largo maximiza la transferencia de energía al desecho y una piscina líquida de metal se forma en el hogar del horno. En el inicio de la fundición el arco es errático e inestable. Las oscilaciones anchas de corriente se observan acompañadas por el movimiento rápido de los electrodos. Mientras que la atmósfera del horno se calienta arriba, el arco se estabiliza y la piscina fundida es formada, el arco se convierte absolutamente estable así como los aumentos medios de energía.

La energía química es provista por varias fuentes incluyendo los quemadores del oxi-combustible y lanzas de oxígeno. Los quemadores del oxi-combustible queman el gas natural usando oxígeno o una mezcla de oxígeno y aire. El calor

es transferido al desecho por la radiación de la flama y por convección por los productos calientes de la combustión. El calor es transferido dentro del desecho por conducción. Las piezas grandes del desecho toman la fundición más larga en el baño que las piezas pequeñas. En algunas operaciones, el oxígeno se inyecta en una tubería que lanzan combustible para cortar el desecho. El oxígeno reacciona con el desecho caliente y se quema el hierro para producir un calor intenso para cortar el desecho. Una vez que una piscina fundida de acero se genere en el horno, el oxígeno puede ser lanzado directamente en el baño. Este oxígeno reaccionara con varios componentes en el baño incluyendo, el aluminio, el silicio, el manganeso, el azufre, el carbón y el hierro. Todas estas reacciones son exotérmicas (es decir, generan calor) y proveen energía adicional en la ayuda de fundición del desecho. Los óxidos metálicos que se forman terminaran arriba en la escoria. La reacción de oxígeno y carbón en el baño produce CO, el cual se quema en el horno si hay suficiente oxígeno, y se agota a través del sistema directo de evacuación donde se quema y se transporta al sistema de control de contaminación. Una vez que bastante desecho se haya fundido para acomodar la segunda carga, se repite el proceso de carga. Una vez que se funda la carga final de desecho, las paredes del horno son expuestas a la intensa radiación del arco. Como resultado el voltaje debe ser reducido. Alternativamente, la creación de espuma de escoria permitirá que el arco sea enterrado y protegerá la cáscara del horno. Además, una gran cantidad de energía será retenida en la escoria y es transferida al baño resultando mayor rendimiento energético. Una vez que la carga final del desecho es fundida totalmente, se alcanzan las condiciones planas del baño. A este punto, una temperatura del baño y una muestra serán tomadas. El análisis de el baño químico permitirá que la fundición determine la cantidad de oxígeno que se soplara durante la refinación. A este punto la fundición también puede comenzar a arreglar las adiciones del volumen del vaciado. Estas cantidades son finalizadas después de un periodo de refinación.

REFINACION

Las operaciones de refinación en el EAF han implicado tradicionalmente el retiro de azufre, fósforo, aluminio, silicio, manganeso y carbón del acero. En tiempos recientes, los gases disueltos, especialmente el hidrogeno y el nitrógeno están reconocidos como inertes. Tradicionalmente, las operaciones de refinación fueron realizadas después de la fundición, es decir, una vez que un baño plano fuera alcanzado. Estas reacciones de refinación todas son dependientes de la disponibilidad de oxígeno. El oxígeno era lanzado al final de la fundición para bajar el contenido de carbón en el baño durante la refinación. Así el oxígeno reaccionara preferentemente con estos elementos y formara óxidos los cuales flotan afuera del acero y dentro de la escoria.

En las operaciones modernas del EAF, especialmente esas operaciones con un “talón caliente” de acero fundido y retención de desecho desde el calentamiento anterior, el oxígeno se puede soplar en el baño a través de la mayoría del calentamiento. Consecuentemente, algunas operaciones de fundición y refinación ocurren simultáneamente. El fósforo y el azufre ocurren normalmente en la carga del horno en concentraciones más altas que son generalmente permitidas en acero y la mayoría son retirados. Desafortunadamente las condiciones favorables para retirar el fósforo son las contrarias para retirar el azufre. Por lo tanto una vez que estos materiales son empujados hacia dentro de la fase escoria pueden revertir nuevamente en el acero. La retención de fósforo en la escoria es una función del baño de temperatura, de la basicidad de la escoria y de los niveles de FeO en la escoria, la temperatura más alta o los niveles bajos de FeO, el fósforo revertirá desde el interior de la escoria al baño. El fósforo removido es generalmente transportado tan pronto como sea posible en el calentamiento. La práctica de un talón caliente es muy benéfica para el retiro de fósforo porque el oxígeno puede ser lanzado dentro del baño mientras su temperatura es absolutamente baja. Tempranamente en el calentamiento la escoria contendrá altos niveles de FeO transportados del calentamiento anterior que ayuda así al retiro de fósforo. La alta basicidad en la escoria (es decir, alto contenido de cal (CaO)) es también benéfica para el retiro de fósforo pero debe tener cuidado para no saturar la escoria con la cal. Esto conducirá a un incremento en la viscosidad de la escoria, que hará la escoria menos efectiva. Algunas veces el espato flúor (fosfato de calcio y flúor) es adicionada para ayudar la fluidez de la escoria. La agitación del baño con gas inerte es también benéfica porque renueva la interfase escoria/metall que mejora así la cinética de la reacción.

En general, si los niveles bajos de fósforo son un requisito para un grado de acero particular, el desecho se selecciona para dar un nivel bajo en la fundición. La relación de fósforo en la escoria a azufre en el baño se extiende desde 5 a 15. Usualmente el fósforo es reducido por 20 a 50% en el EAF. El azufre es removido principalmente como sulfito disuelto en la escoria. La relación de azufre entre la escoria y el metal es dependiente en química de la escoria y se favorece los niveles bajos de oxidación de acero. El retiro de azufre en el EAF es especialmente difícil en prácticas modernas, donde el nivel de oxidación en el baño es bastante alto. Generalmente el cociente de partición está entre 3 y 5 para operaciones del EAF. La mayoría de las operaciones encuentran más eficaz realizar la desulfuración durante el vaciado (donde se construye una escoria de aluminato de calcio) y durante la operación del horno olla. Para reducir condiciones donde el baño tienen una actividad mucho más baja con oxígeno, los cocientes de distribución para azufre de entre 20 y 100 pueden ser alcanzados.

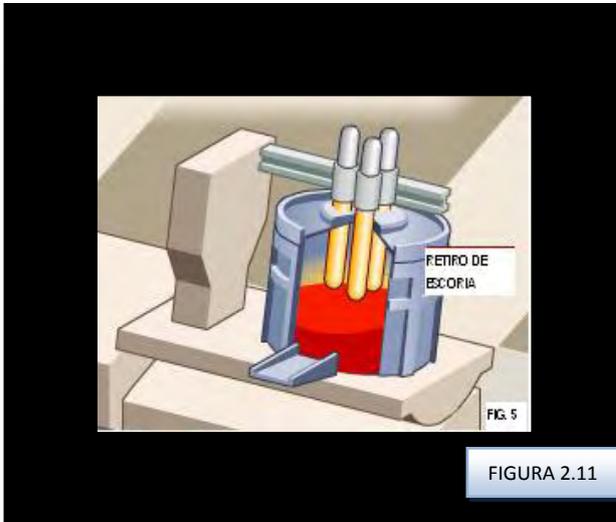
El control de componentes metálicos en el baño es importante para determinar las propiedades del producto final. Usualmente, el fundidor tendrá como objetivo niveles bajos en el baño que son especificadas para el producto final. El oxígeno reacciona con aluminio, silicio y manganeso para formar óxidos metálicos, los cuáles son componentes de la escoria. Estos metales tienden a reaccionar con oxígeno antes que el carbón. Ellos también reaccionan con FeO resultando una recuperación de unidades de hierro en el baño. Por ejemplo:
$$\text{Mn} + \text{FeO} = \text{MnO} + \text{Fe}$$
 El manganeso será bajado típicamente cerca de 0.06% en el baño.

La reacción de carbón con oxígeno en el baño que produce CO es importante ya que provee una forma menos costosa de energía en el baño, y realiza varias reacciones importantes en la refinación. En operaciones modernas del EAF la combinación de oxígeno con carbono puede proveer entre 30 y 40% de el calor neto introducido al horno. La evolución de CO es muy importante para hacer escoria espumosa. En escoria básica, las burbujas del CO son vaciadas en la escoria causando la “espuma” y ayuda a enterrar el arco. Esto da una eficacia termal mejorada grandemente y permite que el horno funcione en los altos voltajes del arco incluso después de que se haya alcanzado el baño plano. Enterrar el arco también ayuda a prevenir que el nitrógeno sea expuesto al arco donde puede disociarse y entrar en el acero. Si el CO se burbujea dentro del baño de acero, ayuda a despojar el nitrógeno y el hidrógeno del acero. El nitrógeno se encuentra en el acero hasta 50ppm en el horno antes del vaciado. El vaciado por el fondo es benéfico para mantener niveles bajos de nitrógeno porque el vaciado es rápido y se mantiene una corriente vigorosa de vaciado.

Un alto potencial de oxígeno es benéfico para bajos niveles de nitrógeno y el calentamiento debe estar abierto en comparación con el bloqueo de calor. En 1600°C, la máxima solubilidad de nitrógeno en hierro puro es 450ppm. Típicamente, los niveles de nitrógeno en el acero vaciado siguen siendo de 80-100ppm. La descarburización es benéfica también para remover el hidrógeno. La descarburización en una velocidad de 1% por hora puede bajar los niveles de hidrógeno en el acero a partir de 8ppm hasta debajo de 2ppm en 10 minutos. En el final de la refinación, se toma una medida de temperatura en el baño. Esta no es una preocupación grande en modernas prácticas de fundición donde el ajuste de la temperatura se realiza en el horno olla.

RETIRO DE LA ESCORIA

Las operaciones de retiro de escoria se realizan para remover impurezas del horno. Durante las operaciones de refinación y fundición, algunos de los



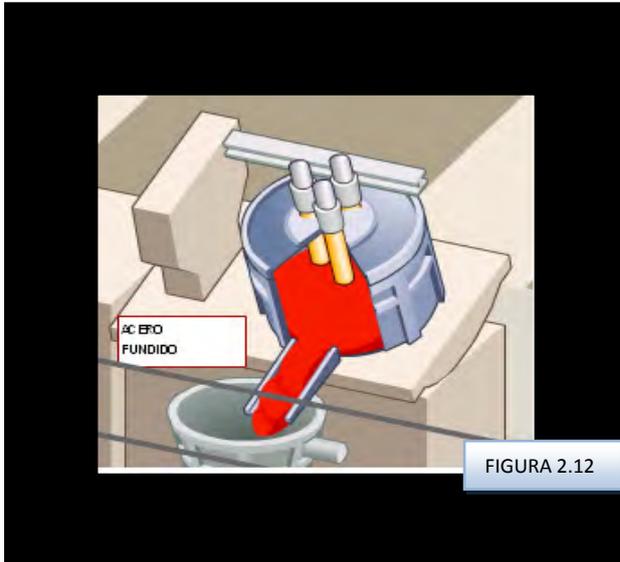
materiales indeseables dentro del baño se oxidan y se incorporan en la fase de escoria. Es ventajoso quitar tanto fósforo de la escoria tempranamente en el calentamiento como sea posible (es decir, mientras la temperatura del baño sigue siendo baja). El horno se gira al revés y la escoria se vierte fuera del horno a través de la puerta de la escoria (fig. 2.11).

El retiro de la escoria elimina la posibilidad de reversión del fósforo. Durante las operaciones de escoria espumosa, el carbón se puede inyectar dentro de la escoria donde reducirá el FeO a hierro metálico y el proceso produce CO que ayuda a la formación de escoria espumosa. Si la escoria alta en fósforo no se ha removido antes de esta operación, la reversión del fósforo ocurrirá. Durante la escoria espumosa, la escoria puede sobrepasar el nivel en el EAF y fluir fuera de la puerta de la escoria. En la siguiente tabla se muestran los componentes típicos de la escoria en el EAF.

COMPONENTE	FUENTE	RANGO DE COMPOSICION
CaO	Cargado	40-60%
SiO₂	Producto de la oxidación	5-15%
FeO	Producto de la oxidación	10-30%
MgO	Cargado como dolomítica	3-8%
CaF₂	Cargado	
	escoria fluidizada	
MnO	Producto de la oxidación	
S	Absorbido del acero	2-55
P	Producto de la oxidación	

TABLA 2.2 COMPONENTES DE LA ESCORIA DE ACERO FUENTE: AMERICAN IRON & STEEL INSTITUTE

Una vez que la composición y la temperatura deseadas del acero son alcanzadas en el horno, se abre el orificio de vaciado, el horno es inclinado, y el acero se vierte en la hoya (Fig. 2.12) para transferirlo a la siguiente operación batch (usualmente cucharón o estación de cuchareo).



Durante el proceso de vaciado de la aleación a granel se hacen adiciones basadas en el análisis del baño y el grado de acero deseado. Los de-oxidantes se pueden agregar al acero para bajar el contenido de oxígeno antes de la transformación anterior. Esto se refiere comúnmente como un “bloqueo de calentamiento” o “matando el acero”. Comúnmente los de-oxidantes son de aluminio o silicio en la forma de

ferrosilicato o silico-manganeso. La mayoría de de las operaciones de acero al carbón apuntan para la adherencia mínima de escoria. Una nueva cubierta de escoria es “construida” durante el vaciado. Para las operaciones de cuchareo del horno, una escoria del aluminato de calcio es una buena opción para el control del azufre. La cubierta en la escoria antes de la transferencia de la cuchara del horno. Adicionalmente los materiales de la escoria pueden ser agregados a la hoya del horno si la cubierta de la escoria es insuficiente.

GIRAR EL HORNO

Girar el horno es el periodo que sigue, el complemento de vaciado del horno hasta que el horno se recarga para el siguiente calentamiento. Durante este periodo se levantan los electrodos y la azotea y el revestimiento del horno se examina para determinar el daño refractario. Si es necesario se repara el hogar, la línea de escoria, el orificio de vaciado y el canalón. En el caso de un horno con fondo de vaciado, el orificio de vaciado es llenado con arena. La reparación del horno se hace usando cañones de “goneo”. En la mayoría de los hornos modernos, el uso creciente de paneles de agua fría ha reducido la cantidad de arreglar o “remachar” el horno entre calentamiento. Muchas operaciones cambian ahora el fondo del horno sobre una base regular (2 o 6 semanas) y realizan el mantenimiento del hogar lejos del proceso. Esto reduce el tiempo de encendido-apagado para el EAF y maximizando la producción del horno. El tiempo de girar el horno es generalmente el periodo de tiempo muerto

más grande en el ciclo. Con avances prácticos de horno esto se ha reducido de 20 minutos a menos de 5 minutos en algunas operaciones nuevas.⁽¹²⁾



FIGURA 2.13 HORNO DE ARCO ELECTRICO

FUENTE: WHIT ING EQUIPMENT CANADA INC .

2.3.2 ESCORIAS DEL EAF Y BOF

Las Escorias de acero son los subproductos de la transformación de hierro fundido en un determinado tipo o grado de acero. El alto horno, horno básico de oxígeno y hornos de arco eléctricos son los principales tipos de hornos utilizados en la producción de acero. Las escorias son a menudo mencionados por el tipo de horno escorias de alto horno, escorias de BOF, escorias de EAF o simplemente como "la escoria de acero" en los E.U.A.

Producir acero es un proceso por lotes; el horno es cargado con el necesario calor y el metal frío, para producir la composición ideal de acero. Tanto el acero fundido y la escoria son entonces vaciados del horno y el proceso se repite. Las escorias de acero se producen en cantidades más pequeñas que la escoria de altos hornos y son menos utilizados. Que se debatirá brevemente más adelante.

2.3.3 USOS DE LA ESCORIA DEL EAF Y BOF

La utilización de escorias de acero se desarrolló más tarde que la de la escoria de altos hornos y no se ha progresado en la medida. A principios de procesamiento fue únicamente para la recuperación de metales ferrosos, con la escoria desperdiciada. Algunos de los primeros intentos de utilizar los agregados como estos no tuvieron éxito debido a los cambios de volumen de hidratación de CaO. Estas dificultades, por lo general asociadas con el uso de agua (y a menudo sin procesar) en los materiales rígidamente en lugares confinados, donde incluso pequeñas cantidades de la ampliación sería perjudicial, ha inhibido el desarrollo rápido de usos adicionales. Las escorias de acero hoy en día se están utilizando con éxito en dos grandes tipos de aplicaciones: (a) como una fuente de hierro y el flujo de materiales en los altos hornos, y (b) como un agregado de minerales de alta calidad para usos específicos. Los usos en bases y estructuras de relleno, en donde muy alta estabilidad es obtenida, podrá exigir la debida selección, el procesamiento y el envejecimiento (meteorización) antes de su uso. El uso rígido en aplicaciones de confinados - como agregado de concretos o como relleno de la construcción de pisos y paredes dentro de fundición, no es recomendable. Se estima que entre la mitad y las dos terceras partes de la escoria de acero producidas en todo el mundo son utilizados, ya sea por reciclaje o aplicaciones en la construcción de carreteras, vías férreas lastre, como fertilizantes, etc. El uso en los EE.UU. para fines de construcción ascendió a casi 8.5 Millones de toneladas, con los principales usos de la siguiente manera:

- Pavimentos bituminosos
- Agregados asfálticos
- Como agregado en la producción de cemento portland
- Como base y sub-base en carreteras
- Usos agrícolas como la re-mineralización y control de Ph⁽¹⁹⁾

CAPITULO TRES

CARACTERIZACION DE LAS ESCORIAS

**3.
Introducción**

**3.1
Propiedades
físicas y
factores que
las determinan**

**3.1.1
Procesos de
solidificación y
curados de
escorias**

**3.2
Propiedades
químicas y
Factores que la
determinan**

**3.2.1
Métodos y
estándares
para
caracterización
de escorias.**



3.1 INTRODUCCION

Ya en el año 350 A. C. el médico griego, Aristóteles, hacía referencia a la escoria de los fabricantes de hierro para cicatrizar heridas. En el siglo siguiente, las aplicaciones adicionales para la escoria eran descubiertas, tales como mosaicos y cañones de bola lisos. Sin embargo no es hasta el inicio del siglo XX, cuando el moderno proceso de producción de hierro y acero desarrollaron el uso comercial de las escorias volviéndose aceptable a gran escala. En contraste, la introducción comercial de la escoria de acero tomo más tiempo, ya que este producto está pensado para tener un valor más allá de su uso como una carga que contiene hierro.

En años recientes, la escoria de acero se ha convertido en uno de los principales agregados de la construcción para muchas aplicaciones especializadas. La composición química y física de la escoria de acero a menudo califica a este como el producto más viable para satisfacer los requerimientos técnicos y monetarios de un determinado mercado. Algunas de las grandes aplicaciones incluyen agregados para asfalto de mezcla caliente, cemento Portland, superficie de rodamiento, aplicaciones de confinamiento de bases de caminos, re-mineralización del suelo y pH de neutralización de las minas abandonadas y sitios contaminados.

En la industria del acero, dos principales tipos de escoria son producidos la del alto horno y la escoria de acero.

La escoria es un subproducto del proceso de elaboración de hierro y acero. El hierro no puede producirse en un alto horno sin la producir escoria de alto horno. Del mismo modo no se puede producir acero en un horno básico de oxígeno o en un horno de arco eléctrico sin producir escoria de acero.⁽²⁰⁾

La escoria es una solución iónica de varios óxidos y fundentes. Tiene diversas funciones:

- protege el acero líquido de las reacciones con la atmósfera,
 - reoxidación
 - reduce la absorción del nitrógeno e hidrógeno
- es aislante térmico
- actúa como reservorio de inclusiones
- es un medio de refinamiento para la desulfuración, desoxidación y defosforación.

Sin embargo, también reacciona a los materiales refractarios provocando el desgaste del refractario. La composición de la escoria durante la metalurgia secundaria debe ser controlada muy cuidadosamente para lograr las inclusiones y la composición del acero requeridos. Además, la densidad, el

volumen (profundidad), el punto de fusión, la viscosidad y la energía interfacial de la escoria, son todos factores importantes que controlan las reacciones con el acero y los materiales refractarios.

3.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y FACTORES QUE LAS DETERMINAN

Debido a sus singulares propiedades físicas y químicas, así como aplicaciones de uso final, es importante distinguir la escoria de acero de la escoria de alto horno.

La sociedad americana de pruebas y materiales define la escoria de alto horno como un producto no metálico consistente esencialmente de silicatos de aluminio o calcio y otras bases, que son evolucionas en condiciones de fundición simultáneamente con hierro en un alto horno.

La Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) define la escoria de acero como un producto no metálico, que consiste esencialmente de silicatos de calcio y ferritas, combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio, manganeso, calcio y magnesio.

Físicamente, las escorias de acero son mucho más pesadas, más duras, más densas y de menor naturaleza vesicular, y tiene inusualmente una alta resistencia al desgaste y pulido. Las características físicas, el peso, el tamaño de las partículas, las propiedades estructurales, etc-varían de acuerdo con el método utilizado en el procesamiento de la escoria fundida. Por consiguiente, poner fin a la utilización de materiales procesados varía, lo que ayuda a explicar la singular diversidad de los productos de la escoria.⁽²⁰⁾

Viscosidad de la escoria y tensión interfacial

La viscosidad de la escoria está relacionada al tamaño de las unidades de la estructura iónica o molecular, de tal manera que la viscosidad generalmente aumenta a medida que lo hace la composición de la escoria; y disminuye con un aumento de la basicidad de la escoria como resultado de la ruptura de las aglutinaciones de Si-O-Si.

La viscosidad de la escoria deberá ser lo suficientemente alta para ser efectiva en la creación de una escoria. Si la viscosidad de la escoria es muy baja, entonces podrá ocurrir un daño excesivo de la escoria en los refractarios.

La tensión interfacial entre el metal líquido y la escoria líquida y las inclusiones tiene un efecto notable en la eficiencia de la reacción metalúrgica durante la metalurgia en sí, incluyendo la transferencia de masa en la interfaz entre la escoria y el metal y la eliminación de inclusiones.⁽²⁵⁾

3.1.1 PROCESOS DE SOLIDIFICACIÓN Y CURADOS



Escoria de alto horno

Enfriada por aire

Las escorias refrigeradas por aire tal como se define en la norma ASTM C 125 es la siguiente: "son los materiales resultantes de la solidificación de escoria fundida de altos hornos bajo condiciones atmosféricas.

Posteriormente el enfriamiento puede ser acelerado por la aplicación de agua a la superficie solidificada".

La escoria solidificada característicamente tiene una estructura vesicular con muchas células no conectadas. La textura áspera vesicular de escoria le da una mayor área de superficie que agregados suaves de igual volumen y proporcionan un excelente vínculo con el cemento portland y alta estabilidad en las mezclas bituminosas. Para aplicaciones de terraplén, las superficies rugosas mejoran el ángulo de fricción interna o la vinculación de las piezas.

La mayor parte de la gravedad específica (base seca) de la escoria de alto horno enfriada con aire es un agregado grueso que tiene el tamaño más pequeño y tiene una alta gravedad específica que generalmente cae en el rango de 2 a 2.5. Las escorias refrigeradas por aire se asemejan a la arena natural en su gravedad específica. Debido a la naturaleza celular de la escoria, es importante que la mayoría de las veces la gravedad específica es usada en lugar de la gravedad específica aparente, para calcular el rendimiento o la estimación de las cantidades.

La unidad de peso varía de acuerdo con: (a) el tamaño y clasificación de la escoria, (b) el método de medición y (c) el Peso específico de la escoria. La unidad típica de peso (compactado), de triturado y selección de escoria refrigerada por aire, está clasificado y usado ordinariamente en concreto, esta generalmente en el rango de 1,121 a 1,281 kg por m³ o 70 a 85 libras por ft³. La escoria tiene una ventaja económica en la construcción, ya que tiene un menor peso unitario que la mayoría de los agregados naturales. Esta diferencia debe ser considerada para el diseño y especificaciones con el fin de asegurarle la igualdad de volumen independientemente del tipo de agregados utilizados.

La clasificación

La escoria de alto horno refrigerada por aire se muele y se selecciona para ajustarse a los requisitos de clasificación de los diversos departamentos estatales de carreteras, municipios y otros órganos especificados. Las clasificaciones especificadas en las normas nacionales de los EUA, como el ASTM D 448. Los estándares de tamaños de agregado grueso para la construcción de carreteras, son preferentemente usados y, a menudo, los más disponibles fácilmente.

La absorción de la escoria de alto horno refrigerada por aire esta normalmente en el rango de 1 a 5% en peso, ya que tiene una mayor superficie y menor gravedad específica que la mayoría de los agregados naturales. Poco agua entra alguna vez en el interior de las células vesiculares, por lo que el grado de saturación (la porción total de espacio vacío ocupado por agua) es baja. Las celdas vacías son similares a las burbujas de aire arrastradas en pastas de cemento y por consiguiente la durabilidad es sobresaliente.

Resistencia al derrape

Una característica destacada de la escoria de alto horno enfriada por aire es su dureza y resistencia anti-derrapante. A pesar de su dureza, la degradación de la escoria, en la prueba de Los Ángeles (LA) la máquina de resistencia a la abrasión, es generalmente más elevado que para una superficie lisa o agregados naturales. Esto se debe principalmente a las asperezas en la superficie de impacto en virtud de la ruptura de las bolas de acero que constituyen la prueba. Se ha demostrado que no existe correlación entre la prueba de resistencia a la abrasión de los Ángeles, la pérdida de escoria en pruebas de laboratorio y la degradación en aplicaciones de campo. Por esta razón, el ASTM ha suprimido esta prueba de escoria en sus especificaciones (véase la norma ASTM D 692, D1139, etc.) en los estados donde se dispone de escoria no necesitan esta prueba para la escoria. Los límites para la prueba de abrasión de los Ángeles de la escoria, de ser incluidas en el pliego de condiciones, debe ser algo más elevado que la de los agregados naturales hasta un máximo de aproximadamente un 50% de pérdida.

Esta es la mayor pérdida, sin embargo, no significa que la escoria es más suave que los agregados naturales. La dureza de la escoria, medida por la escala de Mohs es entre 5 y 6. Esto se compara favorablemente con la dureza reportada para tales materiales como rocas ígneas duraderas.

No Corrosivo

Las pequeñas cantidades de azufre combinadas en la escoria, están presentes en los compuestos alcalinos, similares a las del cemento portland. Estos son inocuos para concreto y no causan corrosión en estructuras de acero.

Las propiedades corrosivas de las cenizas de carbón o cenizas no deben ser erróneamente aplicadas a escoria de alto horno. El examen de las barras de refuerzo de la escoria tomado en estructuras de concreto después de 30 años de servicio no ha mostrado pruebas de corrosión. El pH de las soluciones en contacto con la escoria siempre es básico que tiende a inhibir la corrosión.

Durabilidad

La escoria es muy resistente a la acción de la intemperie. Soporta un inusual número de ciclos de prueba de la solidez de sulfato (ASTM C 88). La congelación y descongelación o humectación y secado de las pruebas, tienen muy poco o ningún efecto. Las altas temperaturas tienen muy poco efecto sobre la escoria que se forma en el alto horno a unos 1480°C. La escoria de alto horno refrigerada por aire muestra un lento pero muy uniforme coeficiente de expansión de aproximadamente 0,000006 por cada grado F, hasta su punto de fusión (1150°C a 1426°C/2100°F a 2600°F). Esta cifra es normalmente aceptada como el coeficiente de expansión de mortero, de cemento y del acero, por lo tanto, la escoria, cuando se combina con los ingredientes para formar concreto armado, ofrece un alto grado de compatibilidad.

Enfriamiento controlado por agua



Proceso

Controladas las cantidades de agua que se utilizan para acelerar el proceso de solidificación de la escoria fundida de alto horno, produce un material de baja densidad. Expandida la escoria solidificada, es aplastada y seleccionada para su uso como agregado estructural ligero.

Textura y Forma

Expandida la escoria de alto horno es angular y de forma cúbica, con insignificantes partículas planas o alargadas. Debido a la acción del agua y el vapor resultante en el proceso de solidificación, la estructura celular abierta de las partículas es aún más pronunciada que las partículas de escoria de alto horno refrigeradas por aire.

La clasificación

Expandida la escoria de alto horno se muele y se seleccionan los productos de tamaño deseado. Normalmente se trata de una mezcla de agregados gruesos y partículas finas. La actual clasificación de los productos se debe revisar con el proveedor local.

ENFRIAMIENTO ACELERADO "pellets"



Un proceso único que facilita la fabricación de productos de "Valor Añadido"

En el proceso de "pelletización", una corriente fundida de escoria de alto horno se dirige en una placa de alimentación inclinada con vibración donde se apagará con agua. La adición de agua en esta etapa hace la espuma de escoria. Mientas tanto en este estado de expansión piroplastica los flujos de corrientes de escoria son alimentados en una placa sobre un tambor rotatorio con aletas. Como el tambor gira, las aletas repetidamente mandan el flujo de escoria con la suficiente fuerza para impulsar la escoria en el aire, la dispersión y la formación de gotas esféricas. Estas gotas, o escoria en forma de "pellets", se transforman rápidamente a un estado sólido en el momento que son lanzadas por el aire fuera de la "pelletizadora".

Textura y Forma

El tratamiento de la escoria fundida de alto horno con el agua y la acción de la espuma resultante, da una única estructura celular interna dentro de cada gránulo de escoria. Esta estructura celular (muchos vacíos sólo detectables con la ayuda de un microscopio electrónico) está contenida dentro de una buena superficie esférica. La combinación de estas características lleva a la formación de un agregado de baja densidad, con diversas aplicaciones como material de construcción.

Gradaciones y densidades

La escoria "pelletizada" está disponible en varios tamaños y gradaciones. Los tamaños más comunes son procesados: estructuras gruesas (1/2 " x 3/16"), grueso (3/8 "), finas (3/16") y mezcla (3/8 "). Las densidades van de 912 kg/m³ (54lb/ft³) a 1105 kg/m³ (69 lb/ft³), en función de la gradación.

ESCORIA GRANULAR

El material granular vidrioso de escoria se forma rápidamente, cuando son refrigeradas por inmersión en el agua.

Proceso

El más común para el proceso de granulación de escoria de altos hornos implica la utilización de alto volumen de agua, alta presión, chorros de agua en contacto directo con la escoria fundida de alto horno en una proporción de aproximadamente 10 a 1 en masa. La escoria fundida de alto horno se apaga casi de inmediato, forma un material en general más pequeño que un tamiz # 4. La eficiencia a la que la escoria fundida de alto horno se enfría rápidamente,

así como la composición química de la escoria, determinan en gran medida sus propiedades para el uso con el cemento. Después de que la escoria de alto horno granulada se forma, se debe retirar el agua, el polvo y secar, utilizando procesos similares a los utilizados con cemento “clinker” portland para hacer cemento portland.

Polvo granulado

Cuando la escoria granulada en polvo de alto horno se mezcla con el agua, la hidratación inicial es mucho más lento en comparación con el cemento portland. Por lo tanto, el cemento portland o sales alcalinas se utilizan para aumentar la velocidad de reacción. En el proceso de hidratación, la escoria granulada en polvo de alto horno el hidrato de silicato de calcio produce pasta de cemento. Esta valiosa contribución de la escoria granulada en polvo de alto horno proporciona el lazo pasta-a-agregado de cemento. La escoria granulada en polvo de alto horno mezclada con cemento portland normalmente da como resultado una mayor resistencia y una reducción de la permeabilidad. La norma ASTM C989 ofrece tres grados de fuerza para la escoria granulada en polvo de alto horno, en función de sus respectivas fortalezas de mortero cuando se mezcla con la misma cantidad de cemento portland. Las clasificaciones de grado son 80, 100 y 120, sobre la base del índice de actividad de la escoria.⁽¹⁵⁾ (Vea tabla 3.1.)

INDICE DE ACTIVIDAD DE LAS ESCORIAS NORMA ASTM C989		
ESCORIA INDICE DE ACTIVIDAD, MINIMA POR CIENTO		
EDAD Y GRADO	Promedio de los últimos cinco muestras consecutivas	Cualquier muestra individual
7- día índice		
grado 80	-	-
grado 100	75	70
grado 120	95	90
28- día índice		
grado 80	75	70
grado 100	95	90
grado 120	135	110

TABLA 3.1: INDICE DE ACTIVIDAD DE LAS ESCORIAS
FUENTE: NATIONAL SLAG ASSOCIATION

Escoria de acero

La escoria espumante se utiliza a fin de aumentar la eficiencia térmica del horno durante el período de afino, cuando las paredes laterales están totalmente expuestas a la radiación del arco. Una escoria espumante crecerá y cubrirá los arcos eléctricos, permitiendo de esta forma el uso de posiciones más altas de control de potencia sin necesidad de aumentar la carga térmica en las paredes del horno. Además, un arco eléctrico cubierto por una escoria espumante tendrá una eficiencia mayor en la transferencia de energía en la fase acero.

El espumado de la escoria es logrado por inyección de oxígeno en el acero líquido, donde se oxida fundamentalmente el hierro de acuerdo a la reacción:



El polvo de carbono es luego inyectado simultáneamente en la fase escoria donde el óxido de hierro es reducido.



El gas CO resultante es un componente crítico para la obtención de una escoria espumante.

La **espumabilidad** de la escoria es un parámetro tan crítico como la generación de gas CO a fin de obtener espuma. La espumabilidad es controlada por las propiedades físicas de la fase escoria: viscosidad, tensión superficial y densidad. Estas propiedades varían conforme a la composición de la escoria.

Debido a la naturaleza del EAF – con grandes variaciones en la temperatura y la composición en diferentes partes del horno – puede ocurrir que la escoria esté parcialmente sólida en algunos puntos durante las etapas de la operación. Una escoria que no sea totalmente líquida, pero que contenga un porcentaje de material sólido, como por ejemplo cal no disuelta, también influye en la espumabilidad, ya que se produce un cambio en la viscosidad aparente.

Prácticamente todas las escorias de acero son refrigeradas por aire. Las escorias de acero se producen en cantidades más pequeñas que la escoria de altos hornos y son menos utilizados. Aunque cabe mencionar que el proceso de solidificación o curado de escoria en Arcelor Mittal es primero usando agua y después dejar enfriar por convección con el aire. Un procedimiento alternativo para el curado de la escoria es mantenerla en un lugar cerrado con vapor de agua para así acelerar su expansión y de esta manera no sería necesario

dejar expuesta la escoria de acero seis meses al ambiente para obtener su expansión total.⁽²⁹⁾

3.2 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FACTORES QUE LAS DETERMINAN

Escoria del alto horno

Es necesario destacar el papel tan importante que juegan las escorias, ya que su composición, basicidad, fluidez, temperatura de fusión, etc., son factores fundamentales y decisivos en la marcha de la operación del alto horno.

Si no se emplearan fundentes adecuados, algunas cargas y cenizas serían imposibles de fundir y se producirían atascos por la presencia de esas materias infusibles en la parte baja del horno y no se podría realizar su evacuación, por encontrarse esas materias en estado sólido.

Prácticamente, puede considerarse que la primera función de los fundentes, caliza o dolomía, es formar la escoria, con lo que se facilita la fusión de la carga del mineral y de la impureza o cenizas del coque para que luego puedan salir del horno en estado líquido.

La escoria se forma al reaccionar el fundente (que generalmente es la caliza y algo de dolomía) con la ganga del mineral y las cenizas del coque. El índice de basicidad de la escoria, que es un factor de gran interés en la marcha de los hornos altos, viene dando por la relación:

$$\frac{\% CaO + \% MnO}{\% SiO_2 + \% Al_2O_3} = \text{índice de basicidad}$$

Este índice de basicidad, conviene que sea del orden de 1.

La fluidez y la temperatura de fusión de las escorias, que hay en cada zona del alto horno, son muy importantes en la operación por las circunstancias que se explicarán más adelante. La presencia de la escoria no se puede evitar en el horno alto. Como la mayoría de los minerales de hierro son de carácter ácido, y para una buena marcha del horno se recomienda en general que el grado de basicidad sea de orden de uno, es necesario la adición de caliza o dolomía como fundentes para alcanzar ese grado de basicidad. El mineral de hierro está siempre mezclado, como ya hemos explicado antes, con ciertos cuerpos como la arcilla ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), la sílice (SiO_2), la caliza ($CaCO_3$), el coque contiene cenizas que están constituidas también por cantidades variables de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), cal (CaO) y algo de sulfuro de hierro. Todos estos están presentes en la operación, creando nuevos problemas que en ocasiones son difíciles de resolver. El primero y principal se deriva de la alta temperatura

de fusión de algunos de esos cuerpos, muy superiores a las que se alcanzan en el alto horno.

La magnesita, por ejemplo, funde a 2810°C, la cal a 2750°C, la alúmina a 2050°C, las arcillas a 1850°C, aproximadamente, y la sílice a 1710°C y, en el alto horno, en cambio, la máxima temperatura que se suele alcanzar en un sector relativamente extenso de la zona de fusión, suele ser solo del orden de unos 1600 a 1800°C, aproximadamente. La máxima que se suele señalar en una zona muy limitada y pequeña, enfrente de las toberas, varía de 1800 a 2000°C y, en algunas ocasiones, llega hasta 2300°C.

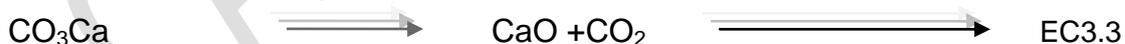
Las escorias de los altos hornos se forman al unirse las materias terreas, que contienen las cargas con el fundente (caliza) que se añade para facilitar su fusión, y su composición sirve, en gran parte, para regular la temperatura del alto horno en la zona de fusión de las cargas.

Aunque la formación de la escoria no se realiza siempre, en iguales condiciones, según sea la clase del mineral y las características de su carga, la escoria se puede formar en zonas ligeramente más elevadas o más bajas que la señaladas.

Primero se produce la descomposición de la caliza. Luego, al ponerse algo de óxido ferroso, que funde a muy baja temperatura, en contacto con la sílice de la carga y con una pequeña parte de óxido de manganeso que siempre suele contener el mineral, se forman silicatos de hierro y manganeso fundidos. Esa escoria que se ha formado, muy rica en óxido de hierro y muy fluida, se denomina escoria primaria.

El silicato de hierro forma ya una escoria muy fluida a unos 1250°, y después se combina con los óxidos de la carga y de las cenizas del coque.

A continuación se señalan las principales reacciones correspondientes a la formación de la escoria:



Al descender las cargas y elevarse su temperatura, aumenta cada vez más la importancia de esas reacciones, que dependen en gran parte de la cantidad de óxido ferroso que existe sin reducir y del grado de dispersión de la sílice. A elevada temperatura se forma también silicato cálcico, que aparece al combinarse la sílice con la cal. Luego, el silicato ferroso que se ha formado y el de manganeso reaccionan también con la cal que proviene de la descomposición de la caliza, formándose, de acuerdo con las reacciones antes citadas, silicato complejo de cal y óxidos de hierro y manganeso, que luego son reducidos y finalmente pasan el hierro y el manganeso a la fundición.

Los porcentajes de FeO y MnO disminuyen al descender a través del horno la escoria, porque esos óxidos son reducidos a muy alta temperatura por la acción del carbono.

Composición de las escorias.

En su descenso a través del alto horno, la composición de la escoria va sufriendo continuamente cambios importantes. Además de las reacciones fundamentales señaladas anteriormente, debe indicarse que el silicato formado reacciona con la alúmina de la carga en una zona de elevada temperatura, aumentando con ello su fluidez. En la zona de combustión y fusión, la composición de la escoria sigue sufriendo todavía transformaciones importantes y los óxidos y silicatos de hierro y manganeso son reducidos, como se ha dicho antes, por la acción directa del carbono.

Las escorias también suelen contener pequeñas cantidades de MnS y CaS, no llegando generalmente la suma de los porcentajes de todos estos últimos compuestos a un 10%. El porcentaje de FeO de las escorias del alto horno debe ser lo más bajo posible y, generalmente, es inferior a 1%, debiendo mantenerse tan bajo como se pueda para evitar pérdidas de hierro en el proceso. El contenido en azufre de la escoria suele variar generalmente de 1 a 2%. Para muchos estudios y cálculos de carácter muy general, se puede considerar que los únicos constituyentes de las escorias son los cuatro óxidos citados al principio, y que la suma de los porcentajes de los cuatro es 100 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} = 100$). En ocasiones, para simplificar todavía más los cálculos referentes al grado de basicidad, se suele considerar iguales el MgO y el CaO, y sumar sus porcentajes, y se hace referencia solo del CaO, ya que al aceptar ese criterio no se modifican sensiblemente los resultados que se obtienen. Aunque las composiciones de las escorias varían dentro de límites bastante amplios, como referencia señalaremos como una composición representativa de escoria de alto horno, la siguiente:

Composición química de la escoria de alto horno

ELEMENTO	PORCENTAJE
SILICA (SiO ₂)	32 – 42
ALUMINA(Al ₂ O ₃)	7 – 16
CALCIO(CaO)	32- 42
MAGNESITA(MgO)	5 - 15
AZUFRE(S)	1 - 2
OXIDO DE HIERRO (Fe ₂ O ₃)	1 – 1.5
OXIDO DE MANGANESO(MnO)	0.2 – 1

TABLA 3.2: COMPOSICION DE LA ESCORIA DEL ALTO HORNO (BOF) FUENTE: NATIONAL SLAG ASSOCIATION

Es frecuente trabajar con escorias básicas con una relación de basicidad CaO/SiO_2 próxima a uno. Una idea bastante aproximada de las posibles composiciones de las escorias de los altos hornos se obtiene observado los diagramas ternarios SiO_2 , Al_2O_3 y CaO en las que se señalan las composiciones que corresponden a las fundiciones grises y blancas, ferrosilicios y ferromanganesos.

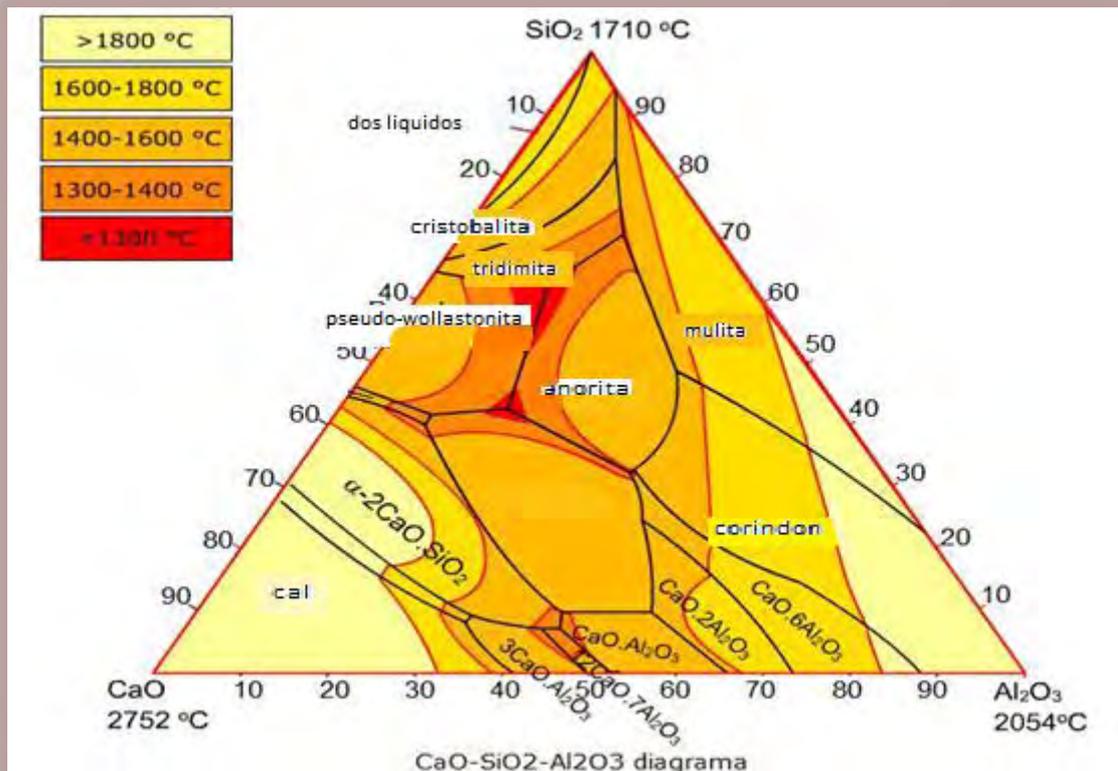


FIGURA 3.1: DIAGRAMA TERNARIO SiO_2 , Al_2O_3 y CaO FUENTE: UNIVERSITY STEEL

Papel depurador de la escoria

Empleando escorias de temperatura de fusión y de basicidad adecuadas, es posible, como ya hemos indicado antes, reducir ligeramente el porcentaje de azufre de la fundición, no siendo en cambio posible ese afino en el caso de las escorias acidas. La eliminación del azufre tiene importancia sobre todo cuando las materias primas que se cargan en el horno contienen un porcentaje importante de azufre.

En el crisol del alto horno es siempre conveniente mantener algo de escoria sobre el metal fundido. Así, al gotear la fundición y atravesar la escoria, se depura y se reduce el contenido de azufre.

Al papel desulfurante de las escorias se le atribuyó, a principios del siglo XX, un papel bastante importante, pero, con el transcurso de los años, al poder realizar muy eficazmente la desulfuración fuera del horno por la acción del carbonato sódico, aquella se considera cada vez más secundaria.

Perdida de hierro en la escoria

Las escorias básicas evitan que se produzca una pérdida importante de hierro en la operación. Si se emplearan minerales siliciosos, por ejemplo, y no se añadiese caliza, al descender las cargas en el horno se formarían cantidades

importantes de silicato ferroso que no llegarían a reducirse completamente y escaparía hierro con la escoria. En cambio, al añadir caliza, la cal que se forma al descomponerse la caliza se combina fácilmente con la sílice, desplazando al hierro de la escoria y que, al quedar libre en forma de óxido de hierro, es reducido con más facilidad.

Fusibilidad de la escoria, reductibilidad de los minerales y temperatura del alto horno.

Es muy interesante conocer la importancia que tiene el grado de fusibilidad de las escorias y su relación con la facilidad de reducción de los minerales. En general, cuando se utilizan minerales de difícil reducción, conviene emplear escorias bastante refractarias, con temperaturas de fusión relativamente elevadas, pues de esa forma es posible que llegue el óxido de hierro, FeO, hasta las zonas relativamente bajas del horno, sin haberse puesto todavía en contacto con escorias fundidas, con las que el óxido de hierro formaría silicato de hierro, de muy difícil reducción.

En la práctica, además, las escorias ayudan también en cierto modo a regular la temperatura del horno. En el caso de minerales difíciles de reducir, es necesario alcanzar en el proceso altas temperaturas, lo que se consigue utilizando escorias refractarias y gran cantidad de coque. Las escorias que son muy refractarias, o sea, difíciles de fundir, facilitan la elevación de la temperatura en las zonas inferiores del horno, mientras que con escorias muy fusibles es más difícil conseguir elevadas temperaturas.

Empleando más combustible y aire más caliente, se eleva la temperatura del horno. Marchando con alta temperatura en el horno se obtienen fundiciones grises de alto porcentaje de silicio, ya que las altas temperaturas favorecen la reducción de la sílice y el paso del silicio a la fundición.

La cantidad de escoria que se produce en los altos hornos suele variar de 300 a 1200 Kg por tonelada de fundición. En general, la marcha de los altos hornos es más regular cuando se utilizan mayores cantidades de escoria, pero, en cambio, esas marchas son antieconómicas por el mayor consumo de coque. En cambio, con poca cantidad de escoria, el proceso es más económico, aunque la marcha es algo más irregular. Con bajos porcentajes de escoria, se producen más fácilmente cambios imprevistos en la operación y es necesaria mayor vigilancia, debiendo cuidarse mucho los pesos y calidades de las cargas, la temperatura y cantidad de aire, etc. Marchas de trabajo con 300 a 600Kg de escoria, se consideran en la actualidad muy aceptables y convenientes.

Cabe señalar, sin embargo, que los principales óxidos mostrados no ocurren en forma libre en la escoria, en la refrigeración de la escoria del alto horno ellos son combinados para formar varios silicatos y aluminosilicatos minerales tal

como melanita, hematita y wollastonita, tal como se encuentran forma natural geológica. En el caso de los granulados y pellets de escoria, estos elementos existen primeramente en forma vidriosa. La composición química de la escoria de una determinada fuente varían relativamente dentro de los límites estrechos desde la materia prima cargada dentro del horno que son seleccionadas y mezclados cuidadosamente.^(15,29)

Escoria de acero

Las escorias comúnmente usadas en el BOF se encuentran, por lo general, cerca del sistema de óxidos ternarios CaO-SiO₂-FeO. Dado que las escorias reales constituidas por más de tres componentes no son estrictamente ternarias, algunas propiedades pueden estimarse, en buena medida, utilizando diagramas multifase de propiedades. A continuación, presentamos un ejemplo de dicho diagrama donde se muestran los cambios en la región líquida con la composición de la escoria respecto de tres óxidos; CaO, SiO₂ y FeO.

Sistemas comunes de escoria

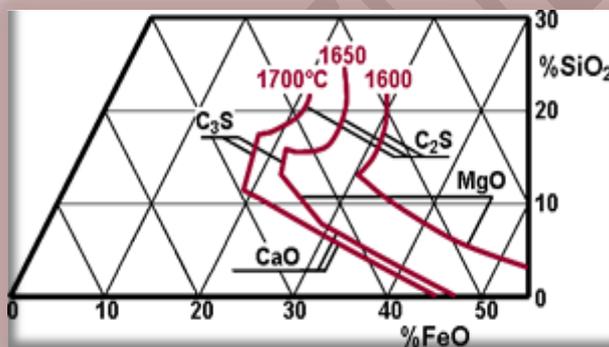


FIGURA 3.2: Efecto de la temperatura sobre la extensión del dominio de escorias líquidas en el sistema CaO-SiO₂-FeO-2%P₂O₅-1.5%Al₂O₃-3%MnO-5%MgO a 1600, 1650 y 1700 °C.

FUENTE: UNIVERSITY STEEL

Las reacciones escoria/metal implican:

Eliminación de Si: Esta reacción es muy rápida y la cantidad total de silicio es transferida a la escoria en el primer tercio del soplado.

Eliminación de P y S: Estas reacciones requieren un control muy preciso de la formación de escoria y de su composición final, a fin de poder garantizar los bajos contenidos buscados para el acero líquido. De las dos, la defosforación es la más importante y se analiza aquí. Para poder lograrla, en forma eficiente

en función de los costos, el acerista debe considerar tanto los aspectos cinéticos como los termodinámicos.

Formación y composición de la escoria

La escoria contiene óxidos que surgen de algunas reacciones de oxidación (SiO_2 , P_2O_5 , FeO y MnO), de fundentes agregados (CaO , MgO) y del desgaste de refractarios (MgO). Su evolución durante el soplado de oxígeno es la siguiente: Evolución de la composición de la escoria durante el soplado: 1-2: Escoria ácida formada a partir del Si y el Fe (Mn) oxidados. La cal es disuelta sólo parcialmente. La temperatura es baja para que se oxide parte del fósforo. 2-3: La cal se disuelve progresivamente enriqueciendo en CaO a la escoria líquida y reduciendo su contenido de FeO a causa de la dilución y de la reducción del FeO durante la decarburación total (en especial, si la lanza está demasiado baja). La escoria es heterogénea y no reactiva respecto del fósforo. 3-4: Escoria reactiva, apropiada para la defosforación final. Ver la figura 3.3

CAPITULO 3

Cambios en la composición metálica

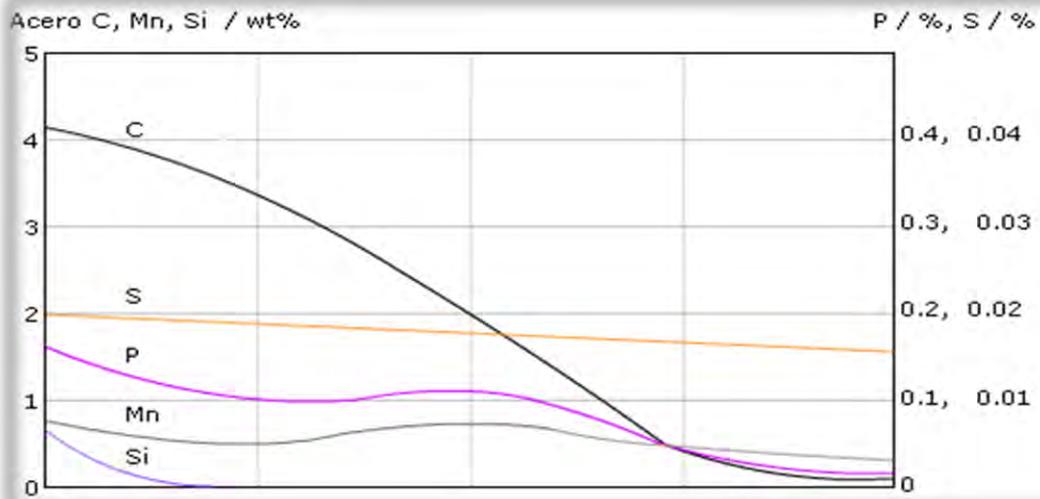


FIGURA 3.4 Cambios en la composición del metal fundido durante el soplado
FUENTE: UNIVERSITY STEEL

Oxidos en la escoria / wt %

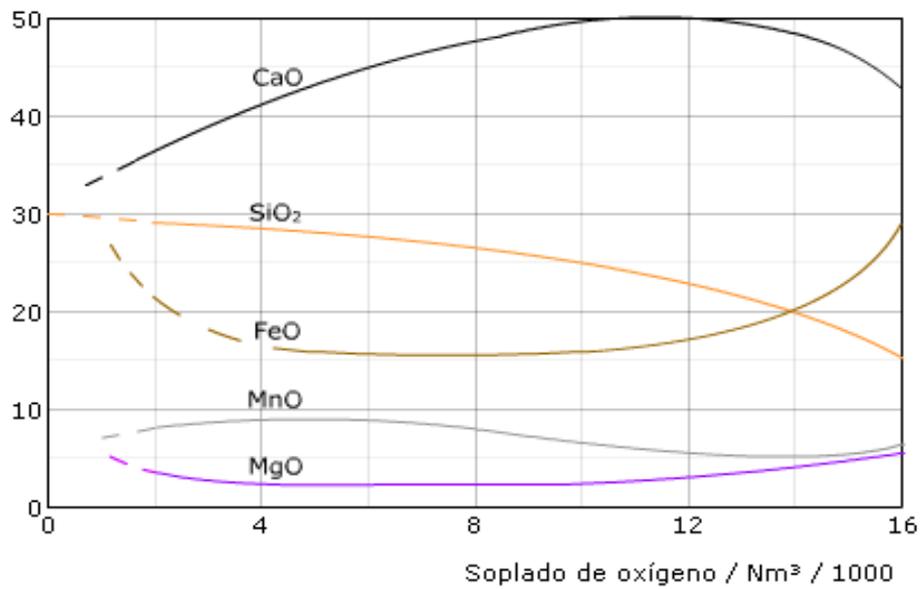


FIGURA 3.5 Cambios en la composición de la escoria durante el soplado
FUENTE: UNIVERSITY STEEL

Defosforación en el BOF

La defosforación en el BOF está regida por la siguiente ecuación:

$$\%P_{\text{acero}} = \%P_E / [1 + L_P \cdot Q_{\text{escoria}} / (1 + \Delta P_{\text{eq}} / \%P_{\text{eq}})]$$

donde:

$$\%P_E = 100 \times (P_{\text{tot, in}} / M_{\text{acero}})$$

$$Q_{\text{escoria}} = M_{\text{escoria}} / M_{\text{acero}} : \text{consumo específico de escoria}$$

$$L_P = \%P_{\text{escoria}} / \%P_{\text{eq}} : \text{relación de partición en equilibrio}$$

$$\Delta P_{\text{eq}} = \%P_{\text{acero}} - \%P_{\text{eq}} : \text{desequilibrio escoria/metal}$$

Para poder mejorar las condiciones de defosforación, los diferentes parámetros pueden ser variados de la siguiente manera:

I – Acciones sobre L_P

- L_P , en la práctica, es óptimo entre $3 < \text{relación-v} < 5$
- Si se pretende relación-v > 6 , es necesario aumentar el contenido de hierro en la escoria (es importante destacar que esto probablemente causará un mayor desgaste del refractario) para obtener escorias líquidas y evitar una degradación de la cinética (ΔP_{eq})
- L_P no aumenta drásticamente cuando se agregan fundentes (CaF_2 , Al_2O_3).

Conclusión: el aporte de CaO (cal + cal dolomítica) debe ser tal que $3 < \text{relación-v} < 5$ para todos los contenidos de Si en el metal caliente.

II – Acciones sobre Q_{escoria}

Principales conclusiones sobre los modos de aumentar en forma eficiente el peso de la escoria (de ser necesario):

- No sobrecargar sólo con cal (relación-v < 6)
- La adición de cal + fundentes puede ser correcta, pero no tiene gran efecto sobre L_P
- La mejor acción, si el $\%Si_{\text{metal caliente}}$ es muy bajo, es agregar cal y sílice

III – Acciones sobre el $\%P_{\text{metal caliente}}$

Esto justificaría el tratamiento previo del metal caliente. Cualquier acción podría tener efectos adversos sobre el reciclado de escoria de convertidor en la planta de sinterización.

IV – Acción sobre la cinética (reducción del ΔP_{eq})

Esta es la experiencia o "know how" del acerista. De acuerdo con el diagrama de formación de escoria, hay sólo un corto lapso con una escoria bien formada capaz de producir defosforación:

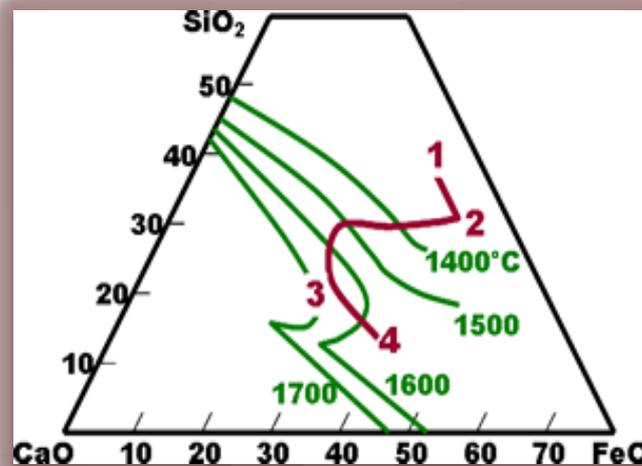


TABLA 3.3 Evolución de la composición de la escoria durante el soplado

FUENTE: UNIVERSITY STEEL

1-2: Escoria ácida

2-3: Escoria heterogénea, no reactiva

3-4: Escoria reactiva, apropiada para la defosforación final

Existen distintas formas para alcanzar los resultados deseados, por ejemplo:

- Adaptar el patrón de soplado para lograr una óptima evolución del afino
- De ser necesario, usar fundentes, pero se debe tener cuidado con el desgaste de refractarios, la durabilidad y los efectos sobre la productividad

Las composiciones varían según el tipo de horno, composición de carga al horno, los grados de acero producido, y con las prácticas de operación de cada uno de los hornos. Los materiales añadidos justo antes del calentamiento final pueden no ser totalmente incorporadas a la escoria. Por lo tanto, algunos óxidos libres, incluyendo CaO, se puede encontrar en algunas escorias.

En comparación con la escoria de altos hornos, las escorias de acero suelen contener mucho mayor cantidades de hierro y manganeso, son más bajas en sílice y la producción de cal es mucho más alta que la proporción de sílice-cal, y el azufre contenido suele ser bastante bajo.⁽²⁹⁾

La composición química de la escoria resultante del BOF y del horno de arco eléctrico (EAF) son típicamente ⁽⁵⁾

CONSTITUYENTE	% EN PESO
CaO	44.312
FeO	23
SiO ₂	13.921
MgO	8.1499
MnO	5.9
Al ₂ O ₂	3.2
P ₂ O ₅	0.6
S	0.1

TABLA 4.3: COMPOSICION DE LA ESCORIA DEL HORNO BASICO DE OXIGENO (BOF)

FUENTE: ARCELOR MITTAL

La escoria básica es aquella que contiene iones libres de oxígeno, alimentada por la presencia de CaO y MgO. La escoria ácida es aquella con escaso O₂ y que contiene SiO₂ y P₂O₅.

La basicidad (B) de la escoria se define como:

$$B = \frac{(\%CaO + 1.4\% MgO)}{(\%SiO_2 + 0.84\% P_2O_5)}$$

Se requiere de una escoria de alta basicidad para la desulfuración como lo muestra el grafico 4.4:

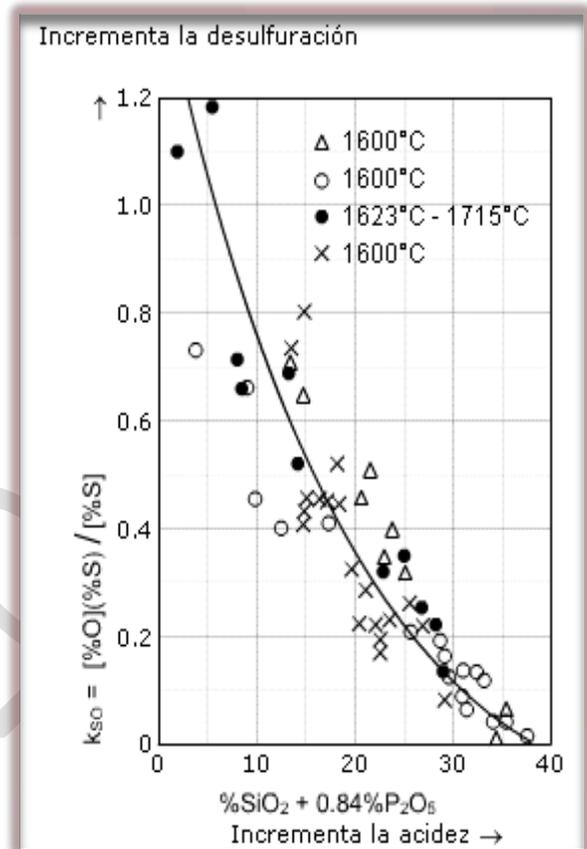


FIGURA 3.6: VARIACION DE LA ACIDEZ DE LA ESCORIA

FUENTE: UNIVERSITY STEEL

3.2.1 MÉTODOS Y ESTÁNDARES PARA CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS.

Estándares aplicables a la escoria del alto horno

La escoria refrigerada de alto horno cuenta con los requerimientos de ASTM D1241, de la agencia nacional, y del departamento local de carreteras para macadam y bases de agregados triturados. Los productos recomendados por Los estándares del departamento local de carreteras son aplicables para escoria granulada para ambos base y sub-base.

Los métodos de análisis. En primer lugar, en la escoria de acero se analizaron muestras de los principales componentes (aluminio, calcio, carbono, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, silicio y azufre). El Análisis de carbono fue llevada a cabo por la sociedad americana de pruebas de materiales por el método ASTM E 1019-83, para el azufre el Método ASTM E350-90, el magnesio por el método ASTM E663-86. El método ASTM 1085-87 se utilizó para analizar de aluminio, calcio, hierro, manganeso, fósforo y silicio. En segundo lugar, los procedimientos de análisis de la EPA de los E.U.A. Los métodos de prueba para la evaluación de los desechos sólidos (USEPA SW-846) se han seguido para lograr el nivel más bajo de detección de metales de menor concentración (antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo total, cromo hexavalente, Cobalto, cobre, plomo, mercurio, níquel, selenio, plata, talio, estaño, vanadio y zinc). En E.U.A. el Método EPA 7197 se utilizó para el análisis de cromo hexavalente (CRVI), y el E.U.A. Método EPA 7471 se utilizó para el análisis de mercurio. El EPA de los E.U.A. método de digestión acida el método de análisis 30510B y Método de análisis 6010 se utilizaron para el análisis de los componentes de metales restantes.

Las pruebas de Lixiviación ácida y neutra se realizaron en cada muestra. El procedimiento de característica lixiviación de toxicidad (TCLP), la prueba se llevó a cabo para determinar la movilidad de los metales de la escoria bajo condiciones ácidas (40CFR 260,11, el Apéndice II). Este análisis se realizó para el total de los metales de acuerdo a la EPA de los E.U.A. SW-846 Método 1311 ⁽¹⁶⁾. Para evaluar la movilidad de los metales en escorias, en condiciones, bajo el agua destilada ASTM ensayo de lixiviación (método ASTM D 3987) se ha realizado en un número representativo de muestras de cada tipo (cinco para el BF, cuatro para el BOF, y seis muestras de la escoria de EAF). Las muestras utilizadas para el análisis de tamaño de partículas se obtuvieron a partir de las muestras originales antes de su trituración. Tres muestras representativas fueron seleccionadas de cada tipo de escoria desde el tamaño más pequeño de las muestras presentadas por las fábricas (por ejemplo, las muestras se definen como "finos"), y las distribuciones de tamaño de las partículas se determina mediante el método ASTM D422. ⁽⁹⁾

CAPITULO CUATRO

PROPUESTA DE USO DE ESCORIA

4. INTRODUCCIÓN

4.1 AGREGADOS ASFALTICOS

4.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS REQUERIDAS

4.2.1 TAMAÑO DE PARTICULA Y GRADUACION DE LOS AGREGADOS

4.2.2 RESISTENCIA AL DESGASTE

4.2.3 DURABILIDAD O RESISTENCIA AL INTEMPERISMO

4.2.4 DENSIDAD RELATIVA

4.2.5 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

4.2.6 OTRAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

4.3 PROCESO PARA MEJORA DE ESCORIAS

4.4 DEMANDA DE ESCORIA PARA ESTE USO

4. INTRODUCCIÓN

La construcción de carreteras en un país es un índice de su grado de desarrollo económico. En México el incremento en este renglón ha venido tomando una gran importancia en las últimas décadas, lo que trae como consecuencias la incorporación a la sociedad de poblaciones marginadas, una mejor distribución de productos agrícolas en el país y el crecimiento económico de poblaciones productivas.

Las condiciones climatológicas, tipos de materiales de la zona, cantidad de personal, equipo y herramientas son algunos factores que determinan los procedimientos a seguir para conservar la calidad y el valor de la obra.⁽¹¹⁾

4.1 AGREGADOS ASFALTICOS

Los agregados constituyen del 88 al 96% del peso de un pavimento, o algo más del 75% del volumen del mismo. Los materiales más comunes son la piedra partida o escoria, la grava triturada o no triturada y la arena. A veces también se emplea material de relleno finamente dividido.⁽⁸⁾

El término agregado se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub-bases y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para bases, sub-bases, superficies de rodamiento y estructuras de drenaje.

4.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS REQUERIDAS.⁽²¹⁾

Las propiedades más importantes de los agregados que se usan para la construcción de carreteras son.

- Tamaño y graduación de la partícula.
- Dureza o resistencia al desgaste.
- Durabilidad o resistencia al intemperismo.
- Densidad relativa y absorción.
- Estabilidad química
- Forma de la partícula y textura de la superficie.

En los siguientes párrafos se estudian estas propiedades con mayor detalle.

4.2.1 TAMAÑO DE PARTICULA Y GRADUACION DE LOS AGREGADOS

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las carreteras es la distribución de los tamaños de partícula al mezclarlos. La graduación de los agregados, esto es, la combinación de tamaños de partículas en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia y la economía de la estructura del pavimento.

Se usa un análisis granulométrico para determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de partícula en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo a cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente. Las cribas se agrupan has arriba la que tiene la abertura mayor y debajo aquellas con aberturas sucesivamente más pequeñas. La muestra de agregado se agita con un vibrador mecánico de mallas o manualmente y se determina el peso del material retenido en cada criba, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original.⁽⁶⁾ En el método T27 de AASHTO⁽³⁾ se dan los procedimientos de tallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. El procedimiento análogo en México es el M-MMP-4-04-002.

Por lo regular, se grafican los datos del análisis granulométrico en una carta de graduación de agregados, cuyo ejemplo se presenta en la siguiente figura 4.1. Con la ayuda de esta carta, los ingenieros determinan la graduación de agregados que prefieran y hacen que esta se ajuste, para los proyectos de carreteras, a los límites especificados, como se ilustra en la figura 4.1.

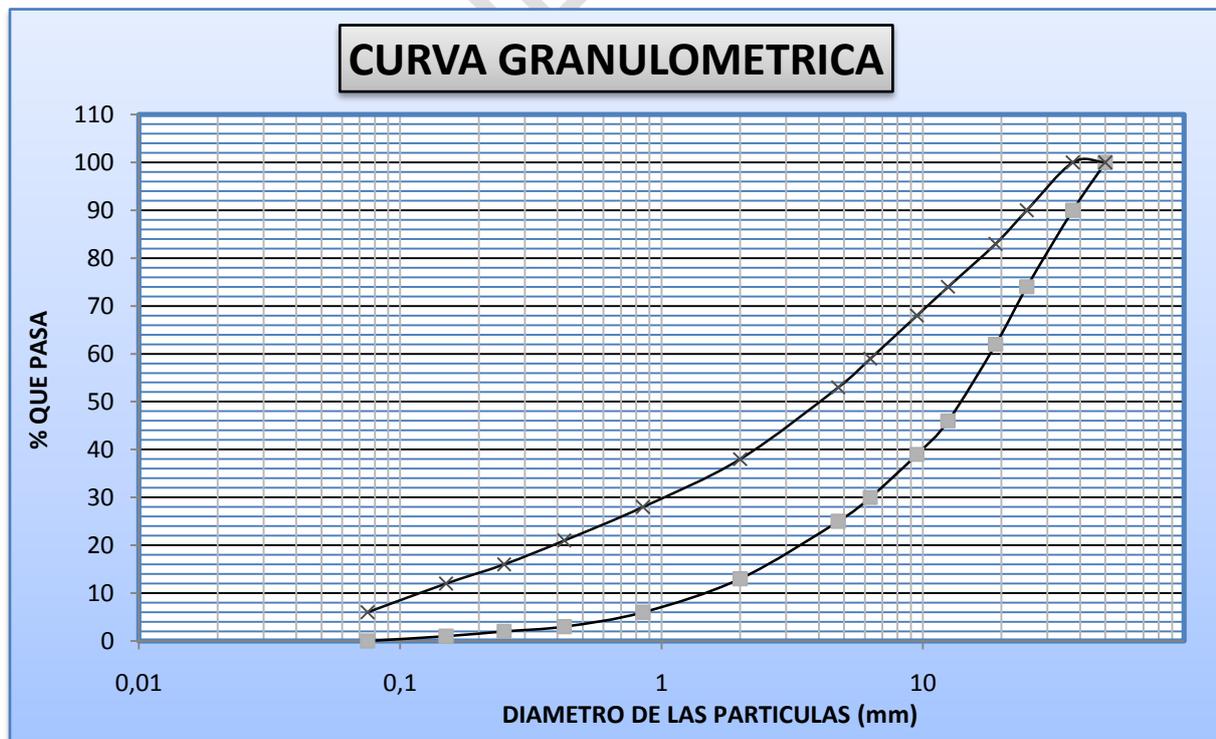


FIGURA 4.1 CURVA GRANULOMETRICA ESPERADA
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de $2\frac{1}{2}$, 2, $1\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 80, 100, 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como No. 4, No.10, etc.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla N.10 (esto es, con partículas mayores de 2mm) se le conoce como agregado grueso o gravas. Al material que pasa por la malla No.10 pero que queda retenido en la malla No.200 (partículas mayores que 0.075mm) se le conoce como agregado fino o arenas. El material que pasa por la malla No.200 se llama fino.

Objetivo de esta prueba

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo (escoria de acero) empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura mas grande, hasta llegar a las más cerradas. De tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje al total y definir la masa que pasa.⁽²⁴⁾

Esta prueba se realizó en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, obteniendo como resultado la grafica de la figura 4.2:

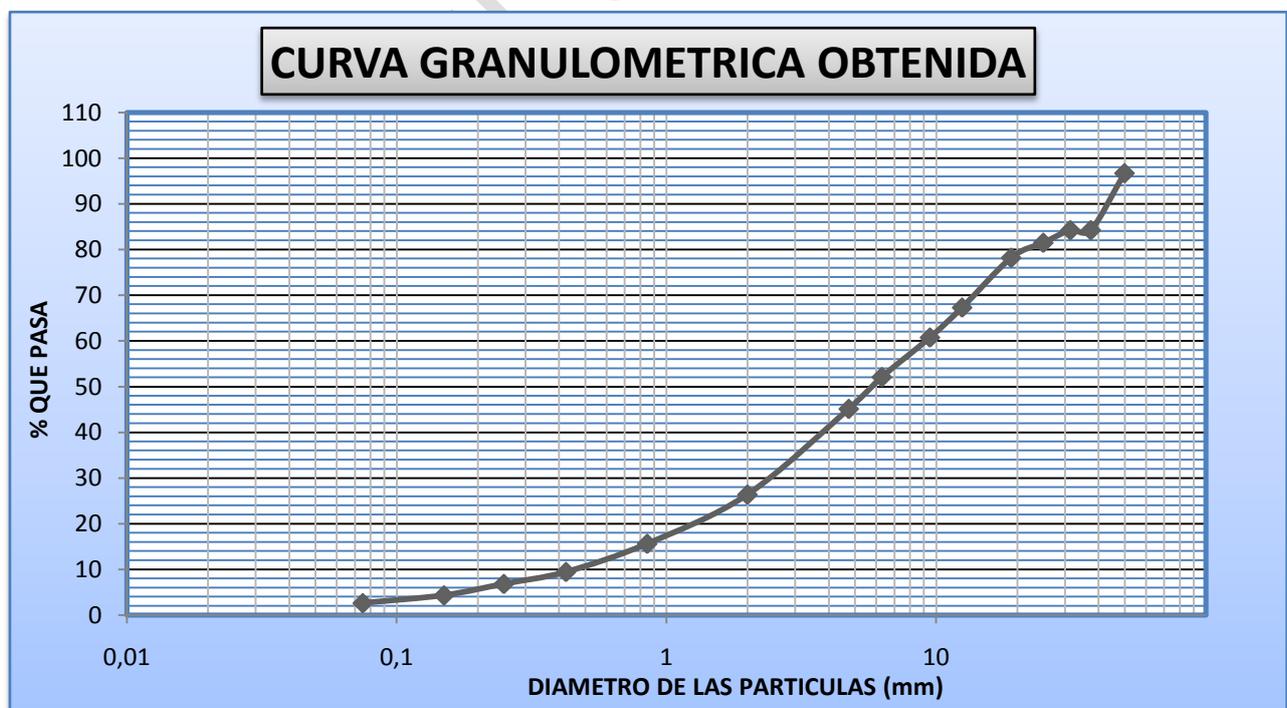


FIGURA 4.2 CURVA GRANULOMETRICA OBTENIDA

FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

De acuerdo con el procedimiento N-CMT-4-04/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la curva granulométrica obtenida no cumple con las características técnicas de calidad para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Esto se debe principalmente a que la escoria de acero no estaba debidamente triturada, analizando la curva y los datos hay un punto donde cambia de pendiente la curva; esto fue ocasionado por que en la malla de 1¹/₂” no retuvo nada de material lo que explica que dos puntos tengan el mismo valor en el porcentaje que pasa.

En las siguientes graficas se podrá observar la diferencia que existe entre la grafica obtenida y la grafica que determina la SCT.

La grafica 4.3 muestra los requerimientos granulométricos para un tipo de carpeta asfáltica de granulometría densa únicamente para transito esperado de un millón de ejes equivalentes o menor:

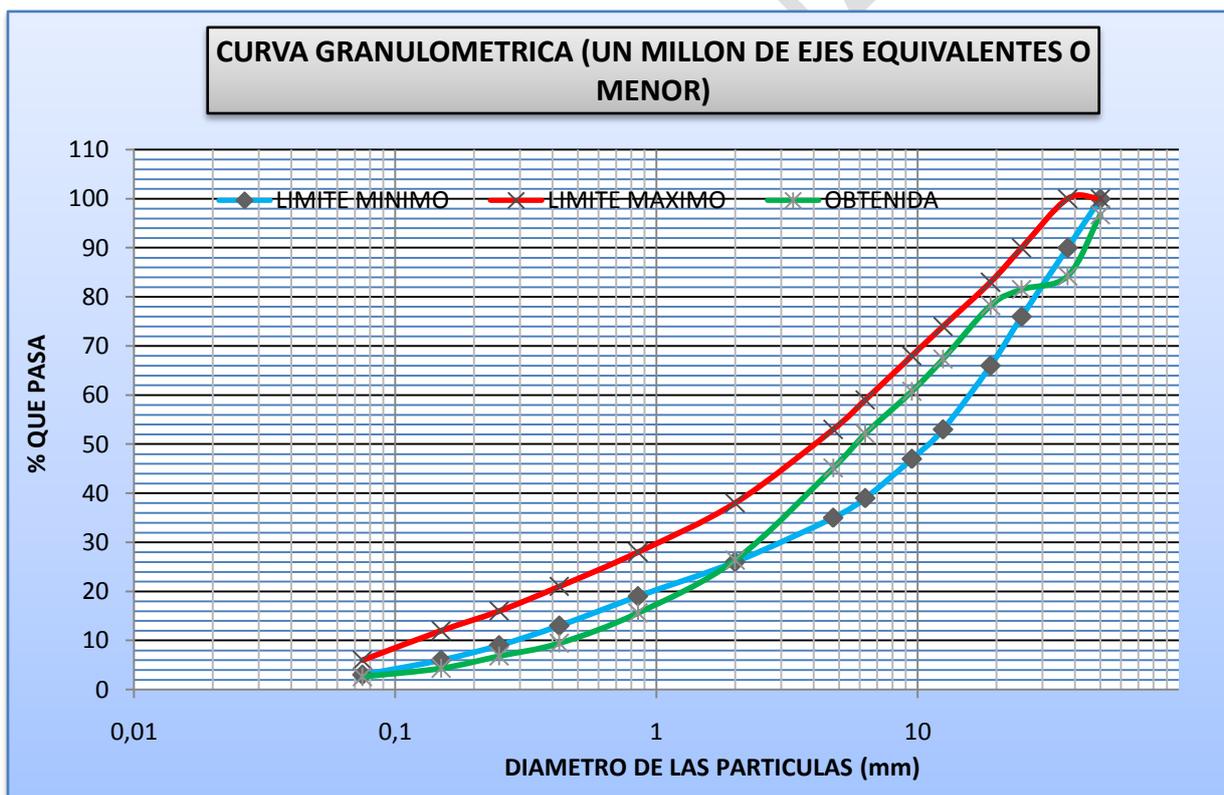


FIGURA 4.3 CURVA GRANULOMETRICA PARA CARPETAS ASFALTICAS CON UN TANSITO ESPERADO DE UN MILLON DE EJES EQUIVALENTES O MENOR
FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

La grafica 4.4 muestra los requerimientos granulométricos para un tipo de carpeta asfáltica de granulometría densa con un tránsito esperado mayor a un millón de ejes equivalentes:

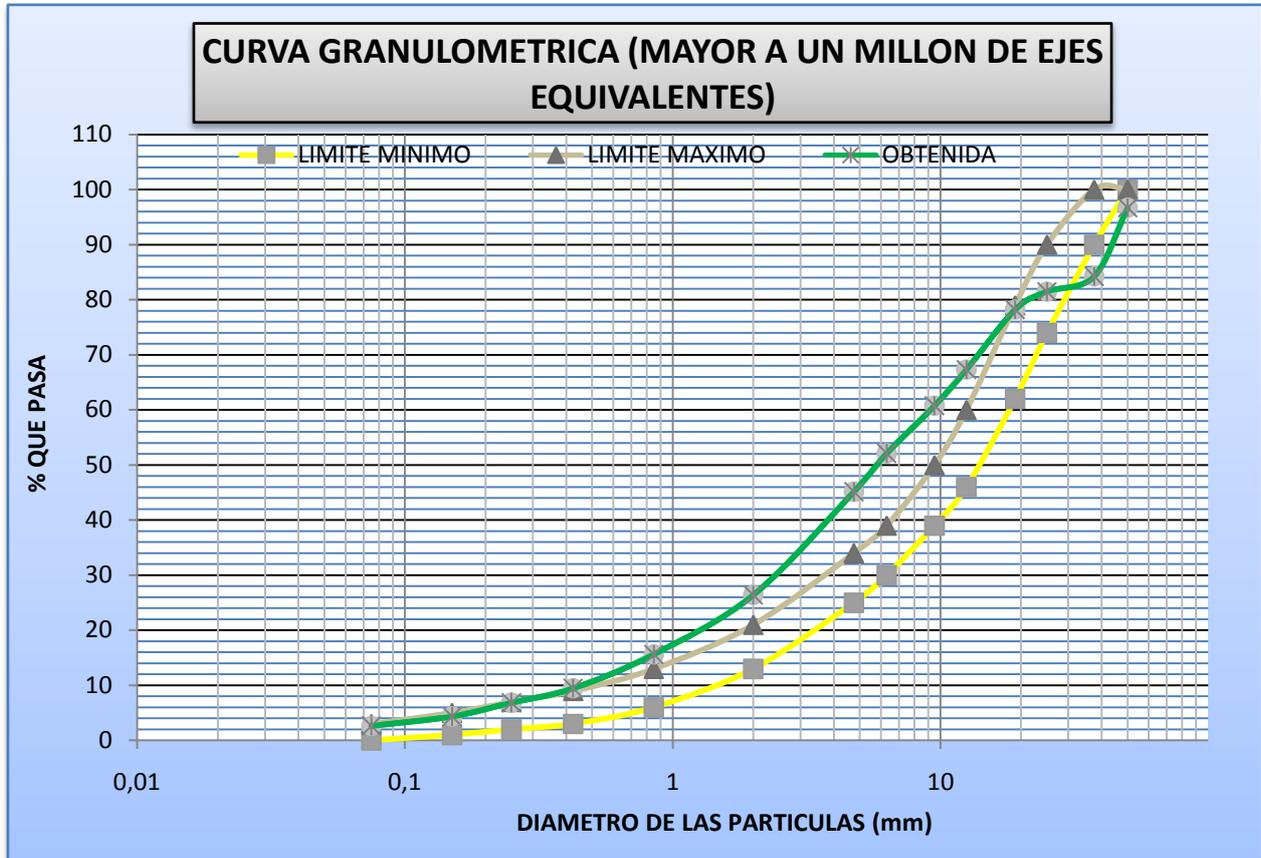


FIGURA 4.4 CURVA GRANULOMETRICA PARA CARPETAS ASFALTICAS CON UN TRANSITO ESPERADO MAYOR A UN MILLON DE EJES EQUIVALENTES

FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

Se puede observar que la curva obtenida no está dentro de estos límites; con este análisis de las curvas se podría formular la siguiente pregunta ¿Por qué no se repitió la prueba a fin de ajustarla a los requerimientos que la SCT determina? La respuesta es sencilla ya que la escoria de acero con la que se trabajó estaba limitada, apenas contábamos con 10kg y esta no representaría un lote de escoria real y la curva sería muy engañosa.

4.2.2 RESISTENCIA AL DESGASTE

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles. La maquina que se usa en la prueba de abrasión de los Ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes en posición horizontal. Véase la figura 4.5. Se monta en la superficie interior del cilindro un anaquel portátil que alarga la longitud del cilindro.

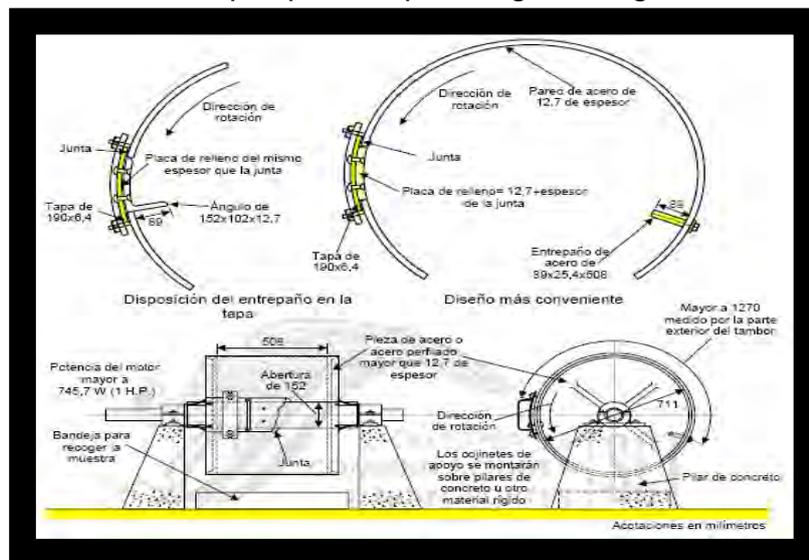


FIGURA 4.5 MAQUINA DE LOS ANGELES

FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Para ejecutar la prueba de abrasión de los Ángeles, se coloca dentro del cilindro una muestra limpia del agregado que se ha de probar junto con un peso estándar de esferas de acero como carga abrasiva. El tambor se hace girar 500 veces a una velocidad de 30 a 33rpm, después de lo cual se retira la muestra de agregado y se agita en una malla del No.12 (1.7mm). El material retenido en la criba se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T96 de AASHTO⁽⁶⁾ da un procedimiento detallado para esta prueba, el procedimiento análogo en México es el M-MMP-4-04-006.

Objetivo de la prueba

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos (escoria de acero) empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es

sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la mas que pasa la malla No. 12 (1.7mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.⁽²⁴⁾

Esta prueba se realizo en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, obteniendo los resultados de la tabla 4.1:

PRUEBA	RANGO DE TAMAÑOS	PESO INICIAL (g)	PESO RETENIDO (g)	RESULTADOS %
A	2"-1 ¹ / ₂ "	1080	810	25
B	1"-1 ¹ / ₂ "	810	630	22,22
C	³ / ₈ "-1 ¹ / ₄ "	1080	800	25,93
D	No.4	1080	795	26,39

TABLA 4.1 RESULTADOS DE LA PREBA DE LOS ANGELES
FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

De acuerdo al procedimiento N-CMT-4-04/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los valores obtenidos cumplen con las características técnicas de calidad para materiales pétreos para mezclas asfálticas. El máximo porcentaje de desgaste de los Ángeles permitido por la norma es del 35% para un tipo de carpeta asfáltica con un tránsito esperado menor o igual a un millón de ejes equivalentes lo cual observando los datos; estos están dentro de lo permitido. Para un tipo de carpeta asfáltica con un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes el máximo porcentaje de desgaste de los Ángeles permitido por la norma es del 30%, por lo tanto si cumple con los requisitos técnicos de calidad para esta prueba.

4.2.3 DURABILIDAD O RESISTENCIA AL INTEMPERISMO ACELERADO

Comúnmente, la durabilidad de los agregados se mide con una prueba de integridad, como se describe en el método T104 de AASHTO⁽⁶⁾. El procedimiento análogo en México es el M-MMP-4-04-008. Esta prueba mide la resistencia de los agregados a la desintegración en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Simula el intemperismo de los agregados que existen en la naturaleza.

Para la prueba se sumergen fracciones conocidas del agregado que se ha de probar en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Luego se retira el agregado y se seca en un horno hasta que alcance una masa constante. Se repite este proceso par a un número especificado de ciclos, normalmente cinco. Después de los ciclos alternados de mojado y desecación, se divide el agregado en fracciones haciéndolo pasar por las mallas y se

determina para cada fracción el porcentaje de pérdida de peso. el porcentaje de perdida se expresa como un promedio pesado. Para un tamaño dado de malla, el porcentaje de perdida promedio por peso es el producto del porcentaje que pasa por esa malla y el porcentaje que pasa por esa malla en el material original. El total de estos valores es el valor de prueba de perdida en porcentaje.

Objetivo de la prueba.

El objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos, mediante el empleo de una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, y medir la diferencia de su masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento.⁽²⁴⁾

Esta prueba se realizo en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en conjunto con el laboratorio de la planta piloto de la FES ZARAGOZA, obteniendo los resultados de la tabla 4.2:

No. Tamiz	PESO (g)	TAMIZ DE RETENCION	PESO RETENIDO(g)	% INTEMPERISMO
1,5"	1217,7	1"	1210	0,63
3/4"	158,6	1/2"	155	2,27
1/2"	418,6	1/2" A No 4	1470	5,63
3/8"	321,6			
1/4"	423			
No.4	394,5			
MASA TOTAL DE LA MALLA DE 1/2" A LA No4	1557,7			

PERDIDA POR INTEMPERISMO REPRESENTATIVA DE TODO EL MATERIAL =3,37 %

TABLA 4.2 RESULTADOS DE LA PREBA DE INTEMPERISMO ACCELERADO
FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

De acuerdo al procedimiento N-CMT-4-04/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los valores obtenidos cumplen con las características técnicas de calidad para materiales pétreos para mezclas asfálticas. Cabe mencionar que esta prueba no era o es necesaria realizarla o estar dentro de las especificaciones que nos marca la SCT, debido al tipo de carpeta asfáltica con el que se está trabajando, pero en la literatura se menciona que es una prueba muy importante y por tal motivo se decidió llevarla a cabo. La SCT pide este requerimiento de calidad para carpetas asfálticas construidas por el sistema de riego y el máximo porcentaje de pérdida de intemperismo es del 12% por lo cual como se menciono antes esta dentro de especificaciones.

4.2.4 DENSIDAD RELATIVA

La densidad relativa y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de concreto y de mezclas bituminosas. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica. Debido a que los agregados pueden contener huecos permeables al agua, se usan dos medidas de densidad relativa de los agregados; densidad relativa aparente y densidad relativa de la masa.

La densidad relativa aparente, G_A , se calcula con base en el volumen neto de los agregados, esto es, sin contar los huecos permeables al agua. Así,

$G_A = (M_D/V_N)/w$ donde,

M_D =masa seca del agregado

V_N =volumen neto de los agregados sin considerar el volumen del agua adsorbida

w =densidad del agua

La densidad relativa total, G_B , se calcula con base en el volumen total de los agregados, incluyendo los vacíos permeables al agua:

$G_B = (M_D/V_B)/w$ donde,

V_B =volumen total de los agregados, incluyendo el volumen de agua adsorbida

La diferencia entre las densidades relativas y la total equivale a los huecos permeables al agua de los agregados. El volumen de estos huecos se puede medir pesando los agregados secos y en condiciones superficiales secas y saturadas, esto es, con todos los vacíos permeables llenos de agua. La diferencia entre las dos masas es la masa de agua adsorbida, M_w . normalmente se expresa a la absorción de agua como un porcentaje de la masa del agregado seco,

Porcentaje de absorción = $(M_w / M_D) * 100$

Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la densidad relativa de los materiales pétreos (escoria de acero) empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua.

La prueba para la arena con finos, una vez separada de la grava, consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición, para obtener su densidad relativa.

Para la grava, una vez separada de la arena con finos, la prueba consiste en introducir la muestra de prueba en un depósito con agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, para después, al comparar con dicho volumen la masa seca de la muestra de prueba, obtener su masa por unidad de volumen y finalmente, compararla con la densidad del agua, para obtener su densidad relativa.⁽²⁴⁾

Esta prueba se realizó en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en conjunto con el laboratorio de la planta piloto de la FES ZARAGOZA, bajo el procedimiento M-MMP-4-04-003 obteniendo los resultados de la tabla 4.3:

DENSIDAD DE MALLA No.4	4.18	GA
DENSIDAD DE MALLA $3/8"$	3,49	GB

TABLA 4.3 RESULTADOS DE DENSIDAD RELATIVA
FUENTE: EXPERIMENTACION PROPIA

De acuerdo al procedimiento N-CMT-4-04/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los valores obtenidos cumplen con las características técnicas de calidad para materiales pétreos para mezclas asfálticas. El valor mínimo para la densidad relativa permitido por la norma es de 2.4 para un tipo de carpeta asfáltica con un tránsito esperado menor o igual a un millón de ejes equivalentes lo cual observando la tabla 4.3; este está dentro de lo permitido por la SCT. Para un tipo de carpeta asfáltica con un tránsito mayor a un millón de ejes equivalentes el mínimo valor para la densidad relativa permitido por la norma es el mismo 2.4 por ende si cumple con los requisitos técnicos de calidad para esta prueba.

4.2.5 ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS AGREGADOS

Ciertos agregados pueden ser inadecuados para una aplicación particular de construcción de carreteras debido a la composición química de las partículas del agregado. En las mezclas de asfalto, ciertos agregados que tienen una afinidad excesiva por el agua pueden contribuir a que se levante o remueva el asfalto, lo que conduce a la desintegración de las superficies de asfalto.

Se puede decir que un agregado de naturaleza “hidrofóbica” es aquel que tiene un alto grado de resistencia a la remoción de la capa de asfalto en presencia del agua. Por lo general, se puede suponer que la sustancia bituminosa en una mezcla bituminosa está presente en la forma de delgadas películas que rodean a las partículas del agregado y que llenan, por lo menos parcialmente, los espacios vacíos entre partículas adyacentes. Estas delgadas películas de material bituminoso se adhieren a la superficie de los agregados normales y contribuyen a la resistencia al corte de la mezcla; este efecto se considera generalmente como parte de la “cohesión” de la mezcla. Para una exposición continua al agua, ya sea en el laboratorio o en el campo, las mezclas bituminosas que contengan ciertos agregados muestran una tendencia definitiva a perder resistencia al corte, “fortaleza”, debido a una disminución en la cohesión que se debe principalmente al reemplazo de las películas bituminosas que rodean a las partículas del agregado con películas similares de agua. Los agregados que exhiben esta tendencia en un grado marcado y nocivo se llaman agregados “hidrofílicos”, que quiere decir “afines al agua”. Por lo contrario, los agregados que muestran poca o ninguna disminución en la resistencia debido a la remoción de la capa asfáltica se llaman “hidrofóbicos” o “repelentes al agua”.

Para juzgar la resistencia relativa a la remoción del asfalto de los agregados, se han utilizado varios procedimientos de laboratorio diferentes, siendo los más destacados la prueba de remoción del asfalto ⁽²⁾ y la prueba de inmersión-compresión ⁽¹⁾. La prueba de remoción del asfalto consiste en recubrir al agregado con el material bituminoso, sumergirlo en agua al agregado recubierto durante 16 a 18 horas y, luego, observar si el área total del agregado recubierto con una película bituminosa está por encima o por debajo del 95%. La prueba de inmersión-compresión consiste en comparar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de una mezcla bituminosa (preparados, moldeados y probados de manera estándar) con reproducciones que han sido sujetas a inmersión en agua por un tiempo definido y estandarizado.

Los agregados que se usan en las mezclas de concreto con cemento portland también pueden causar problemas relacionados con la estabilidad química. En ciertas áreas se ha tenido mucha dificultad con agregados que contienen sustancias nocivas que reaccionan adversamente con los álcalis presentes en el cemento. Generalmente, las reacciones adversas de álcali-agregado provocan la expansión anormal del concreto. Se han creado métodos (métodos

C227 y C289 de la ASTM) para detectar agregados con estas características dañinas y se incluyen indicaciones adecuadas en especificaciones típicas (por ejemplo, ASTM C33).

4.2.6 OTRAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Por lo general, las especificaciones para agregados que se usan en la construcción de carreteras tienen requerimientos relacionados con la forma de la partícula, la textura de la superficie y la limpieza del agregado. Normalmente, las especificaciones para agregados que se usan en las mezclas bituminosas requieren que los agregados sean limpios, resistentes, de naturaleza durable y libres de cantidades en exceso de piezas planas o alargadas, polvo, bolas de arcilla y otro material indeseable.

De igual manera, los agregados que se usan en las mezclas de concreto con cemento portland deben estar limpios y libres de sustancias nocivas como grumos de arcilla, sílice hidratada, limo y otras impurezas orgánicas.

Se garantiza generalmente la limpieza del agregado si se incluye en las especificaciones requerimientos relativos a los porcentajes máximos permisibles de diferentes sustancias dañinas presentes. Los requerimientos específicos a este respecto varían ligeramente para las diferentes dependencias.

4.3 PROCESO PARA MEJORA DE ESCORIAS

La utilización de las escoria del alto horno y BOF ha tenido aplicaciones en la construcción de edificios y carreteras desde hace más de cien años. El punto de partida para el desarrollo de las escorias ha sido sus propiedades físico-químicas. Este desarrollo ha conducido a la utilización de casi el 100% de las escorias producidas del alto horno y también escorias producidas del proceso de aceración. Nuevos métodos y aplicaciones están siendo desarrollados continuamente a fin de reciclar y utilizar todo tipo de escorias. Debido a ello se está debatiendo hoy en día si se trata de sub-productos o materiales residuales, debido a las consecuencias de los efectos ambientales y legislaciones ambientales.

Los efectos ambientales de las escorias pueden verse tanto como benéficas y como no benéficas. No hay duda de sus beneficios con respecto a las industrias para la construcción de carreteras, además como fertilizante y para la industria cementera conduciendo a la reducción de las emisiones de CO₂. Los efectos menos favorables son las emisiones posiblemente perjudiciales hacia la tierra y los mantos acuíferos debido a la lixiviación con las aguas pluviales de metales pesados, especialmente cromo.

4.4 DEMANDA DE ESCORIA PARA ESTE USO.⁽²⁶⁾

Los Agregados se definen como "arena, grava y piedra triturada y otros materiales a granel utilizados por la industria de la construcción," incluyendo agregados primarios, secundarios y reciclados. Los agregados Primarios son predominantemente de origen natural, arena, piedra triturada grava. Los agregados Secundarios son los residuos de productos derivados de minerales de trabajo, y existe una creciente producción de agregados reciclados transformados que abarcan la construcción y la demolición de residuos.

Piedra triturada

La Piedra triturada se utiliza para la producción de carreteras, cemento y otros materiales como el lastre de ferrocarril, con una gran proporción se utiliza para rellenos de construcción. La Arena es particularmente adecuada para la producción de revestimiento de asfalto, mientras que la piedra caliza se utiliza ampliamente para sub-bases de carretera.

Arena y grava

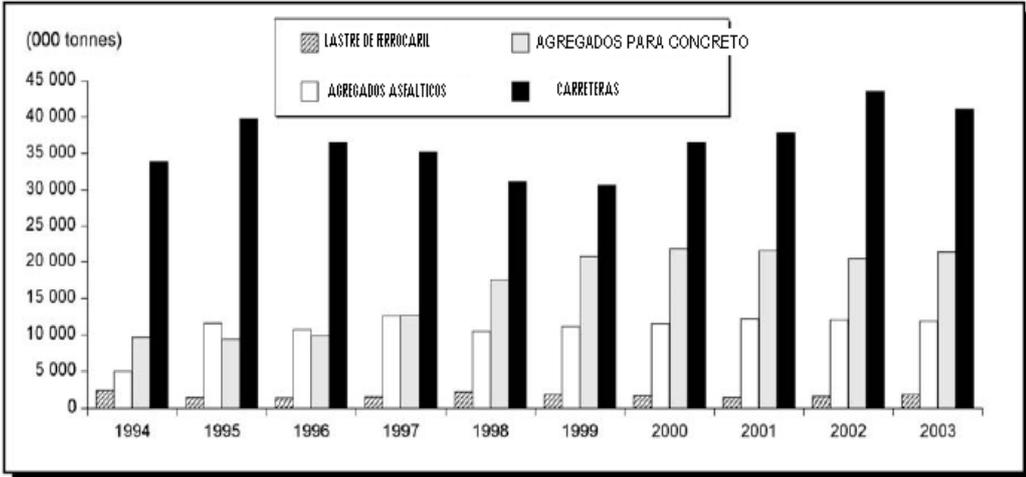
La arena y la grava se utiliza para revestimiento superficies de rodamiento, la fabricación de concreto, con una proporción mucho más baja que se utiliza para en la construcción es para relleno en comparación con piedra triturada.

Los principales consumidores domésticos de piedra triturada en 2001 fueron la mezcla de cemento (70%) y mezcla de asfalto bituminoso (30%). El 70% de este cemento se puede dividir entre: concreto (35%), mercancías (15%), venta al por menor en tiendas de materiales de construcción y depósitos (10%), y otros sectores como la grava y la roca de lastre, gaviones, lastre de ferrocarril, rampa de retención, etc., (10%). El 30% de asfalto de mezcla incluye las porciones consumidas en las calles, para base y sub-base, sobre todo el mantenimiento y la duplicación de carreteras. Con el consumo en el año 2001 del orden de 26.9 millones de toneladas. Dentro del país 50% de la arena producido se utiliza para la fabricación de concreto, y el otro 50% para los diversos agregados.

En otros países como Canadá el uso de piedra triturada para su uso como agregados asfálticos es considerable como lo muestra la figura 4.6.

FIGURA 4.4

PRODUCCION POR USO 1994 A 2003 DE PIEDRA TRITURADA



Source: Natural Resources Canada.

FIGURA 4.6 USO DE LA PIEDRA TRITURADA EN CANADA
FUENTE: NATURAL RESOURCES CANADA

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo realizado las cuales se basan en el material bibliográfico y en los resultados experimentales obtenidos:

- ⊕ En base a los resultados obtenidos en el laboratorio se observó que la escoria de acero puede ser utilizada como agregado asfáltico al cumplir con los requerimientos que la SCT requiere para agregados asfálticos.
- ⊕ La escoria de acero se debe curar o dejar expuesta al intemperie, durante seis meses antes de su uso como agregado asfáltico para evitar la expansión de la misma.
- ⊕ La curva granulométrica es el único requerimiento que no se ajusta a lo establecido por la norma, pero este requerimiento está en función de el tránsito esperado en ejes equivalentes, ya que si se manejan los límites máximo (para un tránsito esperado de un millón o menos de ejes equivalentes) y el límite mínimo (para mayor a un millón de ejes equivalentes) de granulometría densa; la curva granulométrica estaría desviada en el penúltimo punto. Ahora si se manejan por separados se aproxima más a la curva de un tránsito esperado de millón de eje equivalentes o menos.
- ⊕ Como ya se menciona en el punto anterior, la curva granulométrica no está bien graduada, pero esta es una variable que se puede ajustar a los requerimientos de la norma de la SCT.
- ⊕ En la prueba de desgaste de los Ángeles, la escoria de acero cumple con este requisito al cumplir con las especificaciones permitidas por la norma.
- ⊕ De igual manera en la prueba de intemperismo la acelerado, la escoria de acero cumple con este requisito al estar dentro de de las especificaciones de la norma.
- ⊕ En la prueba de densidad relativa la escoria de acero cumple con este requisito al entrar en el rango que la norma exige.
- ⊕ Con base a los puntos anteriores se concluye que el objetivo de este trabajo se cumplió, al proponer al menos un uso para la escoria de acero analizando los usos de escoria de acero de otros países.

SUGERENCIAS

- ⊕ Ajustar la curva granulométrica según el número de ejes equivalentes para así esta manera cumplir con las especificaciones que la norma exige.
- ⊕ Realizar las pruebas de remoción de asfalto y la inmersión-compresión para asegurar que la escoria de acero es un adecuado agregado para mezclas asfálticas.

BIBLIOGRAFIA

1. AASHTO Material, Part II, Tests. Designation T 84-81, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1982).
2. AASHTO Material, Part II, Tests. Designation T 182-82, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1982).
3. AASHTO Materials, Part I, Specifications, Part II, Tests, 13ra ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1982).
4. AISE, The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume, AISE, 1998, ISBN 0-930767-02-0.
5. Arcelor Mittal Lázaro Cárdenas. Datos de producción de acero hasta enero de 2008.
6. Atkins, Harold N. "Highway Materials, Soils, and Concretes" 2da ed. Reston Publishing Co., Reston, Va. (1983).
7. CANACERO
8. Clarkson H. Oglesby Laurence I. Hewes "Ingeniería de Carreteras, Calles, Viaductos y Pasos a Desnivel" 4TA Edición, México 1976. CECSA.
9. D. M. Proctor, K. A. Fehling. "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace and electric arc furnace steel industry slag" Environ & Science & Technology Vol. 64 No. 8 2000
10. International Iron & Steel Institute (IISI).
11. Ing. Nicolás Plascencia "Conservación y pavimentos" colegio de ingenieros civiles de México.
12. Jeremy A. T. Jones. Nupro Corporation "Electric Arc Furnace Steelmaking" American Iron and Steel institute.
13. Jeremy A. T. Jones & John Stubbles. "How a Blast Furnace Works" American Iron and Steel institute.
14. John Stubbles. "The Basic Oxygen Steelmaking Process" American Iron and Steel institute.
15. Jose Apraiz Barreiro "Fabricacion de Hierro, Acero y Fundiciones" 1ra Edicion, España, URMO S. A. DE EDICIONES
16. Method 1311 toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCPL); 40CFR CH 1, 1991.
17. National slag association.
18. Nsa blast furnace brochure.
19. Nsa risk assessment summary.
20. Nsa steel furnace brochure.
21. Paul H Wright Radnor J. Paquette "Ingeniería de Carreteras" 1ra Edición, 1993 México, Noriega Editores.

22. R. D. Morales, et al "A Mathematical Simulator for the EAF Steelmaking Process Using Direct Reduced Iron" ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 5, pp. 426–435.
23. Samuel Gonzales "Desfosforación de Arrabio Mediante el Uso de Escorias Sintéticas" 1998, Mexico IPN.
24. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
25. "Slag Atlas", 2da Edición, VDEh, Verlog Stahleisen GmbH, 1995.
26. The Minerals and Metals Sector "mineral aggregates".
27. USGS, DOI, Mineral Commodity Summaries: Iron and Steel Slag (Jan. 1998).
28. www.infoacero.cl
29. www.steeluniversity.org

BIBLIOGRAFIA

GLOSARIO

AASHTO: American Association of State Highway Officials (Asociación Americana de oficiales de Autopista Estatal y Transportación)

AGREGADO: Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, o la roca triturada, usada para ser mezclada en diferentes tamaños.

ALQUITRAN: Ligantes hidrocarbureados de viscosidad variable preparados a partir del residuo bruto obtenido en la destilación destructiva del carbón a altas temperaturas.

BITUMEN Ó BETUN: El betún es la fracción residual (el fondo) resultante de la destilación fraccionada del petróleo. Es la fracción más pesada y la que tiene el punto de ebullición más elevado. No debe ser confundido con el asfalto (al que a veces se llama betún de Judea o judaico, pero que es una mezcla de minerales y betún) ni con el alquitrán (que se obtiene de la destilación destructiva del carbón y es químicamente diferente).

BOF: Basic Oxygen Furnace (Horno Basico de Oxigeno)

BF: Blast Furnace (Alto horno)

ASTM: American Society for Testing and Material (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

CURADOS: De un mortero asfáltico o de una mezcla asfáltica con emulsión tienen para muchas personas el mismo sentido que fraguado. Se dice que es el estado físico de estas mezclas en el momento que son capaces de soportar cargas sin deformarse. Estos términos se han tomado de la técnica de los concretos hidráulicos.

EJES EQUIVALENTES: El término de ejes equivalentes se refiere al método para el diseño de una carretera en términos del número de vehículos que circularan por esta vía y el peso de estos vehículos.

EAF: Electric Arc Furnace (Horno de Arco Eléctrico)

ESCALA DE MOHS: La escala de Mohs es una relación de diez materiales ordenados en función de su dureza, de menor a mayor. Se utiliza como referencia de la dureza de una sustancia. Fue propuesta por el geólogo Friedrich Mohs y se basa en el principio que una sustancia dura puede rayar a una sustancia más blanda, pero no es posible lo contrario.

Mohs eligió diez minerales a los que atribuyó un determinado grado de dureza en su escala empezando con el talco, que recibió el número 1, y terminando con el diamante, al que asignó el número 10.

Cada mineral raya a los que tienen un número igual o inferior a él, y es rayado por los que tienen un número igual o mayor al suyo.

Tabla de valores Mohs

DUREZA	MINERAL	COMENTARIO	COMPOSICIÓN QUÍMICA
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre	$CaCO_3$
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo	CaF_2
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	Ortoclasa	Se puede rayar con una lija de acero	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo	Raya el vidrio	SiO_2
8	Topacio	Raya a todos los anteriores	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$
9	Corindón	Zafiros y rubíes son formas de corindón	Al_2O_3
10	Diamante	Es el mineral natural más duro	C

Por no guardar la misma proporción los intervalos se han establecido otras escalas de dureza, basadas en otros métodos, aunque la escala de Mohs aún se aplica en geología debido a su sencillez y facilidad para estimar la dureza de los minerales con medios simples.

DEFORMACION: La deformación de un pavimento es cualquier cambio que presente el pavimento con respecto a su forma original.

DOLOMITA: La dolomita, denominada de esa forma en honor al geólogo francés Deodat Dolomieu, es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$.

Abunda en la naturaleza en forma de rocas dolomíticas y se utiliza como fuente de magnesio y para la fabricación de materiales refractarios.

De color rosa y raya blanca, con brillo vítreo algo perlado, tiene dureza 3,5 a 4 en la escala de Mohs. Su densidad varía entre 2,86 a 3,10.

GRANATE: El granate pertenece a un grupo de minerales que presentan cristales en forma de dodecaedros o trapezoedros. Pertenecen a los neosilicatos y tienen la misma fórmula química: $\text{A}_3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$

HEMATITA: La hematita, hematites u oligisto es un mineral compuesto de óxido férrico (Fe_2O_3) y constituye una importante mena de hierro ya que en estado puro contiene el 70% de este metal.

LANA MINERAL: es un material aislante térmico acústico, fundido a temperaturas mayores de 1500 °C. El exclusivo y avanzado proceso de fabricación nos da como resultado, la fibra más ligera y limpia; además de que es la menos áspera que existe en el mercado. El proceso partiendo de un conjunto de minerales básicos no metálicos, del grupo de las andesitas y pequeñas adiciones de materiales correctivos. Garantizando un aislamiento térmico de una mejor densidad y un mejor espesor.

MELANITA: Granate parduzco o negro parduzco.

PELLET: son partículas finas de mineral de hierro mezclado con arcilla entrelazadas y tostadas dentro de duras bolas para la alimentación de altos hornos.

S.C.T: Secretaria de Comunicaciones y Transportes

TEXTURA VISICULAR: Las vesículas son los huecos ó burbujas que dejó el gas volcánico al salir de la lava. Cuando llegan a ser ocupadas por otro material ahí precipitado se llaman amigdalas o textura amigdaloides.

La textura vesicular se presenta sobre todo en la parte superior de los derrames de lava.

WOLLASTONITA: La wollastonita es un mineral del grupo de los silicatos. Recibe su nombre en honor al mineralogista inglés Sir W. H. Wollaston (1766 - 1828).