

011779

UN M

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL
(CAMPO DISCIPLINARIO: RESIDUOS PELIGROSOS)**

***“ALTERNATIVAS DE RECICLADO PARA LAS ESCORIAS
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA”***

TESIS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(AMBIENTAL)**

PRESENTA:

ING. MARIO RAFAEL GIRALDI DÍAZ

DIRIGIDA POR: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGOMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Metalurgia del hierro.....	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.2 Mineral de hierro.....	5
2.3 Acero a partir de hierro.....	8
2.3.1 Pretratamiento de la materia prima.....	8
2.3.2 Proceso en el alto horno.....	9
2.3.3 Aceración al oxígeno.....	12
2.4 Obtención de acero a partir de hierro esponja.....	15
2.4.1 Proceso de reducción directa.....	15
2.4.2 Hornos de arco eléctrico.....	17
2.5 Tipos de acero.....	18
2.6 La industria siderúrgica en México.....	19
2.6.1 Ambito internacional.....	19
2.6.2 Panorama nacional.....	24
3. Escorias.....	27
3.1 Antecedentes.....	27
3.2 Escorias de alto horno.....	27
3.2.1 Formación.....	27
3.2.2 Composición.....	29
3.2.3 Tipos de escoria del alto horno.....	31
3.2.4 Balance de materia.....	36
3.3 Escorias del proceso de aceración.....	37
3.3.1 Formación.....	37
3.3.2 Clasificación y propiedades.....	39
3.3.3 Balance de materia.....	42
3.4 Generación de escorias en México.....	43
4. Legislación ambiental	45
5. Minimización de residuos.....	47

5.1 Antecedentes.....	47
5.2 Residuos Sólidos Industriales.....	49
5.3 Residuos de la industria siderúrgica.....	54
5.4 Manejo y control de residuos.....	56
5.5 Tendencias actuales sobre minimización de residuos.....	60
6. Alternativas de reciclado para las escorias siderúrgicas.....	66
6.1 Las escorias y la producción de cemento.....	66
6.1.1 Antecedentes.....	66
6.1.2 Proceso de fabricación del cemento.....	67
6.1.3 La escoria como materia prima del cemento.....	75
6.1.3.1 Antecedentes.....	75
6.1.3.2 Obtención de la escoria granulada.....	76
6.1.3.3 Vitrificación de la escoria.....	77
6.1.3.4 Composición.....	79
6.1.3.5 Activación de la escoria.....	81
6.1.3.6 Hidratación de la escoria.....	81
6.1.3.7 Manufactura.....	82
6.1.3.8 El cemento con escoria.....	83
6.1.3.9 Propiedades.....	87
6.1.3.10 Uso de los cementos hechos con escoria.....	88
6.1.3.11 Ambito ambiental.....	88
6.1.3.12 Caso de estudio.....	90
6.2 Otras alternativas de reciclado para las escorias siderúrgicas.....	92
6.2.1 Introducción.....	92
6.2.2 La escoria utilizada en la industria de la construcción.....	94
6.2.2.1 Escoria enfriada al aire (ACBF).....	94
6.2.2.2 Escoria expandida y peletizada.....	96
6.2.2.3 Escoria del proceso de aceración.....	98
6.2.3 Utilización de la escoria como acondicionador de suelos.....	100
6.2.4 Areas de actual investigación para la escoria siderúrgica.....	103
6.2.5 Otros aspectos.....	105
7. Conclusiones.....	114
8. Glosario.....	117
9. Bibliografía.....	124

I. INTRODUCCIÓN.

En la industria siderúrgica se generan residuos en todas las etapas del proceso, desde el pretratamiento del mineral de hierro hasta el refinamiento y obtención de productos de aceración; no obstante, existe un subproducto siderúrgico denominado escoria que se produce en tales cantidades, en 1999 se estima que se generaron más de tres millones de toneladas, lo que da como resultado un residuo industrial que puede representar un problema ambiental, dada su acumulación año con año, y que en un momento dado, aunque no sea clasificado en principio como un residuo peligroso, por los volúmenes de generación y acumulación pueda llegar a serlo. Ahora bien, está escoria por sus propiedades físicas y químicas, ya investigadas, tienen utilidad como materia prima en materiales de construcción y en otras áreas de interés, lo que conduce a su aprovechamiento económico, encausándolo en otro proceso lo que representa una alternativa viable que resolvería el problema ambiental de su disposición.

Así al iniciar la presente investigación se plantea como objetivo general el proponer alternativas de reciclado para las escorias provenientes de la industria siderúrgica a través de una búsqueda bibliográfica y de una investigación de campo, tal objetivo se logró mediante el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una investigación bibliográfica a través de búsquedas en bibliotecas de Cámaras y medios electrónicos.
- Investigar la legislación ambiental en el ámbito nacional e internacional aplicable al manejo de las escorias siderúrgicas.
- Efectuar los balances de masa con el fin de hacer una estimación de las escorias generadas en México.
- Presentar las diferentes alternativas para la reutilización y/o reciclado de las escorias siderúrgicas a través de la información recabada y un análisis de costo de alguna de las alternativas presentadas.

Con el fin de cumplir con anteriores objetivos, la presente investigación quedó estructurada de la siguiente manera:

- Con el objetivo de entender ¿cómo y por qué? se generan las escorias se presenta una explicación breve sobre el proceso siderúrgico, las diferentes etapas que lo conforman, teniendo en cuenta el sistema productivo al respecto en México y algunas tablas con información el sector siderúrgico en México y su contexto internacional.

- Es importante conocer las propiedades de las escorias siderúrgicas ya que de esto dependerá la utilidad o aplicación posterior.
- Ya que en México no se tiene información por parte de las instancias gubernamentales de los volúmenes de escorias siderúrgicas generadas, se deben realizar los balances de materia típicos de los diferentes procesos de la industria del hierro y el acero con la finalidad de hacer una estimación de la cantidad de escoria producida.
- En la actualidad cualquier sector productivo está en busca continua de optimar y hacer más eficientes sus procesos, lo que implica reducir al mínimo posible sus residuos, y los que se generen buscarles alguna utilidad de modo que el impacto ambiental originados por las actividades humanas sea menor, parte del presente trabajo se sustenta en este principio, por lo que se dedica un capítulo para explicar su importancia al respecto.
- Con el fin de mostrar toda la gama de posibilidades que en la actualidad existen para la reutilización o reciclado de las escorias siderúrgicas se presenta un capítulo con información general sobre cada una de las alternativas recabadas y al fina se presenta el análisis de costo para la elaboración de unidades de construcción (ladrillos) a partir de las escorias.

2. METALURGIA DEL HIERRO.

2.1 Antecedentes.

La metalurgia ha estado ligada al desarrollo de la humanidad en todas sus etapas y ha sido clave en su evolución. La metalurgia reconocida actualmente como una ciencia interdisciplinaria, basada en principios científicos bien establecidos, en sus inicios fue más bien una labor artesanal, más ligada al arte (Cottrell, 1975).

Los primeros indicios que se tienen vienen del lejano oriente en los años 4000 A. C. encontrándose ornamentos y utensilios de oro y cobre, y la razón de esto era que estos minerales eran encontrados con relativa facilidad en su forma nativa, posteriormente se incorporaría la plata. Ya para esa época se tiene indicios de la utilización del hierro como una aleación de hierro-níquel de origen meteórico provenientes tiempo atrás de otros planetas, siendo descubierto probablemente por casualidad (The New Encyclopaedia Britannica)

Posteriormente, aplicando métodos de mayor rigor, fueron reducidas menas de cobre y plomo, así como la obtención del bronce por mezcla de minerales de cobre y estaño. Es en esta etapa, cuando el hombre descubre que al ser calentado el metal puede adquirir alguna forma deseada, como moldes y herramientas rudimentarias; al comienzo de la Edad de Bronce que tuvo una duración de entre 500 a 2000 años, en donde el hombre aprovecha ya no solo el martilleo para dar forma al metal, sino que dio paso a la energía térmica. Antiguamente fue el oro uno de los metales en que se aprovecharon con mayor frecuencia las técnicas descubiertas, debida a su demanda en joyería y ornamentos utilizados en ritos de las culturas de la época, lográndose para el año 1800 a. de J.C. la obtención del oro puro. Es de destacar que los pocos metales conocidos en ese momento, aparte del oro, eran bien aprovechados, el cobre y estaño ya eran utilizados por los pueblos Sumerios, la antigua Siria, China, la India y en menor medida por los egipcios (Metals Handbook, 1975).

Con el tiempo se fueron descubriendo otros métodos como el de la cera perdida llevada a cabo en Mesopotamia y el moldeo en arena en China dándose productos de mejor calidad. Existieron otras regiones donde hay evidencia de la explotación y utilización de los metales con cierto grado de avance, como era el caso de la península Ibérica, donde explotaban ricas minas de cobre y plata, en las islas Británicas, la región germánica y húngara, así como algunos lugares de África como lo que ahora es Tanzania. El acero o aleaciones parecidas a ésta, se cree fueron hechas alrededor de 1200 a. de J.C., dando con

ello comienzo a la Edad del Hierro, donde se generaliza la utilización de este metal, se inventaron las espadas de hierro, y otros objetos grandes y pesados de guerra y labor, siendo poco desplazado al bronce en al diferentes culturas. La reducción del hierro se hacía al calentar la mena con carbón vegetal a 1200 ° C, sin embargo existía aun el problema de separar el producto refinado de la masa esponjosa y porosa, que consiste simplemente en aplicar un golpe en caliente para expulsar el hierro en forma de glóbulos, es por eso que su uso tardó un poco en generalizarse que el mismo bronce. Una tribu establecida en el mar Negro fue famosa por sus trabajos en hierro y por el año 700 a. de J.C. inventaron el arte de convertir el hierro en acero por cementación o carburación del hierro forjado (Morral *et al.*, 1982).

Sófocles hace mención ya del temple del acero, con la llegada del imperio Romano y la gran demanda de objetos de guerra, así como para sus grandes construcciones todos los metales conocidos en esa época eran fuertemente explotados y comercializados en una vasta región que comprendía desde el lejano oriente hasta las Islas Británicas floreciendo la metalurgia. Los chinos que fueron un pueblo de vanguardia en el trabajo con metales, para comienzos de la era cristiana se había conseguido la fundición del níquel y el zinc. Al transcurrir la Edad Media existían procesos de forjado de metales establecidos ya desde hacia siglos atrás con pequeñas mejoras se dio al producto metálico mejores cualidades, pero en realidad se sabía muy poco de él porque de estas propiedades, es decir, se careció de una explicación con mayor ciencia. En realidad pocos avances se destacan en estos años, entre los más importantes están la estructuración de los hornos para permitir mayores temperaturas y una mayor rapidez de fusión del metal; así mismo se descubrió que al soplar aire se obtenía mejor combustión del carbón vegetal. Fue principalmente en España e Italia donde se perfeccionó la técnica de soplado mediante el aprovechamiento de una caída de agua. También en la Edad Media surgieron aleaciones de cobre y cinc, se fabricó con ello alambre. En el siglo XI comenzó la fabricación del latón principalmente en Alemania y Holanda (Morral *et al.*, 1982)

Debido a que la demanda de productos específicos fue creciendo, por ejemplo de cañones y campanas, lo que dio origen a la química cuantitativa y versificó las aleaciones existentes y así como sus usos, ya en 1455 se empleaban tubos de fundición para el sistema de agua en Dillenberg. Pero el redescubrimiento –ya en el siglo I era descrito– más importante del siglo XIV el de la producción de hierro líquido que directamente fuese moldeado en la forma deseada, esto transformó totalmente la metalurgia de la época y esta técnica no perdió vigencia hasta ya entrado el siglo XIX. Hasta entonces todos los avances hechos en la metalurgia habían sido en ocasiones por error o casualidad o con poca base científica, sin embargo comenzaron a surgir, ya entrada la edad Moderna, surgieron ciertos

estudios con cierta organización e investigación, los más destacados son los de Biringuccio (1540), Agrario (1556) y Erker (1574). En su libro "Pirotecnica" Biringuccio hace un tratado completo de minería y metalurgia con orientación sistemática. En el siglo XVI la demanda de productos metálicos era creciente por el comercio que gracias a la navegación entre continentes estaba en crecimiento, aunado a esto el aumento de la demanda de carbón utilizado como combustible para los hornos fue importante para la producción en grandes volúmenes. Otra obra que contribuyó al avance de la metalurgia fue hecha por Réaumur en 1722 titulada "El arte de convertir el hierro forjado en acero" en donde habla de la cementación o adición de carbón, además de describir otros métodos con otros metales; pero fue el sueco Bergmann quien en 1781 realizó una primera descripción del hierro forjado, del acero y de la fundición, todas estas contribuciones le dieron a la metalurgia un carácter formal (Metals Handbook, 1975 y The New Encyclopaedia Britannica). El gran desarrollo como una industria progresiva y con demanda fue aportada por los métodos Bessemer, Thomas y Siemens-Martin implantados entre 1855 y 1890 para fabricar acero. De aquí en adelante comenzaron a surgir estudios que fueron cimentando el progreso y desarrollo de la metalurgia; en 1868 Tchernoff publicó "La estructura del acero" en donde hace ciertos estudios y reflexiones acerca de ciertas técnicas en la fabricación del acero (Encyclopedia Americana, 1963).

Es importante también destacar que otras áreas de la ciencia fueron poco a poco interactuando con la metalurgia para explicar mucho de sus fenómenos, es así como en 1863 Sorby empleo el microscopio para el estudio de los metales con lo que nació la metalografía, publicó después de sus estudios en 1866 la estructura del acero, siendo éste minucioso y detallado con una metodología bien establecida, que le hace ser la base del desarrollo del examen microscópico de los metales. Otra obra maestra fue la publicada por Roozeboom (1900), en la que da un diagrama de estado de las aleaciones hierro carbono, con datos térmicos de Roberts-Austen con esto se elevó y ensanchó la industria siderúrgica (Cottrell, 1975 y Morral *et al.*, 1982). Todos estos hechos le dan forma actual a la metalurgia conformada por un conjunto de aportaciones procedentes de la Física del Estado Sólido, de la Termodinámica y de la Cinética Química, sin embargo ésta ya es un área tecnológica multidisciplinaria en donde contribuyen todas las ciencias, desde la química y minería hasta la economía, por lo que se encuentra en progreso constante.

2.2 Mineral de hierro.

El material, que es objeto de interés, procede de minerales que se encuentran en la superficie o formando estratos, metros debajo de la superficie en la corteza terrestre. Estos pueden encontrarse en su forma nativa o en combinación con otros elementos o compuestos.

químicos formando una gran variedad de minerales que lo contienen en diversos porcentajes, de donde deben ser extraídos a través de procesos que pueden ser simples o de gran complejidad donde va involucrado el costo de recuperación del material, importante aspecto para su realización. Se pueden clasificar en general los diferentes materiales en metálicos y no metálicos, siendo de nuestro interés los primeros, los cuales los encontramos de cuatro tipos ferrosos, no ferrosos, preciosos y nucleares. Los metales ferrosos son los que proceden del hierro y sus diferentes combinaciones y derivados como lo es el acero, mientras que los minerales no ferrosos se refieren al aluminio, cobre, magnesio, níquel, plomo, cinc, cromo, estaño, vanadio, tungsteno entre otros, los metales preciosos son el oro, plata y platino, y de los nucleares destaca el uranio (Begeman *et al* , 1969).

Los costos de obtención de estos materiales son variados y depende de muchos factores, como son abundancia, si se encuentran puros o en combinaciones, dificultad para ser concentrados y refinados, así por ejemplo el hierro es obtenido en un proceso de relativa simplicidad y poca energía, mientras que el aluminio requiere un proceso largo y complejo para su afinación con elevado consumo de energía, por esto es más caro el aluminio que el hierro, aun siendo 60% más abundante que los minerales del hierro. Además de que en mucho de los procesos de obtención del metal se obtienen una infinidad de subproductos, que tienen un interés comercial como es el caso de las escorias del alto horno en la producción del hierro, así como compuestos como el ácido sulfúrico obtenido en el proceso de obtención del cinc, por mencionar algunos, es por eso la gran importancia del diseño del proceso y el aprovechamiento de todos los aspectos desde los subproductos hasta la recuperación de energía (Begeman *et al* , 1969).

La importancia de los metales radica en sus propiedades físicas y químicas únicas entre las que destacan su elevada resistencia mecánica, brillo, su gran conductividad eléctrica y calorífica, ductibilidad, maleabilidad, acritud (características físicas); además de su tendencia a la pérdida de electrones de la última órbita para transformarse en iones (característica química), lo que los hace tener un sin fin de aplicaciones en todos los ámbitos. Una de las industrias de mayor importancia en la actualidad es la del hierro y el acero denominada siderurgia. El mineral del hierro es un metal que puro tiene un peso atómico de 58.5 uma, número atómico 26, punto de fusión 1530°C, punto de ebullición, 3000°C, es insoluble en agua y el alcohol etílico, tiene una densidad de 7.86 gramos por centímetro cúbico, es duro, dúctil, maleable de color blanco o gris, se oxida en el aire húmedo formando "orín", es disuelto y atacado por los ácidos diluidos, los ácidos sulfúrico y nítrico concentrados en frío no lo atacan apreciablemente pero si lo hacen en caliente (Whitten *et al* , 1992)

Los principales minerales del hierro son la siderita (CO_3Fe), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), hematites rojos (Fe_2O_3), oligisto cristalizado (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) principalmente (Losana y Ferrer, 1951) Las principales reservas del mineral en bruto se encuentran en China, Ucrania, Rusia, Australia, Estados Unidos, Kazakhstan y Brasil; las reservas en contenido de hierro están en Ucrania, Rusia, Australia, China, Estados Unidos, Brasil y Kazakhstan; los principales productores en 1999 del mineral del hierro fueron China, Brasil, Australia, Rusia, India, Estados Unidos y Ucrania entre otros, todos en el orden respectivo, se estimó una producción en el 2000 de 1010 millones de toneladas producidas en el mundo y unas reservas de contenido de hierro de 71 mil millones de toneladas (USGS, 2001).

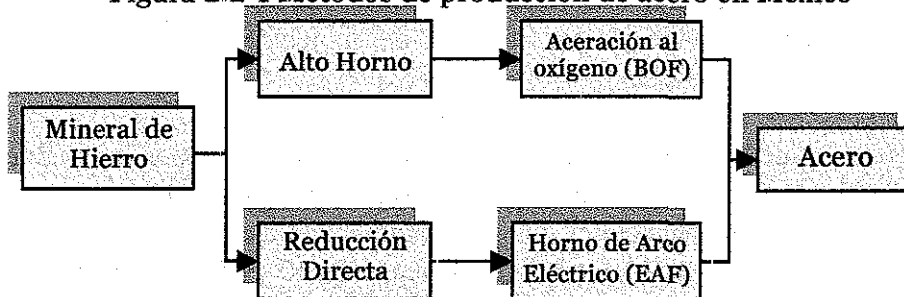
No todos los minerales encontrados con contenido de hierro son aceptables y rentables de ser utilizados en la obtención del metal, sólo se pueden considerar aquellos que tienen más del 15% de éste, minerales que son denominados ricos en este mineral son los que contienen más del 45%, medianos los que tienen entre 30 y 45% y pobres entre 15 y 30%. Los minerales que tienen hierro también contienen otros minerales que según sea el caso aumenta su valor o por el contrario lo disminuyen, por ejemplo el manganeso lo aumenta y el azufre y fósforo lo disminuyen, sin embargo el azufre es el más indeseado, por lo regular se exige tenga un contenido no mayor al 1% (Losana y Ferrer, 1951).

En una primera etapa de manejo de la materia prima es la recepción, descarga, almacenamiento y transporte. El mineral del hierro debe de ser concentrado, esto se logra mediante la trituración y posterior aglomeración; la trituración es el proceso en el cual se disminuye el tamaño del material destruyéndolo con ayuda de fuerzas externas obteniéndose con esto pedazos de tamaño aceptable, el grosor del mineral debe de ser por lo general de 20 a 100 mm dependiendo del método utilizado, dicha trituración se lleva cabo en aparatos llamados trituradoras y la desintegración en molinos. La trituración puede llevarse a cabo por aplastamiento, abrasión, hendimiento, percusión y por cualquier combinación de estos; los molinos más comunes son los de bolas y de cabillas. Posterior a la trituración y desintegración está el cribado y clasificación estos se realizan con rejillas y cribas mecánicas ayudadas con aire y agua, basándose en la diferencia entre las velocidades de caída de los granos de distinto grosor llamados a estos procesos de clasificación hidráulica o clasificación por aire, con estos procesos se puede llegar a obtener materiales de un grosor de 1 a 3 mm (Van Arsdle, 1965 y Voskobónikov *et al.*, 1982).

Existen básicamente dos sistemas de producción en el mundo y en México para la producción de acero en grandes cantidades: uno a partir de hierro fundido (arrabio) y por

reducción directa, estos dos métodos se ejemplifican en la figura 2.2-1. Dependiendo del sistema de producción a utilizar, existe toda una serie de instalaciones que se conforman para obtener el acero, principalmente en las grandes compañías productoras. A continuación se describen a grandes rasgos ambos métodos, ésto debido a la importancia que tiene entender el proceso que genera las escorias y con ello entender toda la problemática que involucra el manejo de las escorias (USGS, 2000).

Figura 2.2-1 Métodos de producción de acero en México



2.3 Acero a partir de hierro fundido.

2.3.1 Pretratamiento de la materia prima.

En este caso los complejos siderúrgicos están integrados por una serie de procesos que incluyen una batería de coquización, planta de sinterización y/o coquización, fundición en alto horno, proceso de aceración, tratamiento secundario del acero, proceso de moldeo, laminado en frío y en caliente. En el presente estudio es sólo de interés las etapas primarias de fundición (Murarka, 1987; USEPA, 1995).

El proceso de coquización consiste a grandes rasgos, en el calentamiento del mineral de carbón a altas temperaturas (900-1200°C) en ausencia de oxígeno, con el fin de remover los compuestos volátiles que el mineral contiene. El material generalmente utilizado es mineral de carbón bituminoso; se requieren de 1.30 a 1.35 toneladas de éste para producir una tonelada de coque. La manufactura de coque se realiza en un proceso por lotes, cada ciclo dura de 14 a 36 horas, las baterías de coquización se componen de una serie de 10 a 100 hornos individuales. El proceso de coquización envuelve toda una serie de instalaciones para el tratamiento de los subproductos generados, principalmente compuestos volátiles que salen del horno, entre los subproductos obtenidos destacan el amoníaco, sulfuro de hidrógeno, aceites ligeros, naftaleno, sulfato de amonio, gases del horno con poder de combustión utilizado en las propias instalaciones. Desde el punto de

vista ambiental ésta es una de las mayores áreas de interés debido a la contaminación tanto atmosférica como de residuos peligrosos (USEPA, 1995; USDE, 2000).

También existe la necesidad de aprovechar los finos que se producen en el pretratamiento del mineral, en su transporte, y los polvos que se generan en las etapas de fundición posteriores; de ahí surgen dos procesos denominados *sinterización* y *peletización*. La sinterización consiste en una mezcla de finos de mineral de hierro, polvillo de alto horno, dolomita, caliza y coque, la cual se transforma en una masa porosa que luego es quebrada en pedazos que permita utilizarlos posteriormente en el alto horno; el coque se utiliza como combustible para elevar la temperatura de la mezcla hasta alcanzar la fusión de las partículas e iniciar la aglomeración, los fundentes tienen la función de dar mayor cohesión, dándole consistencia aumentada así la calidad del sinter, con el encendido se forma una escoria semiliquida lográndose la unión de las partículas del mineral, con lo que se obtiene un sinter poroso listo para ser cargado al alto horno. Por otro lado la peletización surge por la necesidad de aprovechar las grandes cantidades del mineral de hierro de elevada finura que se van acumulando, dicho proceso se basa en el principio de la caída de una bola de nieve por una pendiente, que al rodar se le adhieren partículas, lo cual involucra los procesos de secado, incorporación de aditivos, boleado y endurecimiento; al final del proceso se obtienen unas esferas que son enfriadas mediante aire forzado y posteriormente pasan por un cribado, con lo que los pelets están listos para ser utilizados (Gilchrist, 1989).

2.2.2 Proceso en el alto horno.

Para la fundición del hierro (pig-iron) como primera etapa para su afinación se utiliza el denominado *alto horno* (blast-furnace) el cual data de los años 1300 d. de J.C., cuya descripción es como sigue, partiendo de la parte superior se tiene la boca o tragante, después un tronco o cono que toma el nombre de cuba, alcanzándose su máximo diámetro en lo que se denomina vientre, inmediatamente después sigue un cono invertido llamado atalajes, seguido de un tronco cilíndrico, en el cual hay unos orificios por los que se insufla el aire y algún tipo de combustible (el cuál, puede estar conformado por gas natural, gas del proceso de coquización o del propio alto horno, coque pulverizado, entre otros), que recibe el nombre de toberas y por último se encuentra el crisol que corresponde al lugar donde se recoge la fundición, poco más arriba tiene unas salidas laterales por donde se recoge la escoria. Es en los atalajes donde se alcanza la máxima temperatura y es aquí donde se favorecen las reacciones de reducción y fusión, el revestimiento refractario es de suma importancia ya que de acuerdo a su composición puede influir en las reacciones de escorificación e influir en el resultado de la calidad del

hierro obtenido y también en el mantenimiento y duración el horno mismo, esta formado por lo regular por ladrillos arcillosos de óptima calidad y de alúmina. El crisol debe estar construido de material resistente, ya que debe soportar altas temperatura, se utilizan ladrillos aluminosos ricos en alúmina (70 a 80% de Al_2O_3), cromita $(\text{CrO}_2)_2\text{Fe}$ y en algunos casos compuestos carbonados. La materia prima se traslada hasta el tragante a través de cangilones o bandas transportadoras (Losana y Ferrer, 1951; USDE, 2000)

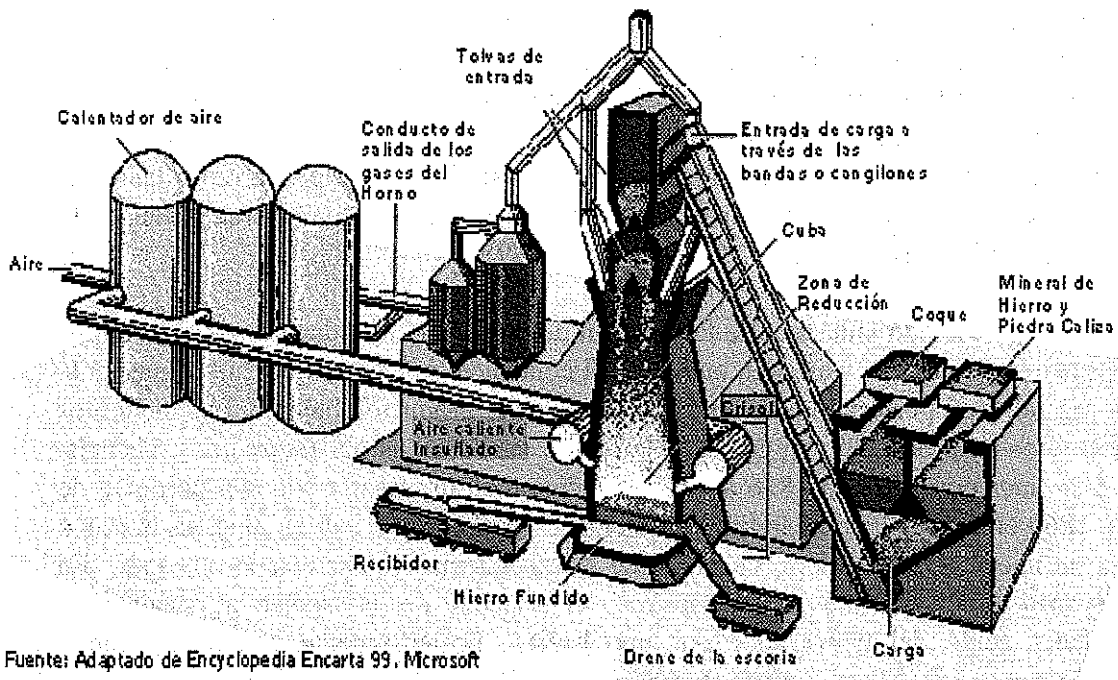
El funcionamiento del horno es básicamente de la siguiente manera: se alimenta la materia prima por el tragante, a través de un sistema cónico en donde por un lado entra la materia prima y por otro salen los gases del proceso, la materia prima consiste del mineral de hierro (tanto como mineral enriquecido, como en sinter y pelets), coque y piedra caliza principalmente. En la primera parte la ráfaga de aire caliente a 900°C se inyecta por medio de una serie de toberas cerca de la base del horno, en algunos casos va acompañado de algún combustible para incrementar la temperatura y la eficiencia al comenzar las reacciones del proceso, este aire quema al coque para producir monóxido de carbono desprendiendo calor, esto se alcanza entre los 1700 y 1800°C (es importante resaltar que se forma CO_2 , pero este reacciona con el exceso de C e inmediatamente se forma CO), el mineral de hierro (óxido) es reducido por el CO y otra parte se reduce por el propio coque desprendiendo CO y CO_2 más calor, gran parte del CO_2 reacciona con el exceso de coque para producir más CO que se emplea para reducir la siguiente carga (Higgins, 1983 y Whitten et al , 1992)

Cerca de los 1200°C , a expensas del Fe del FeO se forma Fe_3C , el cual disolviéndose en el hierro ya fundido rebaja su punto de fusión con lo que se forma una fundición líquida que cuele al crisol. La escoria se forma por la acción de los fúndente sobre la ganga del mineral y las cenizas del carbón (Losana y Ferrer, 1951), la piedra caliza denominada fúndente reacciona con la ganga de sílice en el mineral para formar la escoria fundida de silicato de calcio (CaSiO_3) que puesto en contacto con otras sustancias forma la verdadera escoria final, la primera formación de la escoria se manifiesta al inicio de la reducción directa, es decir, entre los 700 y 800°C (Begeman y Amstead, 1969), así mismo la escoria contiene otros óxidos que también son reducidos.

Finalmente el arrabio que se obtiene en el alto horno se puede dividir en tres tipos principalmente: el arrabio fino, destinado para la transformación posterior en acero, siendo el tipo dominante de los productos que se obtienen de altos hornos suele contener además del hierro y carbono, 0.3% a 1.2% de Si, 0.2 a 1.2% de Mn, 0.15 a 0.2% de P y 0.02 a 0.07% de S; el arrabio para moltería, que se utiliza, después de refundido para moldear piezas, los cuales se clasifican de acuerdo a su contenido de fósforo y por último

tenemos a las ferroaleaciones que se utilizan como aditivos en la fabricación de aceros y fundiciones, dentro de estas destacan el ferromanganeso, el ferrosilicio y la fundición espequeal que contiene de 15 a 25 % de manganeso (Voskobónikov *et al.*, 1982).

Figura 2.3.2-1 Esquema de un Alto Horno



Fuente: Adaptado de Enciclopedia Encarta 99. Microsoft

En la actualidad existen altos hornos con capacidad de hasta 10,000 toneladas por día y un diámetro en su parte más ancha de 14 metros, en años recientes la inyección de carbón, gas o combustible líquido acompaña al aire caliente con lo que disminuye los costos, además de tener un mayor control en el balance de calor. En muchos casos el carbón se muele finamente, se hace pasar por una criba, se calienta y se inyecta al horno a través de un sistema neumático de alta presión, transportándose por tuberías hasta el sistema de toberas donde es arrastrado por el aire caliente (Gilchrist, 1989). Los materiales de salida del proceso del alto horno son: el hierro fundido, escoria, gas de alto horno, polvos, lodos (provenientes del tratamiento de aguas residuales, originada esta agua, en la depuración de los gases que salen del horno), entre otros, información más detallada de los residuos generados por la industria siderúrgica, se presentan en el capítulo cinco, del presente estudio (USEPA; 1995).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.3 Aceración al oxígeno.

Ya obtenido el hierro fundido o arrabio, éste se vacía en moldes para su posterior uso, en este caso el siguiente paso es el de utilizarlo para la fabricación de acero. Dicho material se puede definir concretamente como aleación de hierro con carbono en una proporción que oscila entre el 0.03 y el 2 %. Los aceros especiales contienen además pequeñas proporciones de cromo, níquel, titanio, volframio, etc., con el fin de mejorar su dureza, maleabilidad u otras propiedades. La característica fundamental del acero es la capacidad de adquirir una gran dureza al ser templado (es decir, al ser calentado a una temperatura elevada y luego enfriado rápidamente) o al ser batido (golpeado repetidamente) en frío. Además, es considerablemente maleable, propiedad que pierde cuando la proporción de carbono sobrepasa el 2 % (Martínez, 1989).

El primer método industrial de fabricación del acero fue introducido por el británico B Huntsman en 1740, y consistía en aumentar el contenido en carbono del hierro mediante carbón vegetal, para posteriormente fundir en un crisol el producto obtenido. Los modernos procedimientos de producción en gran escala fueron introducidos por Bessemer y Thomas. Henry Bessemer consiguió en 1856 afinar la fundición al atravesarla con una corriente de aire. En 1860 el francés Pierre Martin y los alemanes Wilhelm y Friedrich Siemens dieron a conocer un nuevo tipo de horno, llamado de Martin-Siemens, alimentado con gas. En 1877 Sydney Gilchrist Thomas perfeccionó el sistema de Bessemer al sustituir el revestimiento ácido del convertidor por uno básico. Posteriormente se comenzaron a emplear hornos de arco eléctrico (Salvat, 1999).

Los convertidores Bessemer y Thomas (que posteriormente dieron origen a los hornos de aceración al oxígeno) consisten en que el arrabio echado en el aparato de fundición (convertidor) es insuflado por el aire, de esta manera el oxígeno del aire oxida las impurezas, en dicho proceso hay desprendimiento de calor, se eleva la temperatura más allá de los 1600°C, estos convertidores son recipientes periformes hechos de hoja de acero y revestidos interiormente, mientras que el revestimiento del convertidor Bessemer (ladrillos Dinas) es ácido, el del Thomas es básico (dolomita alquitranada). En la parte superior del convertidor se halla un orificio que se utiliza para echar el arrabio y sangrar el acero, en la parte de abajo lleva sujetado el fondo desmontable provisto de entradas de aire el cual se suministra a 0.30-0.35 MPa (Voskobónikov et al., 1982).

En el convertidor Bessemer o ácido, el aire que oxida el carbono, manganeso y silicio desprende una cantidad de calor suficiente para aumentar la temperatura de la masa hasta el punto de fusión del hierro dulce. Posteriormente se hace bascular el convertidor y

se cuela el acero líquido en una cuchara de transporte. En los convertidores Thomas o básico por la acción oxidante del soplado, se eliminan el carbono y el fósforo; este último actúa como importante elemento termógeno. La cal necesaria para estas reacciones se añade con la carga, se funde durante el soplado y se combina con el fósforo oxidado formando la escoria, que se utiliza como fertilizante. Con el método básico se obtienen fundiciones muy fosforadas (2 % P), y con el método ácido, aceros aptos para moldeo (Salvat, 1999).

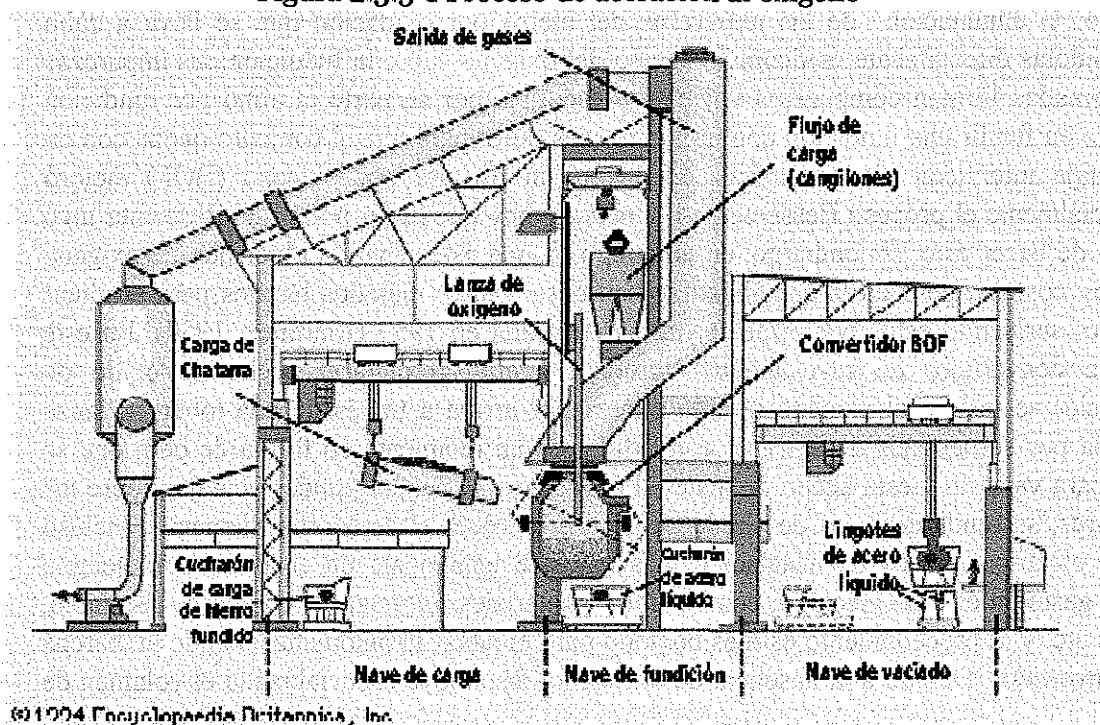
Las ventajas de los procedimientos Bessemer y Thomas son el alto rendimiento, la estructura sencilla del convertidor, un consumo pequeño de materiales refractarios debido a lo cual los gastos de instalación y los gastos para el afino son menores que en los procedimientos Martin-Siemens y la fabricación en los hornos eléctricos, sin embargo ambos procedimientos tiene un inconveniente, dan como resultado un acero con elevado contenido de nitrógeno (0.10-0.25 %), ya que el nitrógeno del aire se disuelve en el metal, lo que lo vuelve frágil y propenso a envejecimiento (Morral *et al.*, 1982).

Por eso en la actualidad la fabricación de acero se efectúa a través de hornos de inyección de oxígeno (denominado en inglés *Blast Oxygen Furnace*, BOF), Martin-Siemens (*Open Hearth Furnace*) y en hornos eléctricos, aunque el segundo está en desuso. Los métodos de fundición están basados en dos acciones principalmente, la oxidación y dilución; la eliminación de las impurezas del hierro por oxidación que se lleva a cabo quemándolas directamente mediante la acción del oxígeno sobre la fundición, las impurezas así quemadas forman compuestos volátiles o escorias, por su parte el afino por fundición consiste en fundir una fundición con un hierro más puro, para que el conjunto quede con un porcentaje intermedio de impurezas. La inyección de aire por oxígeno (BOF) mejoró sustancialmente el proceso Bessemer, sin embargo, hay que hacer notar que Bessemer tuvo la idea de hacer esto, sin embargo, en el tiempo en que éste vivió la obtención de oxígeno era muy costosa, pero en la actualidad se han desarrollado métodos baratos para producir oxígeno, surgiendo éstos por primera vez en Australia en 1952 (Martínez, 1989). En este tipo de convertidor de revestimiento básico (material refractario hecho de óxido de magnesio) se insufla el oxígeno de alta pureza por arriba a través de una tobera o lanza enfriada por serpentines de agua, el convertidor es un recipiente en forma de pera que se ladea para vaciarlo y está hecho de material refractario, teniendo grandes ventajas sobre los anteriores, su rendimiento es de alrededor de cuatro veces el de Martin-Siemens e incluso que el eléctrico, gastos de instalación más bajos, e igualmente en el afino, por ejemplo menor gasto en energía eléctrica, combustibles, materiales refractarios, equipo de recambio, salario etc. y el procedimiento es más cómodo para efectuar la automatización de la marcha del convertidor. Debido a la ausencia de nitrógeno, disminuye esencialmente el volumen de

gases de escape y las pérdidas de calor que se va junto con ellos (Voskobónikov et al., 1982). Debido a que la reacción del oxígeno con el hierro fundido es exotérmica, especialmente por la oxidación de sílice a sílica, así que para moderar la temperatura se le añade chatarra o también hierro esponja (hierro obtenido por reducción directa en estado sólido), la cual consume alrededor de 340 kcal por kilogramo de ésta. De ahí que el proceso para que sea ventajoso económicamente, como consecuencia de la interdependencia entre la obtención de hierro fundido y el acero a través del BOF, se debe tener un sistema bien integrado y optimizado, entre estos dos procesos, por lo general en la misma planta se produce el hierro fundido proveniente del alto horno e inmediatamente se acopla el proceso de la fabricación del acero (<http://www.britannia.com/bcom/eb/article/printable/1/o,5722,119871,00.html>).

Una de las grandes ventajas que trajo la introducción de los BOF fue su capacidad para aceptar desde 20 hasta 35% de chatarra o pedacería (en inglés *scrap*) junto con la carga de arrabio líquido; precisamente la diferencia entre los precios de la chatarra fría y el arrabio líquido ha motivado la búsqueda de tecnologías para incrementar lo más posible la carga de chatarra, uno de los éxitos que se ha tenido es el de adicionar al oxígeno insuflado combustóleo y carburo de silicio y calcio; durante el proceso, el carbón contenido en el hierro es oxidado, desprendiéndose en forma de CO (alrededor de 90%) y CO₂ (Martínez, 1989, USDE, 2000). En la fig. 2.3 2-1 se muestra un esquema a grandes rasgos de la fabricación de acero al oxígeno.

Figura 2.3.3-1 Proceso de aceración al oxígeno



Los hornos BOF se clasifican de acuerdo a la localización de la inyección del oxígeno (USDE, 2000):

- ✦ Soplado por arriba: el oxígeno se inyecta por la parte de arriba, a través del metal fundido por medio de una lanza retráctil enfriada con agua.
- ✦ Soplado por el fondo (QBM o Q-BOP): el oxígeno se inyecta por la parte de abajo del convertidor, acompañado usualmente con algún aditivo pulverizado.
- ✦ Soplado mixto: en éste el oxígeno se inyecta tanto por la parte de arriba como por debajo del convertidor.

El uso de oxígeno fue eventualmente preferido debido a los altos rendimientos de producción y al mismo tiempo se disminuyó el consumo de material refractario en el convertidor, se adapta fácilmente a diferentes grados de pureza del hierro, además las entalpías de las reacciones proveen el flujo de calor suficiente para el proceso. Se han desarrollado en este proceso batch de llenado y vaciado convertidores con capacidad de hasta 340 toneladas y 11 metros de altura, con un tiempo en cada ciclo de cerca de 40 minutos, requiriéndose un flujo de oxígeno del orden de $1500 \text{ m}^3/\text{minuto}$ a través de la lanza, la cual se sumerge hasta un metro dentro de la superficie del metal, teniendo una longitud promedio de 21 metros y un diámetro de 300 milímetros, los productos de desecho en el proceso con las escorias removidas de la superficie, monóxido de carbono y óxidos de hierro y polvos metálicos principalmente de cinc y plomo, para su control se utilizan sistemas de control de contaminación de aire basándose en filtros y lavadores de agua que retienen parte del polvo, se utilizan cerca de 380 litros de agua (1,000 galones) por cada tonelada de acero producido; el más reciente desarrollo en el proceso BOF ha sido la inyección por la base de algún gas reductor como el metano, lo que ha reducido la erosión del convertidor (Gilchrist, 1989; www.csa.com/routnet/epan/epanote.html).

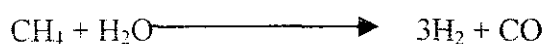
2.4 Obtención de acero a partir de hierro esponja

2.4.1 Proceso de reducción directa.

Por su importancia del uso del hierro esponja localmente y debido que éste es una de las principales materias primas utilizadas en el proceso de aceración mediante el horno de arco eléctrico a continuación se hará su descripción breve. Uno de los métodos utilizados en la depuración del mineral del hierro en los años recientes es el reducir el mineral en estado sólido, durante muchos años se investigaron las mejores técnicas que cumplieran con los objetivos de poder ser aplicados en procesos a gran escala, es así como surgió el uso de mezclas de gases de hidrógeno, monóxido de carbono o hidrocarburos, por

su alto poder reductor, sin embargo era difícil de superar al alto horno en volumen, en los años cincuenta se empezaron a realizar investigaciones, de donde surgieron varios métodos de reducción del mineral del hierro para obtener lo que se conoce como *hierro esponja* que es un hierro en forma porosa que, específicamente, es un hierro crudo obtenido al someter a la mena de óxido a una reducción gaseosa sin fundir. Existen procesos que usan reductores sólidos, de los que destaca el horno de retorta, en el que los minerales mezclados con la materia reductora sólida, en retortas son calentadas desde el exterior, es un proceso que requiere mucha energía y por lo tanto es caro aunque se obtiene un hierro esponja muy puro. Están también los procesos de reducción con gases (los más comunes), en lo que existen los hornos giratorios, hornos de cuba, lecho fluidizado y hornos de retorta (Morral *et al*, 1982).

Dentro de este último se encuentra el proceso denominado **HYL** el que se describirá a continuación debido a que fue desarrollado en México y por lo tanto es el utilizado localmente como alternativa a los ya mencionados. En 1957 la empresa HYLSA abrió su primera planta en Monterrey con una capacidad de 75,000 ton/año y se ha llegado en otras de sus instalaciones a producir 450,000 ton/año, así mismo dicho método se ha extendido a otras partes del mundo construyéndose plantas similares en Venezuela, Brasil, Zambia, Irak, Irán e Indonesia, aparte de las seis plantas en México. El proceso **HYL** utiliza una mezcla de gases rica en hidrógeno y monóxido de carbono para extraer el oxígeno del mineral de hierro, dicho gas reductor es obtenido por transformación catalítica de gas natural y vapor de agua. El gas natural y el vapor se inyectan a una tubería de acero inoxidable que se calienta con unos quemadores, con altas temperaturas y con la ayuda de los catalizadores ocurre la siguiente reacción química (Martínez, 1989),



La mezcla reductora de hidrógeno y monóxido de carbono salen del reformador acompañados de pequeñas cantidades de gas natural y bióxido de carbono, y se conduce a tres reactores, el gas entra frío en el último reactor, donde se encuentra con la mena prácticamente reducida, terminándose de reducir en esta etapa, enfriando al mismo tiempo el producto evitando con ello su oxidación, y calentándose el gas, el cual entra el segundo reactor, donde tiene lugar la mayor parte de la reducción, para luego pasar al primero, donde se encuentra con la mena oxidada a la que reduce parcialmente, posteriormente entra en acción un cuarto reactor que pasa a ser el primero con nueva carga, mientras el anterior tercero es descargado de producto, en este nuevo reordenamiento el que era segundo pasa a ser el último, y el que era primero pasa a ser el segundo, la duración del ciclo completo es de unas doce horas (Morral *et al*, 1982)

La carga del mineral de hierro está en forma de pequeñas esferas del tamaño de una canica (1 a 2 cm de diámetro). Alrededor del 30% del mineral es oxígeno asociado con el hierro que debe removerse al reaccionar con el gas reductor, dicho objetivo se cumple de 85 a 90% además de añadir al producto hierro esponja alrededor del 2% de carbono. Posteriormente a este proceso pasa directamente a hornos de arco eléctrico donde se funde junto con chatarra que generalmente se agrega, ya fundida la mezcla se pasa a una olla donde, en ocasiones, se hace el ajuste final de la aleación y obtener de esta forma el acero, finalmente se vacía en moldes para su posterior proceso de fabricación. Es decir, es un proceso completo desde el mineral hasta la obtención final del acero (Martínez, 1989). Entre las ventajas de este método se destaca:

- ◇ La disminución (85%) de la cantidad de azufre en las menas.
- ◇ Se utiliza más del 50% del gas reductor
- ◇ Se puede producir un incremento del porcentaje de reducción, hasta llegar casi al 100%, cambiando sólo el tiempo de reducción, aumentando el flujo del gas reductor en relación con la cantidad de mena procesada.

2.4.2 Hornos de arco eléctrico (EAF).

Está es una de las más viables alternativas para la obtención del acero con relación al proceso BOF, originalmente este tipo de hornos era usado únicamente para obtener acero de elevada calidad, en la actualidad es cada vez más frecuente su uso en los procesos que involucran chatarra o pedacería, la utilización de hierro esponja (hierro reducido del mineral en estado sólido, que es muy utilizado en México a través de un proceso inventado aquí, como ya se explicó anteriormente) y también hierro fundido, aunque en menor grado, teniendo como producto final un acero de buena calidad con lo que equilibra los costos del consumo de energía eléctrica. (Higgins, 1983). El proceso en horno eléctrico se realiza en un horno de arco que calienta directamente el baño de acero por debajo de la escoria y consigue la alta temperatura de trabajo necesaria. La carga se alimenta a un horno cilíndrico con cubierta interna de material refractario, este horno está equipado con electrodos de carbón; durante la carga, se retira la tapa del recipiente y se introduce la chatarra o pedacería y/o cualquier otro material de elevado contenido de hierro, como lo es el hierro esponja, o en su caso hierro fundido (en proporción mínima). Los fundentes (cal y dolomita) así como los agentes de aleación se añaden a través de unas entradas laterales del horno (USDE, 2000).

En los hornos EAF modernos aprovechan la energía química que se origina durante el proceso de fundición, esta energía química se origina entre otros casos por algún combustible de elevada energía, oxígeno, por constituyentes que contiene la chatarra y en

algunos casos por el calor del hierro fundido que se añade. El proceso es altamente exotérmico y durante la reacción se produce una considerable cantidad de CO que es de suma importancia en el arrastre de gases como el hidrógeno y nitrógeno, de manera que no se queden mezclados en el acero líquido. Algunos EAFs usan ferromanganeso como catalizador, para dar mayor energía y estabilidad al fundido; el tiempo de carga y residencia cuando se utiliza cien por ciento de chatarra o hierro esponja varía de 45 minutos hasta varias horas. Durante el proceso los fundentes agregados arrastran gran parte de las impurezas tales como fósforo, azufre, silicio, manganeso, carbón y pequeñas cantidades de metales pesados, formando escoria que flota y se retira (USEPA, 1995; USDE, 2000).

Debido a que en este tipo de hornos las condiciones imperante durante el proceso son más fácilmente controlables se pueden obtener aceros de mayor pureza y características especiales. La carga puede consistir de parte de arrabio y chatarra de acero o en su caso, como lo es regularmente, exclusivamente de chatarra y material reciclado del proceso, de acuerdo a la cantidad de estos es como se regula la calidad, además de que son añadidos otros materiales para eliminar impurezas como ya se menciono anteriormente (Encarta, 1999). Entre las ventajas que tiene el horno de arco eléctrico se destaca su capacidad para remover azufre, las condiciones generales de operación es limpia además la contaminación de la carga es difícil que se produzca, la temperatura puede ser controlada, el contenido de carbón puede ser ajustado a los niveles deseados, y la adición de elementos de aleación se puede hacer con precisión (Higgins, 1983).

2.5 Tipos de acero.

Clasificación del acero según la publicación *la llave de oro*:

- ❖ Acero común para construcción – cementación, nitrurado- para tornos automáticos
- ❖ Acero de bonificación - para rodamientos
- ❖ Acero para niveles, para temples de superficie, para extrusión en frío
- ❖ Acero de construcción tenaz al frío, resistente al hidrógeno comprimido, resistente al calor
- ❖ Acero de construcción para el extranjero
- ❖ Acero para herramienta no aleada
- ❖ Acero rápido
- ❖ Acero para trabajar en frío
- ❖ Acero para herramienta para trabajar en caliente
- ❖ Acero para herramienta del extranjero, comparación de normas
- ❖ Acero para válvulas
- ❖ Acero y aleaciones resistente a altas temperatura
- ❖ Acero no magnetizable

- ❖ Acero refractario
- ❖ Acero inoxidable y resistente a los ácidos
- ❖ Fundición de acero inoxidable, resistente a los ácidos y al calor
- ❖ Materiales adicionales para soldar aceros altamente aleados
- ❖ Acero inoxidable resistente a los ácidos y al calor del extranjero, comparación de normas
- ❖ Acero de construcción de grano fino, resistente a las influencias meteorológicas

Fuente: <http://www.cibermetal.com/metales/clas-aceros.htm>

2.6 La industria siderúrgica en México.

2.6.1 Ambito internacional.

En los primeros tiempos en que surgió la industria siderúrgica a gran escala, el proceso Bessemer tuvo un impulso y popularidad elevado, de 1870 a 1900 fue el más utilizado llegando incluso a representar poco más del 80% en el ámbito mundial allá por 1880, sin embargo a finales del siglo pasado se desarrolló el proceso Siemens-Martin (Horno a hogar abierto), el proceso Bessemer fue decayendo hasta caer en desuso, mientras el Siemens-Martin fue aumentando de manera gradual y constante y debido a lo rentable que resultaba de acuerdo con los estándares de la época (Morral *et al.*, 1982).

El horno a hogar abierto (Siemens-Martin) dominó prácticamente la producción mundial hasta los años sesenta en que comenzó a decaer, el proceso modificado de Bessemer o acero al oxígeno (BOF) empezó a ganar popularidad entre los industriales desde su arranque en los años cincuentas y poco a poco se ha ido expandiendo su uso, para ser el proceso de mayor utilización, en recientes lustros ha ganado también popularidad la fabricación de acero a través del horno de arco eléctrico, principalmente al hecho de que acepta la chatarra como materia prima, así como hierro obtenido por reducción directa (el cuál ha tenido aceptación mundial), convirtiéndose en un proceso alternativo al BOF (Morral *et al.*, 1982 y Martínez, 1989)

Según estadísticas reportadas por el Instituto Internacional del Hierro y el Acero (IISI, por sus siglas en inglés; en su página de Internet <http://www.worldsteel.org/> se pueden encontrar información más detallada sobre éstas y otras variable) en 1999 la producción mundial de acero que fue de 787.7 millones de toneladas que se repartió de la siguiente manera, proceso de aceración al oxígeno (BOF) 59.8%, horno de arco eléctrico (EAF) 33.4%, Siemens-Martin (horno a hogar abierto) 4.2% y otros 2.6%. En las siguientes tablas se da un panorama de la producción de la industria siderúrgica en el ámbito mundial, así como otros indicadores importantes, en los que México destaca:

TABLA 2.6.1-1. MAYORES PRODUCTORES DE ACERO EN 1998 Y 1999
millones de toneladas de acero crudo

País	1999		1998	
	Rango	Producción	Rango	Producción
China	1	123.7	1	114.6
Estados Unidos	2	97.3	2	98.7
Japón	3	94.2	3	93.5
Rusia	4	51.5	5	43.8
Alemania	5	42.1	4	44.0
Rep. Corea	6	41.0	6	39.9
Ucrania	7	27.5	9	24.4
Brasil	8	25.0	7	25.8
Italia	9	24.9	8	25.7
India	10	24.3	10	23.5
Francia	11	20.2	11	20.1
Reino Unido	12	16.3	12	17.3
Canadá	13	16.2	14	15.9
Taiwan	14	15.4	13	16.9
México	15	15.3	16	14.2
España	16	14.9	15	14.8
Turquía	17	14.3	17	14.1
Bélgica	18	10.9	18	11.4
Polonia	19	8.8	19	9.9
Australia	20	8.2	20	8.9
Sudáfrica	21	7.3	21	8.0
Holanda	22	6.1	24	6.4
Irán	23	6.1	25	5.6
Rep. Checa	24	5.6	22	6.5
Austria	25	5.2	26	5.3
Suecia	26	5.1	27	5.2
Rumania	27	4.4	23	6.4
Kazakhstan	28	4.1	32	3.1
Finlandia	29	4.0	29	4.0
Argentina	30	3.8	28	4.2
Eslovaquia	31	3.6	31	3.4
Venezuela	32	3.2	30	3.7
Indonesia (E)	33	2.8	34	2.7
Egipto	34	2.6	33	2.9
Arabia Saudita	35	2.6	36	2.4
Luxemburgo	36	2.6	35	2.5
Otros		26.7		27.6
Mundial		787.7		777.4

FUENTE: http://www.worldsteel.org/rends_indicators/figures_3.html

Tabla 2.6.1-2 PRODUCCION DE ACERO CRUDO POR PROCESO, 1999

	Producción Millones Toneladas	BOF %	Eléctrico %	Horno a hogar abierto	Otros %	Total %
Austria	5.2	90.7	9.3	-	-	100.0
Bélgica	10.9	82.2	17.8	-	-	100.0
Finlandia	4.0	77.6	22.4	-	-	100.0
Francia	20.2	62.4	37.6	-	-	100.0
Alemania	42.1	70.8	29.2	-	-	100.0
Italia	24.9	42.2	57.8	-	-	100.0
Luxemburgo	2.6	-	100.0	-	-	100.0
Holanda	6.1	97.9	2.1	-	-	100.0
España	14.9	28.1	71.9	-	-	100.0
Suecia	5.1	64.0	36.0	-	-	100.0
Gran Bretaña	16.3	77.6	22.4	-	-	100.0
Otros de la Unión Europea	3.0	14.2	85.8	-	-	100.0
Unión Europea (15)	155.2	61.9	38.1	-	-	100.0
R. Checa	5.6	88.4	10.5	1.1	-	100.0
Hungría	1.8	88.0	12.0	-	-	100.0
Polonia	8.8	61.6	34.1	4.3	-	100.0
Rumanía	4.4	74.1	20.1	5.8	-	100.0
R. Eslovaquia	3.6	93.6	6.4	-	-	100.0
Turquía	14.3	35.9	64.1	-	-	100.0
Otros	4.0	36.8	63.1	-	0.1	100.0
Otros de Europa	42.5	59.3	39.1	1.6	0.0	100.0
Rusia	51.5	58.9	12.8	28.3	-	100.0
Ucrania	27.5	52.4	4.4	43.2	-	100.0
Otras Ex-URSS	7.1	56.4	34.5	9.1	-	100.0
Ex-URSS	86.1	56.6	11.9	31.5	-	100.0
Canadá	16.2	58.5	41.5	-	-	100.0
México	15.3	35.0	65.0	-	-	100.0
Estados Unidos	97.3	53.8	46.2	-	-	100.0
TLCN	128.8	52.2	47.8	-	-	100.0
Argentina	3.8	48.7	51.3	-	-	100.0
Brasil	25.0	78.1	21.9	-	-	100.0
Chile	1.3	93.0	7.0	-	-	100.0
Venezuela	3.2	-	100.0	-	-	100.0
Otros	2.3	20.5	79.5	-	-	100.0
Centro y Sudamérica	35.7	64.6	35.4	-	-	100.0
Egipto	2.6	41.1	58.9	-	-	100.0
Sudáfrica	7.3	62.1	36.6	-	1.2	100.0
Otros de África	2.1	48.1	51.9	-	-	100.0
África	12.0	55.1	44.1	-	0.8	100.0
Irán	6.1	35.1	64.9	-	-	100.0
Arabia Saudita	2.6	-	100.0	-	-	100.0
Otros del Medio Oriente	0.9	-	100.0	-	-	100.0
Medio Oriente	9.6	22.2	77.8	-	-	100.0
PR China	123.7	66.3	15.8	1.7	16.2	100.0
India	24.3	53.9	32.1	14.0	-	100.0
Japón	94.2	69.5	30.5	-	-	100.0
República de Corea	41.0	58.4	41.6	-	-	100.0
Taiwan	15.4	58.1	41.9	-	-	100.0
Otros de Asia	8.9	-	100.0	-	-	100.0
Asia	307.5	63.0	28.7	1.8	6.5	100.0
Australia	8.2	84.5	15.5	-	-	100.0
Nueva Zelanda	0.7	71.8	28.2	-	-	100.0
Mundial	786.4	59.8	33.4	4.2	2.6	100.0

FUENTE: http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_6.html

Tabla 2.4.1-3. MAYORES COMPAÑÍAS PRODUCTORAS DE ACERO
millones de toneladas de acero crudo

1999	1998			1999	1998						
1	26.5	1	25.6	POSCO	R. Corea	40	4.4	40	4.7	HKM	Alemania
2	25.2	2	25.1	Nippon Steel	Japón	41	4.4	49	3.8	CST	Brasil
3	22.2	3	20.1	Arbed	Lux.	42	4.2	42	4.3	Rautarunkki	Finlandia
4	22.2	4	18.9	Usinor	Francia	43	4.1	52	3.6	Dofasco	Canadá
5	21.3	6	16.3	Corus	R.U.	44	4.0	78	2.6	Nizhny Tagil	Rusia
6	20.	5	17.1	LNMI	R.U.	45	3.9	50	3.8	Baotou	China
7	16.7	13	9.9	Baoshan	China	46	3.9	69	2.9	Benxi	China
8	16.1	7	14.8	Thyssen Krupp	Alemania	47	3.8	44	4.2	Techint	Argentina
9	14.1	8	13.3	Riva	Italia	48	3.8	54	3.4	Inchon	R. Corea
10	12.8	9	11.5	NKK	Japón	49	3.7	45	4.1	Huta Katowice	Polonia
11	11.3	10	11.0	USX	EUA	50	3.7	66	3.0	Lucchini	Italia
12	11.1	12	10.4	Kawasaki	Japón	51	3.6	61	3.1	Mariupol (Azovstal)	Ucrania
13	10.2	11	10.4	SAIL	India	52	3.6	63	3.1	Panzhihua	China
14	9.4	18	8.8	Nucor	EUA	53	3.6	48	4.0	Tokyo Steel	Japón
15	9.4	16	9.6	Sumitomo	Japón	54	3.6	58	3.4	Maanshan	China
16	9.3	14	9.8	China Steel	China	55	3.4	60	3.2	VSZ Kosice	Eslovaquia
17	9.0	19	8.5	Severstal	Rusia	56	3.4	57	3.4	SSAB	Suecia
18	8.9	23	7.7	Magnitogorsk	Rusia	57	3.4	51	3.7	AHMSA	México
19	8.5	17	9.2	BHP	Australia	58	3.3	56	3.4	Nisshin Steel	Japón
20	8.5	15	9.6	Bethlehem Steel	EUA	59	3.3	59	3.3	TISCO	India
21	8.5	20	8.5	Anshan	China	60	3.3	62	3.1	Zaporozstahl	Ucrania
22	7.6	24	7.4	LTV	EUA	61	3.2	37	4.7	Sidex	Rumania
23	7.5	26	6.6	Novolipetsk	Rusia	62	3.2	76	2.7	Tangshan	China
24	7.3	21	8.0	Shougang	China	63	3.1	64	3.0	North Star	EUA
25	6.6	46	4.1	Gerdau	Brasil	64	3.1	71	2.8	Hvsa	México
26	6.6	25	6.7	Cockerill Sambre	Bélgica	65	3.0	67	2.9	Handan	China
27	6.2	29	6.1	WISCO	China	66	3.0	47	4.0	USIMINAS	Brasil
28	6.1	31	5.6	NISCO	IRA	67	3.0	77	2.7	Jinan	China
29	5.7	27	6.4	Kobe Steel	Japón	68	2.9	75	2.7	Meechel	Rusia
30	5.7	32	5.5	National Steel	EUA	69	2.8	70	2.8	Rouge Steel	EUA
31	5.6	43	4.3	AK Steel	EUA	70	2.7	79	2.6	Nosta	Rusia
32	5.6	33	5.4	ISCOR	Sudáfrica	71	2.7	53	3.5	COSIPA	Brasil
33	5.3	39	4.7	Krivorozhstal	Ucrania	72	2.6	68	2.9	SIDOR	Venezuela
34	5.0	36	4.7	Saltzgitter	Alemania	73	2.6	81	2.5	ERDEMIR	Turquía
35	4.9	38	4.7	CSN	Brasil	74	2.6	65	3.0	Co-Steel	Canadá
36	4.8	41	4.3	Mariupol (Ilyich)	Ucrania	75	2.5	72	2.7	Birmingham Steel	EUA
37	4.7	35	4.8	Stelco	Canadá	76	2.4	74	2.7	Nova Hut	R. Checa
38	4.7	34	4.8	Voest-Alpine	Australia	77	2.4	80	2.6	Saarstahl	Alemania
39	4.7	55	3.4	Zapsib	Rusia	78	2.2	73	2.7	Dongkuk	R. Corea

FUENTE: http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_2.html

Tabla 2.6.1-4. Hierro fundido y por reducción directa
millones de toneladas

	Arrabio		Hierro esponja	
	1999	1998	1999	1998
Belgica-Luxemburgo	8.4	8.6		
Finlandia	3.0	2.9		
Francia	13.9	13.5		
Alemania RF	27.9	30.2	0.45	0.40
Italia	10.8	10.8		
Holanda	5.3	5.6		
Portugal	0.4	0.4		
España	4.1	4.2		
Suecia	3.2	3.1	0.12	0.12
Gran Bretaña	12.1	12.7		
Unión Europea (15)	92.9	96.0	0.57	0.52
R. Checa	4.0	5.0		
Hungría	1.3	1.3		
Polonia	5.2	6.2		
Rumania	3.0	4.5		
R. Eslovaquia	3.0	2.8		
Turquía	5.2	5.3		
Otros	0.3	1.0		
Otros de Europa	23.1	27.4		
Kazakhstan	3.5	2.6		
Rusia	40.0	34.7	1.73	1.88
Ucrania	21.9	20.8		
Otras ex USSR	-	0.0		
Ex USSR	65.4	58.1	1.73	1.88
Canadá	8.9	8.9	1.24	0.92
México	4.8	5.6	5.58	6.07
Estados Unidos	46.4	48.2	1.60	1.67
TLCN	60.0	62.8	8.43	8.66
Argentina	2.0	2.1	1.54	0.99
Brasil	24.5	25.1	0.34	0.40
Chile	1.0	1.0		
Venezuela	-	-	5.05	4.78
Centro y Sudamérica	28.1	28.9	8.06	7.60
Egipto	1.3	1.4	1.61	1.67
Sudáfrica	6.1	6.9	1.07	1.49
Otros de África	0.6	0.5		
África	8.0	8.8	3.68	4.45
Irán	2.1	2.1	3.51	4.03
PR China	125.4	118.5	0.08	0.11
India	20.1	20.2	5.12	5.29
Japón	74.5	75.0		
República de Corea	23.3	23.3		
Taiwan	8.9	9.4		
Australia	7.0	7.7		0.32
Mundial	541.0	540.0	36.64	38.60

FUENTE: http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_17.html, http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_18.html

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.6.2 Panorama nacional.

En 1997, México fue el segundo productor de acero en Latinoamérica, después de Brasil, con alrededor del 27% de la producción. En ese mismo año hubo un incremento con respecto al año anterior de 8.2% en la producción, mientras que el consumo creció 15% situándose éste último en 8.7 millones de toneladas. Como pudo apreciarse en las tablas, en México la mayor parte de la producción de acero es a través del proceso de horno de arco eléctrico, más de dos terceras partes, y el resto es por proceso de aceración al oxígeno (The Mineral Industry of México, consultado en <http://www.minerals.usgs.gov>).

Tabla 2.6.2.-1 Producción de Hierro por Estado y Municipio (toneladas)

ESTADO	MUNICIPIO	1995	1996	1997	1998
COAHUILA					
COAHUILA	SIERRA MOJADA	2 760 330.0	3 113 148.0	2 868 820.9	2 317 431.8
Total COAHUILA		2 760 330.0	3 113 148.0	2 868 820.9	2 317 431.8
COLIMA					
COLIMA	COQUIMATLAN	135 227.0	465 543.0	469 904.0	717 302.0
COLIMA	Minatitlán	2 344 245.0	2 468 089.0	2 794 193.6	3 095 925.8
Total COLIMA		2 479 472.0	2 933 632.0	3 264 097.6	3 813 227.8
JALISCO					
JALISCO	HOTOTIPAQUILLO	0.0	0.0	0.0	0.0
JALISCO	HUERTA. LA	0.0	0.0	149 534.4	97 678.4
JALISCO	PIHUAMO	354 413.0	255 890.0	261 053.0	164 675.0
Total JALISCO		354 413.0	255 890.0	410 587.4	262 353.4
MICHOACÁN					
MICHOACÁN	LAZARO CARDENAS	1 407 175.0	1 411 356.0	1 241 825.0	850 058.0
Total MICHOACÁN		1 407 175.0	1 411 356.0	1 241 825.0	850 058.0
PUEBLA					
PUEBLA	CUAUTLANCINGO	0.0	0.0	0.0	0.0
Total PUEBLA		0.0	0.0	0.0	0.0
SONORA					
SONORA	BACANORA	24 849.0	21 521.0	31 984.3	12 987.8
SONORA	CARBO	0.0	0.0	42 300.0	34 200.0
SONORA	ROSARIO	17 046.0	0.0	26 089.0	0.0
Total SONORA		41 895.0	21 521.0	100 373.3	47 187.8
ZACATECAS					
ZACATECAS	SOMBRERETE	7 065.0	5 327.0	4 943.8	7 589.7
Total ZACATECAS		7 065.0	5 327.0	4 943.8	7 589.7
Totales		7 050 350.0	7 740 874.0	7 890 648.0	7 297 848.5

FUENTE: [HTTP://WWW.SECOFIGM.GOB.MX/PROMOCION/ESTADISTICAS/PRODUCCION/FORMAL.ASP](http://www.secofigm.gob.mx/promocion/estadisticas/produccion/formal.asp)

El incremento del consumo interno se atribuye principalmente a la recuperación económica que ha tenido el país, así como al aumento de la inversión externa. El mayor productor de acero en 1997 fue Altos Hornos de México (AHMSA), ubicada en Monclova, Coahuila, subsidiaria de Grupo Acerero del Norte (GAN) con una producción de 3.5 millones de toneladas; seguido de Hylsa de México S.A. de C.V. localizada en Monterrey y Apodaca en Nuevo León y Puebla respectivamente, con una generación de 3.06 millones de toneladas. Los restantes productores fueron ISPAT Mexicana S.A. de C.V. en Lázaro Cárdenas, Michoacán, con 2.87 millones de toneladas, Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas, también en Michoacán con 1.46 millones de toneladas, Tubos de Acero de México S.A. en Veracruz con 0.77 millones de toneladas, entre otras (<http://www.minerals.usgs.gov>); según datos preliminares del Instituto Latinoamericano del Hierro y el Acero, México produjo el año pasado 16.23 millones de toneladas de acero bruto. En las siguientes tablas se muestran algunos indicadores internos relacionados con la industria siderúrgica de México:

Tabla 2.6.2-2 Indicadores de la industria siderúrgica en México
Toneladas

Arrabio	4 822 000 ^a
Hierro esponja	6 083 000 ^a
Total hierro primario	10 905 000 ^a
Horno eléctrico	10 048 000 ^a
Convertidor al oxígeno	5 246 000 ^a
Total acero	15 294 000 ^a
Laminados planos	5 505 000 ^a
Laminados no planos	5 161 000 ^a
Tubos son costura	396 000 ^a
Total de laminados en caliente	11 062 000 ^a
Consumo aparente de acero	13 300 000 ^a
Consumo per capita de acero	136.5 ^a
Consumo aparente de laminados	10 700 000 ^a
Importación de productos siderúrgicos	1 260 000 ^a
Exportación de productos siderúrgicos	4 417 000 ^a
Producción de mineral de hierro	14 166 000 ^b
Producción de mineral de hierro concentrado	13 248 000 ^b
Producción de sinter	1 018 000 ^b
Producción de pelets	13 296 000 ^{b,c}
Consumo de carbón mineral	2 809 000 ^b
Consumo de chatarra	6 680 000 ^b
Consumo de arrabio	4 675 000 ^b
Adquisición de carbón mineral	2 894 000 ^b
Personal ocupado en la siderurgia	31 636 ^{b,d}

^a 1999, ^b 1998, ^c 73% de contenido de Fe, ^d personal

Fuente: <http://www.ilafa.org/index.html>

**Tabla 2.6.2-3 México: Personal ocupado en la industria siderúrgica
Por categoría ocupacional**

Categoría ocupacional	1994	1995	1996	1997	1998
Directivos, profesionales y técnicos	4,404	4,784	5,401	4,455	3,175
Operarios calificados y no calificados	18,493	19,399	20,812	19,354	19,446
Empleados administrativos	5,734	7,918	7,603	7,704	9,015
Total	28,631	32,101	33,816	31,513	31,636

FUENTE: <http://www.ilafa.org/index.html>

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3. ESCORIAS.

3.1 Antecedentes.

En el proceso siderúrgico existen residuos en todas las etapas del proceso. En el moldeo y desmolde existe una cantidad de consideración de restos de material que contienen aglutinantes no endurecidos, durante el proceso de colada (vaciado) se generan escorias y restos de metales, así mismo en el desmolde se generan arenas gastadas las cuales están expuesta a diferente tensión térmica que incluso hace cambiar su color, debido a los aglutinantes quemados, sin embargo la mayoría de las arenas es posible reciclarlas en el mismo proceso varias veces. Finalmente durante el maquinado existen procesos de pulido, esmerilado y limpieza, en las dos primeros se generan polvos y partículas metálicas, en cuanto a la limpieza se generan otros residuos, debido a que se utilizan aceites y lubricantes, los cuales generan pastas de partículas y metales (Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industriales para el Giro de la Fundición..., 1996).

En el caso de este estudio que es el proceso de fundición de metales ferrosos (siderurgia), una buena cantidad de sus residuos lo representan las escorias de fundición, las cuáles se describen a continuación, primero se describen las escorias generadas en la obtención del hierro fundido o arrabio, y posteriormente las que se obtienen al producir acero.

3.2 Escorias de alto horno.

3.2.1 Formación.

En la obtención del arrabio, las escorias se forman por la reacción del fundente con la ganga del mineral y las cenizas del carbón, su formación se manifiesta al inicio de la zona de reducción directa, es decir, entre los 700 y 800 °C, a temperaturas más elevadas, más allá de los 1100 °C se forma una escoria fluida, que se acumula en la superficie del hierro fundido, cuya función principal es reaccionar y arrastrar las impurezas indeseables en el mineral de hierro, sin dejar que éstas se recombinen (Frier, 1952). La sociedad americana de pruebas y ensayos (ASTM, por sus siglas en inglés) en el apartado ASTM C125, define a las escorias de alto horno como *“el producto no-metálico consistente esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, que se desarrollan en condiciones simultaneas de fundición con hierro en un alto horno”* (NSA, 2000). En la tabla 3.2.1-1 se observan las reacciones de formación de las escorias y en general las que ocurren en el alto horno.

Altura m [ft]	Reacciones	Temperatura Aproximada °C [°F]
	\uparrow Gases: $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ \uparrow Polvos: $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_4 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{C} + \text{FeS}$	
25.9 (86)	\downarrow Fundente + Coque + Mineral de Hierro $(\text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3) \quad \text{C} \quad \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \uparrow \downarrow \text{H}_2\text{O}$	277 (530)
24.4 (80)	$\downarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \quad \text{MnO} \quad \text{SiO}_2 \quad \text{FeS} \quad \text{CaSO}_4 \quad \text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$	371 (700)
22.8 (76)	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow \downarrow 4\text{Fe} + \uparrow \text{C} + \uparrow 2\text{CO}_2$	474 (885)
21.3 (70)	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{C}, \text{CO}) \rightarrow \downarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \uparrow (\text{CO}, \text{CO}_2)$	577 (1070)
19.8 (65)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{C}, \text{CO}) \leftrightarrow \downarrow \text{FeO} + \uparrow (\text{CO}, \text{CO}_2)$	627 (1160)
18.3 (60)	$\text{FeO} + (\text{C}, \text{CO}) \leftrightarrow \downarrow \text{Fe} + \uparrow (\text{CO}, \text{CO}_2)$	699 (1290)
16.8 (55)	$3\text{FeO} + \text{CO}_2 \rightarrow \downarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \uparrow \text{CO}$	777 (1430)
15.2 (50)	$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightarrow \downarrow \text{FeO} + \uparrow \text{CO}$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow \uparrow 2\text{CO}$	871 (1600)
13.7 (45)	$\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \uparrow \text{H}_2 + \uparrow \text{CO}$ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \uparrow \text{CaO} + \downarrow \text{CO}_2$	977 (1790)
12.2 (40)	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \uparrow \text{CO}_2 + \downarrow \text{MgO}$	1071 (1960)
10.7 (35)	$\text{Fe}_2\text{O}_4 + \text{C} \rightarrow \downarrow 3\text{FeO} + \uparrow \text{CO}$ $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \downarrow \text{Fe} + \uparrow \text{CO}$	1177 (2150)
9.1 (30)	$\text{MnO} + \text{C} \rightarrow \downarrow \text{Mn} + \uparrow \text{CO}$	1252 (2285)
7.6 (25)	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Silicatos}$	1354 (2470)
6.1 (20)	$\uparrow \text{N}_2 \quad \uparrow \text{H}_2 \quad \uparrow \text{CO}$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow \uparrow 2\text{CO}$ $\text{O}_2 + \text{C} \rightarrow \uparrow \text{CO}_2$ $\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \uparrow \text{H}_2 + \uparrow \text{CO}$	1549 (2820)
	$\text{FeS} + \text{CaO} + \text{C} \rightarrow \downarrow \text{CaS} + \downarrow \text{Fe} + \uparrow \text{CO}$	1699 (3090)
	Escorias = $\text{SiO}_2, \text{FeO}, \text{MnO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{CaS}$ $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8 + 3\text{SiO}_2 + 5\text{C} + 6\text{Fe} \rightarrow 3\text{CaOSiO}_2 + \uparrow 5\text{CO} + 2\text{Fe}_3\text{P}$ $\text{SiO}_2 + 2\text{C} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeSi} + \uparrow 2\text{CO}$ Hierro fundido = Fe, C, Si, Mn, P y S	1849 (3360)

Fuente: FRIER, W.T. "Elementary Metallurgy", Mc Graw-Hill, USA, 1952, pp.4 y 5.

Tabla 3.2.1-1 Proceso de reacciones en el Alto Horno

MEDIO EDITIVO
 FALLA DE ORIGEN
 TESIS CON
 NOC SISL

3.2.2 Composición.

Los principales constituyentes de las escorias de alto horno son óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio, estos compuestos corresponden al 95% de su composición total, existen menores cantidades de manganeso, hierro y compuestos con azufre, así como trazas de otros elementos y compuestos. En la tabla 3.2.2-1 se muestra la composición química típica de las escorias de alto horno, se debe tener en cuenta que dicha composición depende de la calidad de la materia prima (mineral de hierro y el fundente), del pretratamiento del mineral, ya sea que se utilice sinter o pelets o ambos, del combustible y en general de las condiciones en el horno (NSA, 2000).

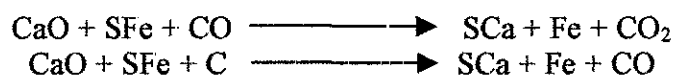
	Porcentaje		Porcentaje
SiO ₂	32-42	S*	1-2
Al ₂ O ₃	7-16	Fe ₂ O ₃	1-1.5
CaO	32-45	MnO	0.2-1.0
MgO	5-15		

*Principalmente en la forma de sulfuro de calcio
Fuente: National Slag Association, 2000

La escoria es un sistema poli componente, ésta suele ablandarse paulatinamente, pasando al estado líquido sólo después de encontrarse en el estado pastoso, plástico, además durante el enfriamiento éstas son capaces de sobre-enfriarse y pasar al estado vítreo. La temperatura de las escorias que salen del horno varía dentro de los límites de 1450°C a 1560°C (Voskobónikov *et al.*, 1982). Otro punto importante a resaltar es que la composición de la escoria proveniente del alto horno ha variado muy poco en las últimas décadas a pesar de las innovaciones de que haya sido objeto el proceso de fundición con una mayor eficiencia y nuevas tecnologías en el tratamiento de la materia prima, como se muestra en la tabla 3.2.2-2, en un estudio realizado en varias industrias en los Estados Unidos.

Entre las propiedades generales físicas destacadas es que a las temperaturas del horno, es menos densa que el arrabio obtenido, por lo que es fácil separarla, un aspecto importante es su viscosidad, la cuál le dará su propiedad de fluidez y fácil evacuación, ésta varía de 0.3 a 0.8 Pa·s; otra propiedad importante es su tensión superficial que determina la mayor o menor facilidad en subdividirse, lo que determina la posibilidad de efectuar, en mayor o menor grado específicas acciones químicas dependiendo de la

superficie activa de contacto. Todas estas propiedades hacen posible y necesario que la escoria sea fusible, fluida y que absorba la menor cantidad de calor en su formación y en su fusión (Morral *et al.*, 1982). Así mismo tiene propiedades fisicoquímicas de vital importancia, entre las que destaca su poder desulfurante, ya que el azufre es un elemento indeseable en la fundición del hierro, y la defosforación produciendo las siguientes reacciones:



Las propiedades químicas de las escorias de alto horno son tales que al ser enfriadas por cualquier método, principalmente con el agua reacciona para formar productos vitrificados con propiedades cementante, lo cual dependerá de la composición química de la escoria. El pH que se observa en solución es alcalino con un rango de 8 a 10, aunque la escoria tiene pequeñas cantidades de azufre la lechada tiende ligeramente a ser alcalina sin presentar problemas de corrosión hacia el acero presente en construcciones de concreto. Bajo ciertas condiciones la lechada de la escoria presenta cierta coloración amarillo-verdosa y un olor sulfuroso (Voskobónikov *et al.*, 1982).

Tabla 3.2.2-1 Composición histórica de la escoria proveniente del alto horno

Constituyente	Porcentaje							
	1949 ^a		1957 ^a		1968 ^a		1985 ^a	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango
Oxido de calcio (CaO)	41	34-48	41	31-47	39	32-44	39	34-43
Dióxido de silicio (SiO ₂)	36	31-45	36	31-44	36	32-40	36	27-38
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	13	10-17	13	8-18	12	8-20	10	7-12
Oxido de magnesio (MgO)	7	1-15	7	2-16	11	2-19	12	7-15
Oxidos de hierro (FeO o Fe ₂ O ₃)	0.5	0.1-1.0	0.5	0.2-0.9	0.4	0.2-0.9	0.5	0.2-1.6
Oxido manganeso (MnO)	0.8	0.1-1.4	0.8	0.2-2.3	0.5	0.2-2.0	0.44	0.15-0.76
Azufre (S)	1.5	0.9-2.3	1.6	0.7-2.3	1.4	0.6-2.3	1.4	1.0-1.9

a. Fuente del dato es la *National Slag Association data*: 1949 (22 fuentes); 1957 (29 fuentes); 1968 (30 fuentes) y 1985 (18 fuentes).

FUENTE: MINERAL AGGREGATE CONSERVATION REUSE AND RECYCLING. REPORT PREPARED BY JOHN EMERY GEOTECHNICAL ENGINEERING LIMITED FOR AGGREGATE AND PETROLEUM RESOURCES SECTION, ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESOURCES. ONTARIO, 1992. TOMADO DE <http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/bfs1.htm>

3.2.3 Tipos de escoria de alto horno.

Existen cuatro principales tipos de escorias producidas en el alto horno, dependiendo del enfriamiento subsecuente que incluyen a la escoria enfriada al aire, escoria expandida, escoria peletizada y escoria granulada, las cuales son detalladas a continuación (en la figura 3.2.3-1 se muestra como la escoria se retira del alto horno):

Figura 3.2.3-1 Escoria saliendo del alto horno



Fuente: <http://www.mp.tudelft.nl/GV/local/section/gallery/gallery.html>

Escoria enfriada al aire. La ASTM C125 define a la escoria enfriada al aire (se encuentra en la literatura normalmente por sus siglas en inglés ACBF, *Air-Cooled Blast Furnace*) como “*el material que resulta de la solidificación de escoria de alto horno bajo condiciones atmosféricas ... subsecuente enfriamiento puede ser acelerado por aplicación de agua a la superficie que comienza a solidificarse*”. Dependiendo de las condiciones del proceso, la materia prima y el modo de enfriamiento es la escoria obtenida, sin embargo la mayor cantidad generada pertenece a este tipo. La escoria en estado líquido se retira del horno y se transporta generalmente a través de un canal abierto, depositada metros adelante en una fosa o lecho, donde ésta se enfría y solidifica lentamente, bajo las condiciones atmosféricas prevalecientes; posterior aceleramiento de la solidificación se lleva a cabo esparciendo agua sobre su superficie, lo que da como resultado final un sólido cristalizado, que se extrae del lecho, se tritura y tamiza con el fin de obtener

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

fragmentos de tamaño deseado, a este material se le denomina escoria ACBF, como se muestra en la imagen 3.2.3-2. Este tipo de escoria tiene una estructura vesicular con muchas celdas internas no interconectadas, que al ser triturados, los fragmentos son angulares con poca elongación y mínima superficie lisa. La textura porosa es áspera, lo que da como resultado una mayor área superficial comparada con otros materiales similares con igual volumen (NSA, 2000).

Figura 3.2.3-2 Escoria ACBF



Fuente: <http://www.slag.com>

Su gravedad específica puede variar en un rango de 2.0 a 2.5, debido a que la cantidad de hierro en la escoria es variable, cuando se le pulveriza su gravedad específica es muy cercana a la de la arena; además de que su estructura interna altamente porosa con muchas cavidades internas en este tipo de escoria, contribuye a que su peso no sea constante y por lo tanto afecta su densidad y rugosidad (NSA, 2000).

La densidad de la escoria ACBF varía de acuerdo al tamaño y composición de los fragmentos obtenidos después de ser triturados, a su gravedad específica y al método de medición, sin embargo, la densidad típica por unidad de peso compacto usualmente está en el rango de 1121 a 1281 kg/m³, aunque en ocasiones ésta puede llegar a 1360 kg/m³. Su dureza medida en la escala de Mohs está entre 5 y 6, lo cual es comparable a la dureza de las rocas ígneas (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste>).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2.3-1 Características de la escoria enfriada al aire

Propiedades físicas ¹		Propiedades mecánicas ²	
Gravedad específica	2.0-2.5	Abrasión Los Angeles (ASTM C131)	35 - 45 %
Densidad (unidad de peso compacto)	1120 - 1360 Kg/m ³	Angulo de fricción interna	40 - 45
Absorción (%)	1 - 6	Dureza (escala de Moh) [*]	5 - 6
Coefficiente de expansión	0.000006/°F	Razón de soporte California, tamaño de pieza 19mm ^{**}	Arriba de 250%
Punto de fusión	1150-1426°C		

^{*}La dureza de la dolomita medida en la misma escala es de 3 a 4.
^{**}Valor típico de la piedra caliza es de 100%

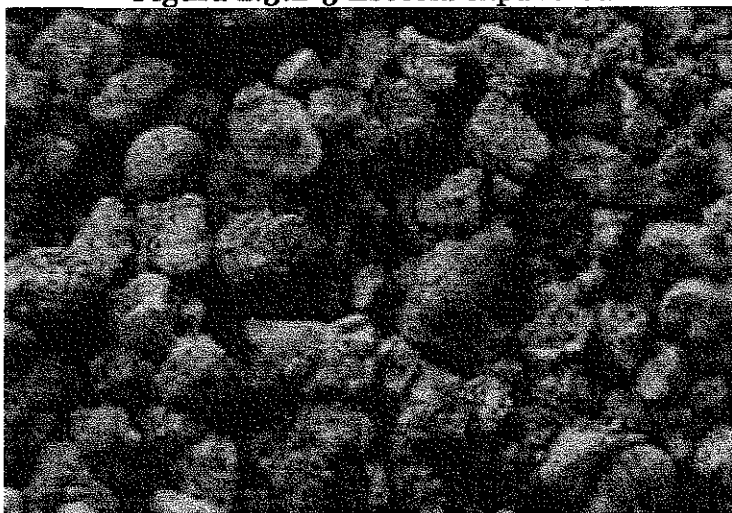
Fuente: ¹American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Specification for Materials, "Blended Hydraulic Cements," AASHTO Designation: M240-85, Part I Specifications, 14th Edition, 1986 y ²Nourekdn, A. S. and R. S. McDaniel "Evaluation of Steel Slag Asphalt Surface Mixtures", Presented at the 69th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, January, 1990; tomadas del sitio de Internet <http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/bfs1.htm>.

La absorción de agua puede ser de hasta 6% la cual queda generalmente atrapado en los poros. Debido al mayor uso las propiedades mecánicas de la escoria enfriada al aire en la industria de materiales de construcción, han sido extensamente analizadas, de las que se destacan su buena resistencia a la abrasión, buena solidez, alta resistencia a la presión, entre otras (NSA, 2000); en la tabla 3.2.3-1 se resumen algunas éstas y de otras características mencionadas.

Escoria expandida. Esta se produce al formar una corriente de escoria fundida a flujo controlado y mezclándose con una determinada cantidad de agua, al darse esta interacción entre el agua y la escoria líquida durante un periodo de tiempo considerable, da como resultado una forma de sólido expandido, durante ese tiempo no se adiciona mayor cantidad de agua, ya que se corre el riesgo de que la escoria vitrifique. En un receptáculo donde se lleva a cabo el enfriamiento opera un rotor con aspas o paletas que segmentan la mezcla, esta segmentación ocasiona que la escoria se proyecte por los aires hasta un recipiente donde se colecta. Debido a la acción del agua que se añade y el vapor resultante durante el proceso de enfriamiento y solidificación se forma una estructura celular (muy porosa) aun mayor y más pronunciada que en la escoria ACBF, lo que origina una escoria de baja densidad; ya solidificada se tritura y tamiza en fragmentos de tamaño deseado. Una de sus características más destacada es su textura superficial la cual es más áspera que la enfriada al aire. Debido a su mayor porosidad es difícil obtener su densidad, sin embargo su rango va desde 800 a 1040 kg/m³, alrededor del 70% que la anterior (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/>; NSA, 2000; <http://www.slag.com>). En la siguiente imagen se observa el resultado de este tipo de escoria.

TRISIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.3.2-3 Escoria expandida



Fuente: <http://www.slag.com>

Escoria peletizada. La peletización de la escoria de alto horno es un proceso innovador, donde la escoria fundida se conduce, después de salir del horno, a un plato vibratorio inclinado, se añade agua para iniciar el enfriamiento de la escoria, esta adición provoca en la escoria fundida una especie de espuma, aumenta su viscosidad, indicio de que el proceso de solidificación ha comenzado, la escoria fluye desde el plato vibratorio a un tambor giratorio, éste al rotar con cierta fuerza, provoca que la escoria salga disparada por el aire, dispersándola y formando fragmentos esféricos, como gotas, que se enfrían rápidamente, pasando al estado sólido vitrificado, con lo que se producen los denominados pelets. El tratamiento de la escoria de alto horno con agua y el resultado de formar una especie de espuma con el movimiento vibratorio da como resultado una única estructura interna microcelular en cada pelet, este tipo de estructura, que sólo puede ser detectable y observable con un microscopio electrónico, está contenido dentro de cada pequeña esfera, lo que provoca que se tenga un producto de baja densidad, con rango que va desde 912 hasta 1105 kg/m³ dependiendo del tamaño (NSA,2000; <http://www.slag.com>).

Al controlar el proceso, se puede variar las características finales del producto, por ejemplo al variar la velocidad de enfriamiento y la cantidad de agua añadida se puede obtener ya sea un material cristalino o en contraposición uno con mayor vitrificación, es decir, a mayor rapidez de enfriamiento mayor vitrificación y en el otro sentido mayor cristalización. A diferencia de los dos tipos de escorias anteriores, la escoria peletizada tiene una textura suave, así como una menor porosidad y absorción de agua; el tamaño de los pelets va de un rango de 13mm a 0.1mm; en la figura 2.3.2-3 se observa el producto

final obtenido. El desarrollo de este proceso de peletización fue el producto de varios años de desarrollo de procesos de enfriamiento con la escoria fundida, ya que debía encontrarse un proceso que ofreciese simplicidad en su operación, bajo capital de inversión, bajo consumo de energía y agua, y reducidos costos de operación que diese como resultado un producto versátil, lo cuál se logró con el proceso de peletización de la escoria (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste>; <http://www.slag.com>).

Figura 2.3.2-4 Escoria peletizada



Fuente: <http://www.slag.com>

Escoria granulada. El proceso más común para la obtención de escoria granulada es aquel que involucra el uso de un elevado volumen de agua, altas presiones de inyección de agua en contacto con la superficie de la escoria, a una razón de aproximadamente 10 a 1 por masa, con este proceso la escoria es enfriada casi inmediatamente (NSA, 2000). La eficiencia con la que se lleva a cabo la rapidez de enfriamiento, así como la composición química de la materia prima utilizada en el proceso de alto horno determina en gran medida las propiedades cementantes de la escoria obtenida. Después de solidificada la escoria, se escurre, seca y tritura, con lo que se obtiene lo que en inglés se abrevia como escoria GGBF (ground granulated blast furnace), la ASTM C219, define a ésta como *un material granular vítreo, formado cuando la escoria fundida de alto horno es enfriada rápidamente por inmersión en agua* (<http://www.slag.com>).

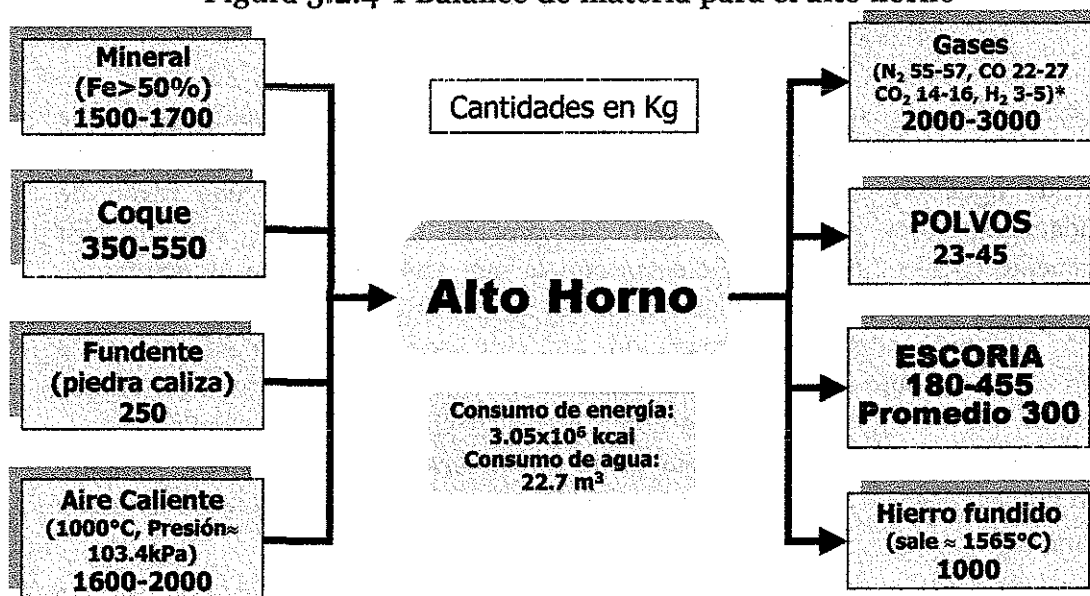
El producto obtenido son fragmentos de tamaño arenoso, su estructura física con respecto al grado de granulación depende de la composición química de la escoria, la

temperatura del agua de enfriamiento y el método de producción. Cuando se muele y criba se obtiene partículas finas del tamaño del cemento. El tamaño del grano por lo regular es de 4.75 mm de diámetro, sin embargo este tamaño se reduce significativamente en el proceso de molienda para obtener granos de mayor finura, ya que de esto dependerá su uso posterior (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste>). En el capítulo sobre el uso de la escoria en la obtención del cemento se describirán más detalles químicos y físicos sobre este tipo de escoria.

3.2.4 Balance de materia.

Las escorias salen del horno como ya se mencionó a una temperatura que varía dentro de los límites de 1450 °C a 1560 °C, la cantidad producida de escoria varía desde un mínimo de 180 hasta un máximo de 1400 kg por tonelada de fundición producida aunque esto puede ser variable, sin embargo, con la optimización en los procesos actuales, las cantidades que se generan son cada vez menores, se obtiene en promedio 300 kg de escoria por tonelada de arrabio (Losana y Morera, 1951; USDE 2000). A continuación se presenta en el esquema 3.2.4-1 un balance de materia general alrededor del alto horno enfocado en la generación de escorias (es importante señalar que los procesos de fundición, de acuerdo a cada caso en particular, involucran la generación de otros subproductos y emisiones que quedan fuera del alcance del presente estudio).

Figura 3.2.4-1 Balance de materia para el alto horno



FUENTE: Adaptado de Higgins, 1983; AHMSA, 2000; USDE, 2000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 Escorias del proceso de aceración.

3.3.1 Formación.

La fabricación de acero va acompañada de los procesos de oxidación del hierro y de sus impurezas, así como por los procesos de corrosión del revestimiento de los aparatos de fusión del acero, en la carga de los aparatos siempre existe una cantidad menor o mayor de impurezas, además de que se le añaden diferentes materiales aditivos que forman la aleación propiamente dicha del acero, todos estos compuestos ajenos al producto deseado, como ya se vio con la producción de arrabio, flota en la superficie del metal fundido, que es la escoria del proceso de aceración, las fuentes principales de esta escoria son (Kudin, 1984):

1. Los productos de oxidación de las impurezas del hierro y de la chatarra (un aditivo frecuente en la producción de acero): de silicio, manganeso, fósforo, cromo, etc., es decir, SiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cr_2O_3 y otros.

2. Los productos de la destrucción del revestimiento de la instalación; si éste está hecho de magnesita, entonces, se destruye paulatinamente, con lo que de carga en carga, la escoria se enriquece con MgO , si por el contrario el revestimiento es de magnesita-cromita, entonces además de MgO , la escoria se enriquece con Cr_2O_3 , si el revestimiento está hecho con ladrillos Dinas la escoria se enriquecerá con SiO_2 , etc.

3. El ensuciamiento introducido con la carga (arena, suciedad, escoria de mezclador, etc.). La arena y la arcilla constan en lo fundamental de SiO_2 y Al_2O_3 , la escoria de mezclador con frecuencia contiene gran cantidad de azufre (en forma de MnS).

4. La herrumbre que cubre la chatarra, sobre todo, ligera, (viruta, hierro negro, etc.), es decir, FeO , Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

5. Materiales aditivos y oxidantes (caliza, cal, bauxita, espato-fluor, menas de hierro y de manganeso, o sea, CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , MnO , CaF_2) y otros. En cada caso concreto el grado de influencia de las impurezas citadas sobre la composición de las escorias es diferente; una vez agregada, después de un cálculo respectivo, una u otra cantidad de adiciones determinadas, se obtiene la escoria de composición deseable. Siempre que sea necesario, se efectúa la operación de descarga, cuando una determinada de escoria (a veces 100%) se elimina del aparato y luego, agregando la cantidad necesaria de unas u otras adiciones se pone a punto la escoria nueva de composición requerida (Kudin, 1984)

Durante la fundición y colada el metal líquido se encuentra en contacto continuo con la escoria e interacciona con ella. La composición de la escoria, su temperatura, la

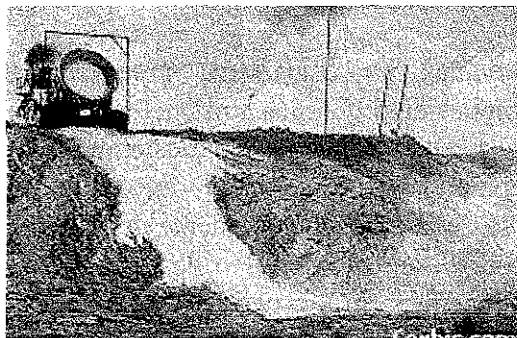
fluidez y otros parámetros ejercen una influencia decisiva en el proceso de la fundición y en la calidad del metal. La tarea principal del fundente del acero consiste en eliminar del metal las impurezas nocivas que frecuentemente se consideran así al azufre y el fósforo, para eliminar dichos elementos se realiza al pasar dichas impurezas a la escoria y creando las condiciones que impiden el paso inverso de la escoria al metal, y además controlando sus propiedades y la temperatura también se puede aumentar o disminuir el contenido de Mn, Cr, Si y otras impurezas en el metal, por lo que es importante tener en el proceso una escoria con características específicas para que cumpla su función, el cual consiste básicamente en que la escoria debe asegurar el grado necesario de la purificación del metal, en los periodos de oxidación la escoria debe asegurar la penetración intensiva del oxígeno de la atmósfera de la instalación a través de la escoria al metal, en las etapas subsecuentes, así como en la cuchara después de colar el metal, la escoria tiene que impedir el paso del oxígeno de la atmósfera al metal, así mismo debe obstaculizar los procesos del paso de los gases (nitrógeno e hidrógeno) del ambiente al metal fundido. Una cosa importante es que la escoria debe contener lo mínimo de hierro de otra forma estará disminuyendo la eficiencia del proceso; puede verse que las condiciones de exigencias de las escorias puede ser lo más variables según sean los requerimientos (Kudin, 1984)

La escoria debe cumplir las siguientes exigencias:

- 1 La escoria debe asegurar el grado necesario de la purificación del metal de las impurezas nocivas contenidas en él
- 2 En los periodos de oxidación la escoria debe asegurar la penetración intensiva del oxígeno de la atmósfera de la instalación a través de la escoria al metal
- 3 En otras etapas, así como en la cuchara después de colar el metal, la escoria tiene que impedir el paso del oxígeno de la atmósfera al metal
- 4 La escoria ha de obstaculizar los procesos del paso de los gases (nitrógeno e hidrógeno) de la atmósfera al metal
- 5 La escoria que se evacua de la instalación no debe contener gran cantidad de hierro, porque en este caso se reduce el grado de utilización del hierro contenido en la carga
- 6 Durante la colada la escoria debe obstaculizar el enfriamiento (es decir, la transferencia de calor) del metal que se encuentra en la cuchara
- 7 En muchas ocasiones a las composiciones de las escorias se presentan las exigencias complementarias; por ejemplo, cuando las escorias se usan para fabricar los materiales de construcción u otros, para los pavimentos, para encalar o abonar la tierra, extraer del metal las impurezas de valor como el vanadio, titanio, cromo, etc. (Kudin, 1984)

Existen muchos grados de acero que pueden ser producidos y las propiedades de la escoria cambian significativamente con cada grado. En forma general los grados de acero se pueden clasificar como alto, medio y bajo, dependiendo del contenido de carbón en el acero, por ejemplo, aceros de alto grado tienen elevado contenido de carbón. Para reducir la cantidad de carbón en el fundido se requiere mayor cantidad de oxígeno durante el proceso, así mismo se requiere incrementar la cantidad de cal y dolomita para remover las impurezas por lo que se incrementa la formación de escoria (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste>). Después de que la escoria se retira generalmente se procesa para recuperar la cantidad de hierro que puede contener, normalmente esta recuperación se lleva a cabo en un separador magnético, el hierro recuperado se recicla al proceso (USEPA, 1995).

Figura 3.3.2-1 Descarga de la escoria del convertidor



Fuente: <http://www.viewimages.com/viewimage/?imageid=253418&promotionid=1&partnerid=2&type=results;>
http://corbis.altavista.com/referrals/av_image_details.asp?linkid=26

3.3.2 Clasificación y propiedades.

Al fundirse los componentes de la escoria se forman los cationes tales como Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cr^{2+} , y aniones como S^{2-} , O^{2-} , SiO_4^{4-} , AlO_3^{3-} , PO_4^{3-} , FeO^{2-} , FeO_3^{3-} , $\text{SiO}_2\text{O}_7^{6-}$, CrO^{2-} , y también puede contener compuestos complejos como $(\text{CaO})_4\text{SiO}_2$, $(\text{FeO})_2\text{SiO}_2$, $(\text{CaO})_4\text{P}_2\text{O}_5$ entre otros. Dependiendo de si contienen óxidos básicos (CaO , MgO , MnO , etc.) se denominan escorias básicas y las que contienen óxidos ácidos (SiO_2 , P_2O_5) se denominan escorias ácidas. Una manera de controlar las escorias es con el muestreo, con la ayuda de una cuchara de muestro especial se toman muestras y se someten análisis químico o espectral, por regla general se controla el contenido de FeO y de MnO , y en casos de necesidad se determina el contenido de SiO_2 , CaO , MgO , etc., (Voskobónikov *et al.*, 1982). Existen diferentes tipos de escoria que se generan a lo largo del proceso de fundición primaria y la refinación subsecuente: la escoria de fundición y

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

otras escorias nombradas de acuerdo a las etapas que corresponden, no obstante para el presente estudio la escoria de interés es la escoria que se obtiene en la etapa primaria de fundición del acero, que en su mayor proporción son de contenido no metálico, las escorias que se obtienen posteriormente tienen elevado contenido de hierro (<http://t1hrc.gov/hnr20/recycle/waste>). Existen tres principales fuentes de obtención de escorias de acero, desde el punto de vista del tipo de proceso con que se obtiene el acero en su etapa primaria de fundición:

- ❑ Escorias de horno a hogar abierto, proceso obsoleto que se encuentra en desuso.
- ❑ Escorias de hornos de aceración al oxígeno (BOF), el cual es el más utilizado y por ende donde provienen la mayor parte de la escoria del acero.
- ❑ Escorias de horno de arco eléctrico, proceso que ha tenido auge en los últimos años y es el más utilizado en México.

La diferencia de las escorias obtenidas en éstos tres procesos radica principalmente en la materia prima y en la composición química final del acero que del proceso mismo; a continuación se presenta en la tabla 3.3.2-1, la composición promedio reportada por una fundidora de Ucrania que comercializa como subproducto a la escoria del proceso de fabricación de acero y en el caso de la escoria proveniente del horno EAF se reportó en un estudio sobre caracterización precisamente de este tipo de escorias. Sin embargo la composición típica de la escoria generada en el proceso de aceración varía relativamente poco dentro de cierto rango tanto para el proceso BOF como EAF, como se observa en la tabla 3.3.2-2.

Tabla 3.3.2-1 Composición de las escorias de acero

Tipo de escoria	Composición Química							
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	S	P ₂ O ₅
Horno a hogar abierto ¹	22.97	33.93	11.63	3.83	5.98	13.30	0.14	0.90
Horno BOF ^{1*}	17.13	48.59	3.92	1.23	4.68	13.00	0.085	0.79
Horno EAF ²	15.35	24.40	2.91	12.21	5.57	34.36	-	1.19

*Escoria molida para construcción de carreteras

FUENTE: ¹<http://metalonline.com/azovstal/slag.htm>; ²Luxán, M.P. et al., Cement and Concrete Research 30 (2000), pp. 517-519

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.3.2-2 Composición química típica de las escorias de acero			
Horno BOF	Porcentaje	Horno EAF	Porcentaje
SiO ₂	10-19	CaO	40-60
Al ₂ O ₃	1-3	SiO ₂	5-15
CaO	40-52	FeO	10-30
MgO	5-10	MgO	3-8
S	<0.1	MnO	2-5
Fe ₂ O ₃	10		
MnO	5-8		
P ₂ O ₅	0.5-1		

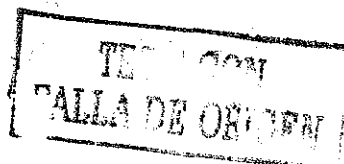
Fuente: <http://tfrnc.gov/hnr20/recycle/waste>; <http://www.steel.org/learning/howmade/caf.htm>

En la tabla 3.3.2-3 se muestran algunas propiedades físicas típicas de la escoria generada en el proceso de aceración.

Tabla 3.3.2-3 propiedades físicas de la escoria del acero	
Propiedad	Valor
Gravedad específica	3.2-3.6
Densidad	1600-1920 kg/m ³
Absorción	arriba de 3%

Fuente: <http://tfrnc.gov/hnr20/recycle/waste>

Como ya se explicó, la composición química de la escoria del acero está dentro de cierto rango, sin embargo, la diferencia desde el punto de vista mineralógica varía de acuerdo a la velocidad de enfriamiento y solidificación, así si el enfriamiento es suficientemente lento, la escoria generalmente cristalizará. La escoria del BOF en muchos aspectos es parecida a la escoria ACBF, la diferencia más notable es que la primera es más densa debido al mayor contenido de hierro. Una de las propiedades químicas de mayor importancia de este tipo de escorias es que tiende a expandirse, esto debido a la presencia de óxido de calcio y magnesio (que conforman el fundente) que no reaccionaron durante el proceso de fundición; estos componentes se hidratan con la humedad del ambiente, con lo que la escoria aumenta su volumen original en alrededor de 10% o más dependiendo de la cantidad de los óxidos presentes (USDE, 2000; <http://tfrnc.gov/hnr20/recycle/waste>). Los óxidos de calcio se hidratan rápidamente lo que causa el cambio de volumen en un periodo de tiempo relativamente corto (semanas), mientras que



la hidratación de los óxidos de magnesio ocurre más lentamente y la expansión es a largo plazo, lo que puede tomar hasta varios años en completarse. Así mismo, cuando este tipo de escoria se expone a las condiciones ambientales por periodo razonable de tiempo, el óxido de calcio libre presente en ella se combina con la humedad del ambiente lo que produce una solución de hidróxido de sodio, posteriormente al contacto con el CO₂ atmosférico se produce calcita (CaCO₃), la cual precipita, este es un fenómeno no deseado si se le da a la escoria un uso posterior en la industria de la construcción (<http://tthrc.gov/hmr20/recycle/waste>). Las principales propiedades mecánicas de esta escoria se presentan en la tabla 3.3.2-4, mostrada a continuación.

Tabla 3.3.2-4 Propiedades mecánicas de la escoria de acero

Propiedad	Valor
Abrasión Los Angeles (ASTM C131)	20-25 %
Angulo de fricción interna	40°-80°
Dureza (medida en la escala de Moh)*	6-7
Razón de soporte California (CBR pos sus siglas en ingles)**	arriba de 300 %

*La dureza de la dolomita medida en la misma escala es de 3 a 4.
 **Valor típico de la piedra caliza es de 100%

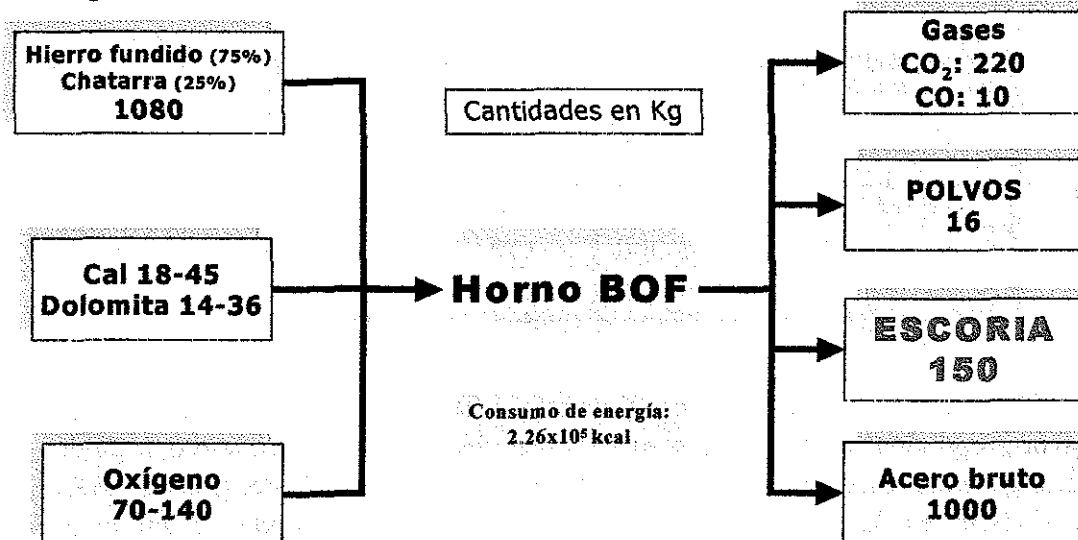
Fuente: <http://tthrc.gov/hmr20/recycle/waste>

3.3.3 Balance de materia.

En general se tienen una producción de escoria en la producción de acero en una relación de alrededor del 10 al 15% por cada tonelada de acero bruto producido. Dependerá principalmente de la calidad de la materia prima, así como de la cantidad de chatarra que se añade junto con el hierro fundido, la cuál puede representar hasta un cuarenta por ciento en algunos casos, claro ésto para la producción de acero a través de los hornos BOF, del cuál se muestra el balance de materia en la figura 3.3.3-1.

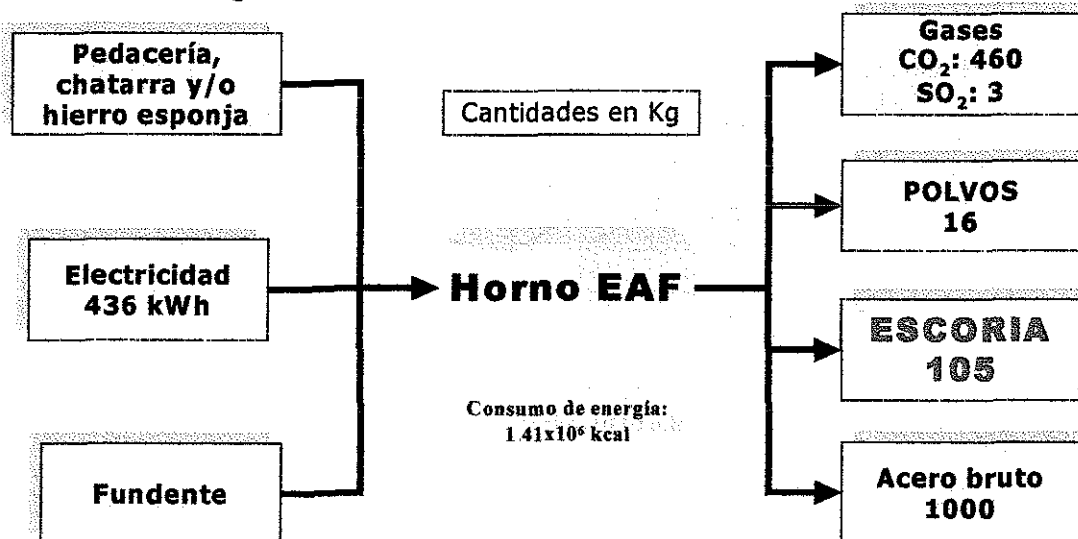
En cuanto a los hornos EAF es más difícil obtener un balance de materia típico, debido a que la carga de materia prima es muy variable, existen diferentes combinaciones de ésta con chatarra, hierro esponja y/o hierro fundido de acuerdo a las necesidades de la fundidora y con que materia prima se cuente, así mismo al variar ésta varía también la cantidad de fundente que se añade, ya que las necesidades de retiro de las impurezas varían; no obstante sean realizado algunos cálculos de la generación de escoria y otros parámetros de producción para este tipo de proceso, lo cuál se muestra en la figura 3.3.3-2 (se deben tomar en cuenta las limitaciones al respecto de estos datos).

Figura 3.3.3-1 Balance de materia en el horno de aceración al oxígeno.



Fuente: Adaptado de <http://www.britannica.com/bcom/eb/article/printable/1/0,5722,119971,00.html>; USDE 2000

Figura 3.3.3-2 Balance de materia en el horno EAF



Fuente: USDE 2000

3.4 Generación de escorias en México.

En base a los datos de los balances de materia se puede realizar una estimación de la cantidad de escorias generadas en México, lo cual se resume en la siguiente tabla:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

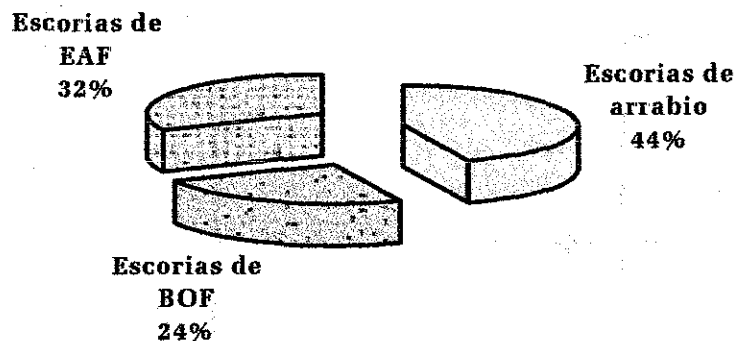
Tabla 3.4-1 Generación de escorias en México, 1999

Proceso	Producción toneladas	Factor de generación Kg/tonelada	Generación de escorias toneladas
Arrabio	4 822 000	300	1 446 600
Acero por BOF	5 246 000	150	768 900
Acero por EAF	10 048 000	105	1 055 040

Fuente: <http://www.ilafa.org/index.html>; USDE, 2000.

En 1999 se estima que México generó en total 3 288 540 toneladas de escorias, de ésta la mayor proporción fue de escorias provenientes del proceso de alto horno, seguido de la escoria generada en el proceso de aceración EAF y finalmente la del proceso BOF, como se muestra en la figura 3.4-1. Se calcula que en el mundo se producen aproximadamente de 250 a 275 millones de toneladas de escoria provenientes de todos los procesos (USGS, 2001).

Figura 3.4-1 Generación de escorias en México en 1999



Fuente: <http://www.ilafa.org/index.html>; USDE, 2000.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. LEGISLACIÓN AMBIENTAL.

Existen reglamentos dispuestos por la *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (SEMARNAT), a través del Instituto Nacional de Ecología teniendo dentro de esta la *Dirección de General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas* (DGMRAR) la cuál se encarga de la creación o modificación de las normas vigentes en lo que respecta a los materiales y residuos peligrosos. Dicha dirección y la misma SEMARNAT a través de la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* han dispuesto un apartado que conforma el *Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos*, en cuanto a la legislación sobre las escorias en general esta regulada por la normatividad sobre residuos peligrosos, expresada en la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, donde se presentan los mecanismos a seguir para considerar un residuo como peligroso, en cuanto, si específicamente se considera a las escorias generadas en el alto horno o en el proceso de aceración como un residuo peligroso, en sus anexos correspondientes, en la tabla 1, giro 2.7 que corresponde a la industria del hierro y el acero, no hace mención en particular a este tipo de escorias. Es importante señalar que un residuo no sólo es peligroso si aparece en dicha lista como residuo peligroso, existe también la norma NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente (antes NOM-CRP-002-ECOL/93) en donde un residuo puede catalogarse como peligroso si mediante la prueba así se considera. Así mismo es necesario mencionar que el propio *Instituto Nacional de Ecología* (INE), no tienen un control directo sobre la generación de las escorias de la industria siderúrgica, ni de cualquier escoria generada en la industria metalúrgica, según lo expresado por ellos mismos (<http://www.semarnap.gob.mx/> y <http://www.ine.gob.mx/>)

Las normas y reglamentos vigentes en la actualidad respecto a los materiales y residuos peligrosos en lo general, en México se tienen como base las normas internacionales al respecto; cabe mencionar que las actuales políticas en México y en la mayoría de los países están tendiendo hacia una globalización, es decir, sus legislaciones tienden a tener congruencia unas con otras (en lo general), para facilitar más una integración comercial, económica y en algunos casos del orden político, como se da en Europa y México no es la excepción con su integración al Tratado de Libre Comercio de Norteamérica y más recientemente con la Comunidad Económica Europea y otros países de Latinoamérica. En relativo a Estados Unidos, en la dependencia encargada de normar al respecto la USEPA (*United States Environmental Protection Agency*, en español *Agencia*

de Protección Ambiental de los Estados Unidos), en su CFR 40 (*Code Federal Regulations, Protection of Environmental*, en español *Código Federal de Regulaciones, Protección Ambiental*, edición de Julio 1 de 1991), hace referencia dentro de su parte 260 a los productos sólidos que se excluyen de entrar dentro del ramo de residuos peligrosos, específicamente en la sección 261.4(b)(7) en su apartado XIII se refiere a los “Iron Blast Furnace Slag” (escorias de fundición de hierro) y en el apartado XVIII al “Basic Oxygen Furnace and Open Hearth Furnace Slag from Carbon Steel Production” (escorias provenientes de hornos de fabricación de aceros al oxígeno y de hornos Siemens-Martin), es la única mención directa y visible sobre las escorias provenientes de la industria siderúrgica.

En los documentos que se analizaron a largo de la presente investigación no se encontró referencia alguna a que las escorias originadas en los diferentes procesos siderúrgicos como residuo final fuese considerado como peligroso por su composición, sin embargo en un documento emitido por el *Departamento de Empleo, Capacitación y Relaciones Industriales de Australia (Department of Employment, Training and Industrial Relations)* denominado *Código de Práctica de la Industria de la Fundición (The Foundry Industry Code of Practice 1999)* en su apéndice uno donde listan las principales sustancias peligrosas en la industria de la fundición hace referencia a las precauciones que se deben tener con los gases producidos durante el proceso de enfriamiento de la escorias siderúrgica ya que dichos gases contienen sulfuro de hidrógeno.

5. Minimización de Residuos.

5.1 Antecedentes.

Las alteraciones en la superficie del planeta a manos del hombre se han intensificado tan rápidamente en ritmo y extensión que científicos y organizaciones se han lanzado a una lucha por limitar las proporciones del impacto humano sobre el sistema terrestre. Cada vez se incrementa el número de países con una legislación que regula la ejecución de estudios de impacto ambiental; aun así se debe reconocer que el hombre como integrante de la Tierra, no ha sido ni será ajeno a su evolución y que su interferencia forma también parte del orden natural. El hombre, desde sus más remotos tiempos, ha tenido la facultad de introducir cambios en la superficie terrestre gracias a la aplicación de la tecnología, sin embargo nunca dichos cambios habían alcanzado la magnitud del anterior siglo, debiéndose principalmente al gran incremento de la población sobre la faz de la Tierra y también a la utilización desmesurada o incontrolada de los recursos que ésta alberga (Preceptor Multimedia Océano, 2000)

Procesos tales como la extensión de la silvicultura comercial, la práctica de una agricultura de supervivencia, al igual que el desarrollo de un creciente pastoreo incontrolado convierte suelos fértiles y ecosistemas en devastados eriales. Aunado a las grandes concentraciones urbanas modernas y sus consiguientes estructuras de hormigón, junto con la construcción de grandes obras públicas, tales como autopistas, carreteras, vías ferroviarias, presas, etc. ocasiona en muchos casos la destrucción de tierras de cultivo incrementando con ello a su agotamiento e improductividad, si a esto le agregamos la escasez de agua en algunos lugares aumenta la probabilidad de desertización. Por otra parte, el uso indiscriminado de plaguicidas para combatir enfermedades y plagas en los cultivos o el abono irracional mediante productos químicos no hace más que agravar el problema, puesto que provocan desde una peligrosa contaminación de las tierras y aguas hasta la generación de efectos de resistencia en los parásitos que se quiere combatir. Todos estos puntos de conflicto hacia el ambiente más el ritmo acelerado de la industrialización y las prácticas del *modus vivendi* de la sociedad moderna han ocasionados verdaderos desastres ecológicos y sanitarios, desde el incremento del conocido efecto invernadero, que ha traído consigo cambios en el clima global, hasta la destrucción de la capa de ozono, sin dejar de mencionar el exterminio biológico de especies y el agotamiento de los recursos (Barrere, 1992)

En otras épocas, los problemas ambientales no ocupaban el primer plano de la actualidad, la población humana era reducida, las fuentes de materias primas parecían

inagotables y el Planeta era una vasta región sin explotar. Los verdaderos problemas surgieron con la industrialización y los modernos métodos de agricultura y silvicultura, de modo, que a principios de la década de los sesenta, los expertos en el ambiente comenzaron a advertir al mundo sobre los peligros que traía como consecuencia la contaminación. La controversia pública se inició con la publicación del libro de Rachel Carson *La primavera silenciosa* en 1962. En aquellos años, hubo grandes mortandades entre las aves de presa, debido a la acumulación en sus tejidos de sustancias venenosas como el DDT; en el Japón mucha gente murió o quedó invalida a consecuencia de los vertidos de mercurio al mar durante años por las fábricas en Minimata; se demostraron los efectos contaminantes de múltiples sustancias como el fósforo, los gases sulfurosos, los detergentes o el plomo de la gasolina y se descubrió que el mar no diluía ni neutralizaba las impurezas a la velocidad que se creía (Preceptor Multimedia Océano, 2000).

La contaminación hoy en día ha llegado a todos los ámbitos, en la atmósfera, en los mares, ríos, lagos y suelo; con desperdicios de todo tipo, el presente capítulo se enfoca a los residuos sólidos de origen industrial, que es a los que pertenecen las escorias. En los sistemas naturales, el ciclo de la materia, en realidad no tiene desperdicios, ya que todo forma parte de un ciclo en movimiento, pero en la actualidad, la industrialización a gran escala, el desarrollo de las grandes ciudades o la propia actividad doméstica generan sustancias y residuos que presentan numerosos inconvenientes de almacenamiento y eliminación. Tales inconvenientes proceden ya sea de la propia naturaleza de los residuos, o de la acumulación de diversos tipos en un mismo punto de almacenamiento. Este último factor afectó básicamente, a las materias que constituyen a los desechos domésticos, los cuales en general se componen de detritus, vidrio, papeles, plástico, compuestos químicos y metales; y los residuos de origen industrial, que lo conforman una infinidad de sustancias sencillas y complejas (Barrere, 1992; Preceptor Multimedia Océano, 2000).

El origen de la agricultura y de la ganadería en el llamado neolítico, permitió al ser humano independizarse de los recursos naturales "espontáneos" para su subsistencia, evitándole además el desplazamiento constante en busca de los mismos e inaugurando la era del transporte y el almacenamiento lejos de su lugar de origen; al tener mayor seguridad en el alimento y un menor desplazamiento obligado, surgen sociedades más estables, que dan lugar a un crecimiento poblacional, como consecuencia de ello, los ciclos naturales de la materia y la energía se va alterando, y la acumulación de desechos va teniendo progresivamente mayores dificultades para ser descompuesta y reciclada. El ser humano a pesar de tener una elevada biomasa (gran tamaño y peso) actúa sólo como productor y consumidor (Vel, 1993).

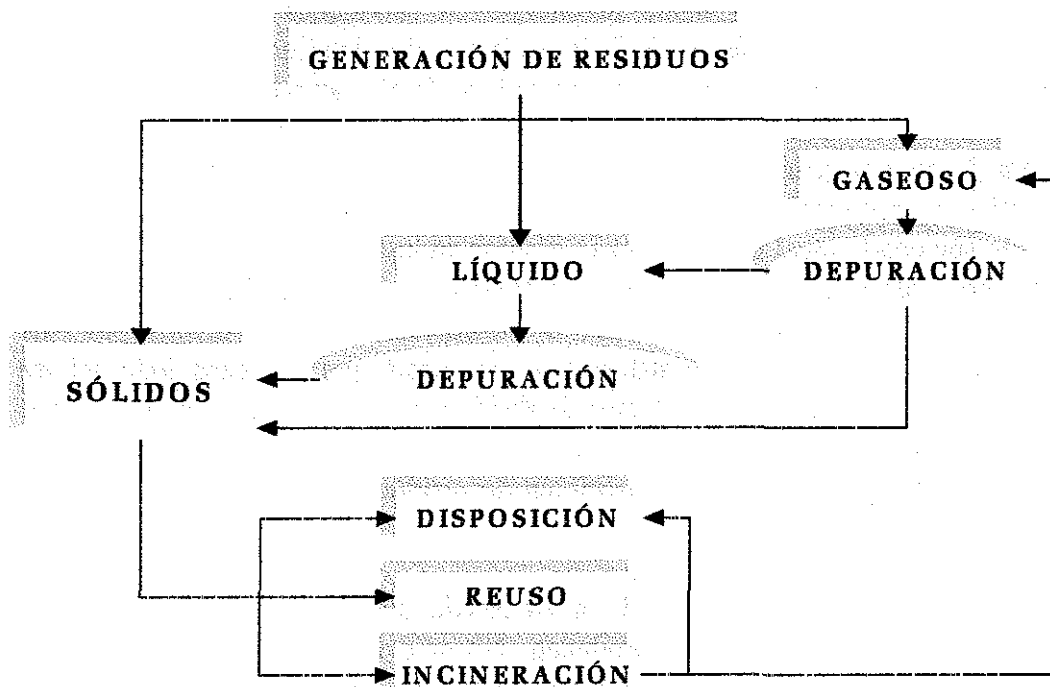
Durante siglos, las sociedades rurales han producido básicamente alimentos de fácil asimilación y descomposición, y bienes duraderos basándose en materias primas naturales (madera, cuero, algodón, lana, etc.) o escasamente transformadas (hierro, cerámica, yeso, cal, etc.), aprovechando la energía en cantidades reducidas. Con la utilización en gran escala de la energía fácil del carbón y del petróleo para el transporte de alimentos y materias primas, y con la electricidad, se da el gran paso para llegar a las elevadas concentraciones de población actuales basadas en una complicada tecnología transformadora de materia primas de elevado consumo y baja eficacia energética, pues emplean energías no renovables y con gran producción de residuos. Así, los residuos generados en la sociedad actual en su mayoría de gran industrialización, a excepción de pequeños núcleos rurales, corresponden a actividades de manufactura, consumo doméstico, explotaciones mineras, agrícolas o ganaderas, etc., los cuales por sus volúmenes crean un desequilibrio en la naturaleza, ocasionado por la incapacidad del ser humano al actuar únicamente como productor de residuos y ser incapaz de reciclarlos y devolverlos al medio sin dañarlo; de aquí la importancia de tener una conducta de prevención y el aplicar políticas de minimización de residuos (Henry y Heinkel, 1999; Ven, 1993).

En la medida en que la sociedad ha cambiado con el tiempo, también han cambiado los tipos de residuos que se producen. No sólo hogares desechan basura y desperdicios, sino que también los procesos industriales y de manufactura crean distintos tipos de residuos. A medida que la tecnología ha avanzado, continuamente se han actualizado y mejorado los métodos para tratar y manejar residuos. Hoy en día, aunque muchos individuos, organizaciones, y empresas toman medidas para prevenir o reducir la cantidad de residuo que generan, es inevitable que ciertos materiales aún deben ser desechados. Controles ambientales y prácticas de manejo sensatas permiten equilibrar el crecimiento industrial con necesidades ecológicas y de salud pública (RCRA, 1997).

5.2 Residuos Sólidos Industriales

Existen tres formas en que se pueden presentar los residuos: gases, líquidos o sólidos, no obstante estas tres formas se encuentran interrelacionadas a través de un ciclo de conversión, cuando un residuo líquido es generado, éste puede ser transformado a un residuo sólido, lo mismo sucede para un residuo gaseoso; así mismo cuando se incinera un residuo sólido, puede dar como resultado la producción de un residuo gaseoso y/o líquido, este ciclo se muestra en la figura 5.2-1 (Murarka, 1987).

Figura 5.2-1 Ciclo de interrelación de residuos.



FUENTE: ADAPTADO DE MURARKA, ISHVAR P., "SOLID WASTE DISPOSAL AND REUSE IN THE UNITED STATES", VOLUME I, CRC PRESS, USA, 1987, P. 3.

Para el presente estudio, son de interés los residuos sólidos industriales, que a continuación se analiza brevemente. La eliminación de los desechos sólidos es un elemento importante en la lucha que actualmente se ha emprendido para la protección del ambiente. Antes de entrar en tema, se expone una clasificación general de los residuos sólidos (Bond y Straub, 1973):

Residuo
Urbano

Residencial
Instituciones Privadas
Oficinas y Servicio Publico
Servicios Médicos (Privado)
Establecimientos Comerciales
Construcción y Demolición

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Residuo
Industrial

Industria Extractiva
 Procesamiento de Alimentos
 Industria del Tabaco
 Municiones y Accesorios Militares
 Textil y Papel
 Derivados de la Industria de la Madera
 Equipo Mobiliario
 Impresión de Papel y Derivados
 Productos Químicos y Derivados
 Industria del Plástico
 Industria del Cuero y Derivados
 Piedra, Arcilla y Vidrio
 Refinamiento de Petróleo
 Metales Primarios (refinación de hierro y
 manufactura del acero, entre otros)
 Industria Metalúrgica
 Maquinaria Eléctrica
 Equipo de Transporte
 Diversas Manufacturas

Se dan a continuación algunos conceptos que son importantes para el tema en estudio, ya sea que con anterioridad fueron ya mencionados, o se hace posteriormente (adaptado de Leroy, 1981; Vel, 1993 y Gilpin, 1996):

- ❖ **Residuo.** Todo material en estado sólido, líquido o gaseoso, ya sea aislado o mezclado con otros, resultado de un proceso de extracción de la Naturaleza, transformación, fabricación o consumo, que por su calidad, su poseedor no puede utilizarlo nuevamente en el proceso que lo generó.
- ❖ **Residuo Sólido.** Es difícil de definirlo en una forma estricta; se considera un residuo sólido aquel que contiene un contenido de agua poco elevado, también es aquel desecho que es “paleable”, es decir, que se lo puede cargar con una pala, aun así es ambigua tal definición, para tales clasificaciones dependerá más bien de la forma que su poseedor lo trate, de acuerdo a sus propiedades en condiciones normales. En función de la actividad en que son producidos, se clasifican en agropecuarios, forestales, mineros, industriales y urbanos.
- ❖ **Basura.** Se considera de forma genérica a los residuos sólidos, sean urbanos, industriales, etc., aunque generalmente cuando se habla de “basura” se hace referencia a los residuos sólidos urbanos (domésticos).

- ❖ **Chatarra.** Restos producidos durante la fabricación o consumo de un material o producto. Se aplica tanto a objetos usados, enteros o no, como a fragmentos resultantes de la fabricación de un producto. Se utiliza fundamentalmente para metales (el caso de este estudio) y también para el vidrio
- ❖ **Escombros.** Restos de derribos y de construcción de edificaciones, constituidos fundamentalmente por tabiques, cerámica, hormigón hierros, madera, plásticos y otros, tierras de excavación en las que se incluyen tierra vegetal y rocas del subsuelo.
- ❖ **Reciclaje.** Proceso simple o complejo que sufre un material o producto para ser reincorporado a un ciclo de producción o de consumo, ya sea este el mismo en que fue generado u otro diferente. La palabra "reciclado" es un adjetivo, el estado final de un material que ha sufrido el proceso de reciclaje. En términos de absoluta propiedad se podría considerar el reciclaje puro sólo cuando el producto material se reincorpora a su ciclo natural de la materia mediante el compostaje. Sin embargo y dado lo restrictivo de esta acepción pura, se extiende la definición del reciclaje a procesos más amplios. Más adelante este se ampliara el tema del reciclado
- ❖ **Reutilizar.** Volver a usar un producto o material varias veces sin tratamiento.

Un punto de suma importancia para el presente estudio es el significado de tratar un desecho, que para el caso de todas las clasificaciones, recuperaciones y transformaciones que permitirán encontrarle una nueva utilidad; o bien depositarlo en el medio exterior sin perjuicio desmedido, sin embargo se debe señalar que el daño no es sólo de naturaleza cualitativa, las descargas de basura se consideran indeseables porque contaminan el suelo y desfiguran el paisaje, aunque es evidente que éste último no puede ser evaluado cuantitativamente, en esta época cuando se vive con computadoras personales, donde sólo se aceptan datos si son cuantificables, no es fácil tomar en cuenta tales criterios, es por eso que en ocasiones es ambiguo cuando se definen tales términos. Las principales fuentes de perjuicio que tienen su origen debido a la actividad humana pueden provenir (Leroy, 1981):

1. De la aparición de nuevos compuestos tóxicos (por ejemplo cianuros, cromo hexavalente, plaguicidas, etc.).
2. Con mayor frecuencia, de una concentración de materiales que ya existen en la naturaleza en forma mucho más diluida (metales pesados, materias orgánicas o radiactividad, etc.).
3. Y también con frecuencia, de la acumulación de materias inertes inutilizables, en apariencia (escombros, sedimentos tratados, escorias siderúrgicas, etc.).

Para eliminar tales desechos existen diferentes formas y técnicas; los depósitos o rellenos sanitarios, los cuales deben efectuarse según las “reglas del arte”, y que en la actualidad es de objeto de una reglamentación precisa; están también los procedimientos tradicionales, es preciso señalar que en la actualidad existe una constante innovación de técnicas, tecnologías, estrategias y programas que posteriormente se mencionan, sin embargo entre los ya conocidos están los fisicoquímicos, que utilizan métodos análogos a las industrias de fabricación; por otro lado se tienen los procedimientos biológicos, en lo que intervienen los microorganismos, que se encargan en la naturaleza de volver a hacer entrar en el ciclo a las moléculas elaboradas por los seres vivos superiores; y finalmente tenemos la incineración donde existe recuperación de energía. Cada uno de estas alternativas tienen, sin embargo algunos inconvenientes, por dar un ejemplo los procedimientos microbiológicos reintegran a los residuos a su ciclo natural, pero no pueden actuar sobre muchos compuestos tóxicos; así que la solución depende en muchos casos de la naturaleza propia del desecho y como se verá más adelante de aplicar la prevención desde el proceso mismo y cuando esto no se pueda, usar el enfoque de la reutilización y reciclado con el fin de lograr lo que en esta época está de moda y que ya parece una necesidad, el desarrollo sustentable (Tchobanoglous *et al.* 1994; Leroy, 1981). Las características y consecuencias de la producción de residuos son (adaptado de Ven, 1993):

- ❖ Los residuos que se generan están compuestos por materias primas en diferente grado de transformación, que han sido transportadas desde lugares cada vez más lejanos, extraídas a profundidades cada vez mayores en el caso de minerales, con el progresivo aumento de su costo económico y energético y la creciente pérdida de fertilidad del suelo.
- ❖ Al no ser devueltas a su lugar de origen ni recuperados para posteriores utilidades, y ser generados cada vez en mayores cantidades, se ha establecido un modelo económico de duración limitada, asociado al agotamiento más o menos próximo de los recursos.
- ❖ Debido a la creciente generación de residuos, cada vez más abundante en cantidad y peligrosos por su composición, es prácticamente imposible su recolección y tratamiento, ya sea para disminuir su peligrosidad, reciclarlos o almacenarlos sin riesgo.
- ❖ Cada vez se generan más residuos de composición fisicoquímica ajena a los materiales existentes en la naturaleza, y a su peligrosidad, conocida unas veces y desconocida otras, se añade su no biodegradabilidad y comportamiento desconocido en el futuro.

- ✧ Como consecuencia de lo anterior, el vertido sobre el entorno de las enormes cantidades de residuos produce daños irreparables en los ecosistemas a gran escala: contaminación de tierras, agua y aire, envenenamiento de flora y fauna, etc., y repercute en la salud humana.

Un residuo industrial tiene dos componentes que lo definen: la cantidad y la toxicidad; se hace referencia a un desecho industrial cuando las cantidades a tratar son notablemente mayores que las de un particular (domiciliar), así mismo se considera también como residuo industrial todo desecho, aunque se encuentre en reducida cantidad, cuya toxicidad ponga en riesgo al ecosistema y la salud humana. En ocasiones, la frontera del residuo industrial no es siempre nítida: entre el gran establecimiento y el pequeño comerciante, existen todos los tamaños de negocios. Además de su volumen y toxicidad, los desechos industriales presentan varias características muy particulares (Leroy, 1981):

- ✧ Cierta irregularidad en su producción y entrega, ya que por ser un producto de la actividad industrial, depende en gran medida de las fluctuaciones diarias y periódicas.
- ✧ Lo constituyen una gran variedad de productos homogéneos, está no suele estar constituida por un único producto.
- ✧ La presencia de materiales corrosivos, por acidez, alcalinidad u otra propiedad química (en este caso caería en la clasificación de residuos peligrosos).

En general los residuos sólidos industriales tienen características muy particulares dependiendo del proceso donde se generan, por lo mismo, la diversidad de residuos generados cubre una gama muy amplia que va desde residuos peligrosos, hasta residuos que no lo son, y de los cuales su mayor problema en la mayoría de los casos es su volumen y por lo tanto la dificultad de su manejo. El caso del presente estudio cae dentro de esta última categoría, a continuación se analiza, en términos generales los residuos producidos por la industria siderúrgica.

5.3 Residuos de la industria siderúrgica.

Como ya se explicó en el proceso de fundición, existen diferentes etapas en la que se generan residuos, desde la fabricación de los moldes y corazones a partir de arena y diferentes aglutinantes que forman parte del moldeo, la limpieza de las piezas fundidas (maquinado) hasta la fundición de los propios metales, en donde se generan las denominadas escorias. En México existen fundidoras que llevan a cabo el fundido principalmente por tres principales tipos de hornos (hornos de cubilote, hornos de

inducción y hornos eléctricos) en donde se incorporan diferentes elementos de aleación y sustancias adicionales, para posteriormente realizar el vaciado, en dicha etapa se generan residuos conformado por las escorias, pedacería de material refractario y otros materiales, que las empresas fundidoras los registran bajo los siguientes conceptos¹:

Residuos Generados en el Proceso de Fundición de Metales Ferrosos	
Polvos	Tierra de recuperación
Escorias	Escorias de fundición
Lodos	Lodos con contenido de metales del lavador de gases
Materiales gastados de producción	Material refractario del horno (ladrillo y piedra caliza) y crisoles

FUENTE: PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL SECTOR DE LA FUNDICIÓN.

La generación de residuos en la industria metalúrgica está relacionada directamente al tipo de material fundido y depende del aglutinante usado para los moldes y corazones, así como la tecnología empleada. Los residuos más importantes de la fundición se generan en las operaciones de desmoldeo, en aquellas empresas que no tienen moldes permanentes o "die casting". Las arenas gastadas y los moldes y corazones no utilizados se clasifican como residuos peligrosos debido al exceso de cantidades de cadmio, cromo, plomo, mercurio y arsénico o compuestos volátiles orgánicos como fenol, difenil, difenilmetano, diisocianato y formaldehído. Algunas fundidoras reutilizan porciones de arena de los moldes, la arena en verde se usa repetidamente, también los residuos finos se reciclan, sólo que cierta cantidad de arena del sistema se debe remover regularmente para mantener sus propiedades. La arena removida, combinada con la derramada, se convierte en arena gastada. Se estima que del 66 al 88 por ciento de los residuos de las fundidoras ferrosas son arena gastada de moldes y corazones; durante el desmoldeo, quedan "terrones" de arena con aglutinantes parcialmente degradados, los cuales se muelen y se reciclan al proceso de moldeo o se disponen en confinamiento o rellenos sanitarios (PML², 1998).

La escoria, relativamente inerte y con una estructura química compleja, la cual ya fue mostrada, y compuesta principalmente de óxidos metálicos del proceso de fusión, material refractario, arena y otros materiales, se puede acondicionar con los fundentes para facilitar su remoción. La escoria se considera como peligrosa sólo cuando los materiales de carga contienen cantidades significativas de metales pesados, como plomo,

¹ Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industrias para el Giro de la Fundición, Comisión Ambiental Metropolitana en colaboración con la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) TÜV ARGE-MEX Diciembre de 1996

² Producción más limpia en el sector de la fundición

cadmio o plomo; durante el proceso de fusión, si el carburo de calcio se usa como agente desulfurizador, la escoria generada por este proceso puede exhibir las características de reactividad; así mismo, si durante el proceso de elaboración de corazones se usan sustancias fuertemente ácidas o básicas para lavar los gases de salida del proceso de elaboración de corazones, los lodos del lavador pueden exhibir la característica de residuo corrosivo (PML, 1998). La industria siderúrgica genera una gran cantidad de subproductos, debido a que es un sistema complejo que enlaza una gran variedad de procesos que le abastecen de los materiales requeridos, debido a su gran diversidad, y como el propósito del presente trabajo no tiene como finalidad el analizar este punto, se describe en el cuadro 5.3-1 en forma resumida y solo con el propósito de ver la inserción que tienen las escorias al respecto. Estos residuos son depositados tanto en basureros que no cuentan con medidas de seguridad, como en rellenos sanitarios con sistema de impermeabilización y recolección de lixiviados, su disposición final dependerá de su clasificación como residuo de acuerdo a la normatividad existente al respecto como será visto posteriormente (Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industriales para el Giro de la Fundación 1996).

5.4 Manejo y control de residuos.

En la actualidad, las economías industrializadas usan desde 45,000 hasta 85,000 kg. de recursos naturales por persona por año — lo que equivale a que cada semana se consume por habitante alrededor de 300 bolsas de comestibles del supermercado. Esta conclusión fue dada en un estudio integral de flujo de recurso de Alemania, Japón, los Países Bajos, y los Estados Unidos titulado *Flujos de Recurso: La Base Material de Economías Industrializadas*. Este reporte consideró el rol de "flujos ocultos" que incluye los desechos de la extracción de minerales, la erosión del suelo, y los movimientos en general a lo largo de la tierra de los recursos naturales originados por el consumo humano. Será difícil mantener esta tendencia en el uso de materiales; si como se espera, que la actividad económica en la primera mitad de este siglo crezca de cuatro a cinco veces, con aumento significativo de la población, es necesario mejorar la eficiencia en el manejo de los recursos. Mientras muchas materias primas son muy abundantes, el impacto ambiental originado por tasas de uso muy altas de los recursos son inaceptable para la sociedad, por lo que prever soluciones técnicas y económicas ya es necesario. En el mismo estudio de flujo de recursos, se explica que debe existir un mejoramiento en la eficiencia del uso de recursos, en la actualidad en los países donde el estudio se llevó a cabo se requieren alrededor de 300 kg de recursos naturales para generar 100 dólares de producto interno bruto (PIB), mientras que con un mejor aprovechamiento de estos recursos se pueden requerir sólo 75 kg de materiales por cada 100 dólares de PIB, indicó el estudio (USGS, 1998).

Tabla 5.3-1 Subproductos y Residuos de la Industria Siderúrgica

PROCESO	SUBPRODUCTO		RESIDUO	
	Descripción	Disposición	Descripción	Disposición
Coquización	Gas del horno	Reutilizado	Lodos de alquitrán	Reciclado
	Licor de amonio	Procesado/vendido	Lodos de cal	Dispuesto
	Alquitrán	Procesado/vendido	Lodos biológicos	Dispuesto
	Aceites ligeros	Procesado/vendido	Polvo ECCA	Dispuesto
Sinterización	Polvo de carbón	Reutilizado/vendido		
	Ninguno	—	Polvo ECCA Lodos PTA	Reciclado/dispuesto Reciclado/dispuesto
Alto Horno	Gas de alto horno	Reutilizado	Polvo ECCA	Reciclado/dispuesto
	Escoria	Reciclado/reutilizado/vendido	Lodos PTA	Reciclado/dispuesto
Aceración al oxígeno (BOF)	Escoria	Reciclado/reutilizado/a	Polvo ECCA	Dispuesto
		Imacenado	Lodos PTA	Reciclado/dispuesto
Horno de arco eléctrico (EAF)	Escoria	Reciclado/reutilizado/a	Polvos de EAF	Reciclado/reutilizado/recuperado/dispuesto
	Ninguno	—	Polvo ECCA Lodos de inyectores Polvos del BOF secundario Polvos de desulfurización del metal caliente	Dispuesto Dispuesto Dispuesto Dispuesto
Proceso de refinación			Emisiones del cucharón	Dispuesto
			Emisiones de argón de la lanza	Dispuesto
Laminado	Escamas	Reutilizado/reciclado/almacenado/vendido	Polvo ECCA Lodos PTA	Dispuesto Reciclado/dispuesto
	Ninguno	—	Lodos PTA Lodos de escape de neblina de polvos Lodos del ablandador de agua Polvo de corte y soldadura Polvo del taller de laminado Polvo de la máquina de chorro de arena para limpiar Polvo/lodo del esmerilado del acero	Dispuesto Dispuesto Dispuesto Dispuesto Dispuesto Dispuesto Dispuesto
Terminado y enfriamiento			Descarga, transferencia y manejo de material fundente Limpieza general de fragmentos de roca y arena Desechos de limpieza y mantenimiento en general	Dispuesto Dispuesto Dispuesto
				Dispuesto
Otros residuos	Ninguno	—		

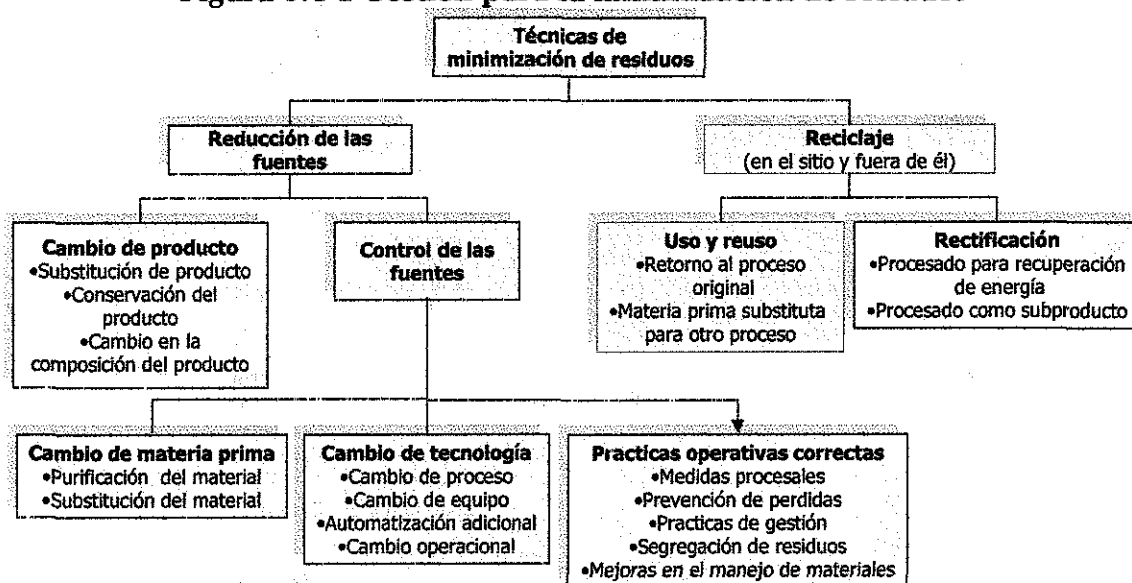
ECCA: Equipo de control de contaminación atmosférica; PTA: Planta de tratamiento de agua

Fuente: AISI, Report on Steel Industry Waste Generation, 1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El manejo y control de residuos son términos que han sido utilizados en diversas políticas ambientales en muchos países y en diferentes ámbitos; las siguientes frases que le son equivalentes y que a menudo se encuentran en la literatura: minimización de residuos, reducción de residuos, tecnología limpia, prevención de la contaminación, tecnologías ambientales, tecnologías de baja y no-producción de residuos. En el presente estudio el término utilizado es de minimización de residuos, el cuál se compone de dos partes principales: reducción de las fuentes y el reciclado, en la figura 5.4-1 se muestra un desarrollo completo al respecto (adaptado de EPA, 1992).

Figura 5.4-1 Gestión para la minimización de residuos



FUENTE: ADAPTADO DE EPA WASTE MINIMIZATION OPPORTUNITY ASSESSMENT MANUAL. GOVERNMENT INSTITUTES, 1992, PAG 3

Es importante señalar que existe una jerarquización en la aplicación de las principales técnicas, cumpliendo el siguiente orden: reducción de las fuentes, reciclado, tratamiento y disposición. A continuación se comenta brevemente cada punto (adaptado de Freeman, 1990):

- ❖ **Reducción de las fuentes.** Es la reducción o la eliminación de los desechos en la fuente, generalmente dentro de un proceso. Las medidas de reducción de la fuente incluyen modificaciones de proceso, materia prima, sustitución, mejoras en la pureza de la materia prima, operación de mantenimiento interno y cambios de práctica en la operación del proceso, incrementos en la eficiencia.
- ❖ **Reciclado.** Es el uso o el aprovechamiento de los residuos como un sustituto efectivo para un producto comercial o como un ingrediente o como materia prima

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en un proceso industrial. Incluye la corrección de las fracciones constituyentes útiles dentro de un material de desecho o la extracción de contaminantes de los residuos para permitirle ser reusado. Este punto para el presente estudio es de suma importancia, por lo que posteriormente se amplía.

- ❖ **Tratamiento.** Cualquier método, cualquier técnica, o cualquier proceso que cambia el carácter físico, químico, o biológico de cualquier residuo sea o no peligroso, para neutralizar a tal residuo, para recuperar energía o recursos materiales de los desechos o para dar a tales desechos un carácter de no-peligrosidad, o menos peligroso, más seguro para manejar, tratable para la recuperación, fácil de manipular para el almacenamiento, o reducir su volumen.
- ❖ **Disposición.** Es la descarga, depósito, inyección, vertido, filtración, o la localización de un confinamiento en el suelo o cualquier agua a fin de que tal desperdicio o cualquiera de sus constituyentes puedan incorporarse en el aire o pueden ser descargados en cualquier agua, incluyendo agua subterránea.

Como se ha mostrado, existen actualmente varias alternativas en la minimización de los residuos y disponibles para la mayoría de las etapas de manufactura. La tecnología sin embargo, por sí sola no reducirá la generación de éstos, únicamente tendrá éxito un programa integral de minimización de residuos, el cual deberá de realizarse a través de una gestión que sea parte de la política de la empresa, los beneficios dependerán de la selección de la tecnología, de los procedimientos apropiados, de su correcta implementación, de la capacitación de los empleados y de un constante monitoreo del programa. La base para el éxito de cualquier programa implementado es evaluar los desechos que se generan y su producción, con esta información se puede aplicar y evaluar una gama de técnicas de reducción con el fin de que se conozcan sus beneficios (Freeman, 1990)

En ocasiones, diferentes asociaciones y agrupaciones del sector industrial pueden proveer información técnica sobre la gestión de residuos; así mismo, las publicaciones especializadas son otra fuente de información, las cuales contienen artículos con estudios de casos, referencias y sugerencias de expertos en la materia. En Estados Unidos, por ejemplo, la USEPA ha establecido una oficina de prevención de contaminación para el apoyo de esfuerzos en la reducción de residuos, estos esfuerzos incluyen investigación, educación e información técnica. Finalmente la minimización de residuos depende, en parte, en cambiar la visión que se tiene sobre éstos, no como algo que es inevitable, que lo único que se puede hacer es darle tratamiento y disponerlo, salvo en los casos que realmente no existe opción, sino que la minimización de residuos es todo un proceso con

muchas opciones factibles de ser aplicables y algo muy importante es que trae beneficios económicos (EPA, 1992).

Entre los incentivos que en un momento dado puede motivar la implementación de un programa de minimización de residuos por parte de los ejecutivos de la industria están: (1) el costo asociado con generar y disponer de los residuos, (2) el establecimiento de políticas corporativas que conduzcan a la implementación y metas de minimización de residuos, (3) el comprender que la minimización de residuos mejorará la posición ambiental de una compañía por reducir el riesgo e impacto que trae consigo un incorrecto manejo de los residuos, además de que tendrá una eficiente utilización de la materia prima, y (4) el cumplimiento de normas legales, con lo que las auditorías por parte del estado serán más fáciles de cumplir, y con el establecimiento de un programa de minimización de residuos y demostrar su progreso se pueden obtener incentivos administrativos y fiscales (ya en el Plan de Desarrollo en el Sector Ambiental 1995-2000, se hace referencia a los incentivos fiscales como estrategia para el cumplimiento de la legislación ambiental correspondiente). Si además se toman en cuenta los costos incurridos por parte de una empresa por generar y manejar incorrectamente los residuos, entre los que destacan: bajo aprovechamiento del valor de las materias primas; los costos administrativos que se producen al tener que disponer de un sitio para el almacenamiento temporal de los residuos, así como el costo operativo que ello conlleva, como lo es el control de registros de residuos y su embarque; la disposición final de los residuos y el costo asociado por los posibles daños a terceros, si los desechos están inapropiadamente dispuestos, sin dejar de mencionar las multas correspondientes por parte del gobierno (Freeman, 1990).

5.5 Tendencias actuales sobre minimización de residuos.

En la actualidad se ha dado impulso a los aspectos ambientales, principalmente en los últimos quince años, debido esto al deterioro que en el medio ha ocurrido en el recién terminado siglo XX. Esta concientización ha surgido principalmente de los países industrializados, organismos internacionales y organizaciones no gubernamentales; como ya se explicó en los antecedentes previos de este capítulo, debido a un desarrollo humano que se dio sin importar el deterioro del ambiente, el daño que se fue acumulando ha sido tal, que los cambios han sobrepasado una delimitación local para pasar a ser globales, como ejemplos se tienen el cambio climático de la tierra por la excesiva emisión de CO₂ y la destrucción de la capa de ozono por los compuestos fluoroclorocarbonados. Es así como, en los últimos años han surgido nuevas políticas, estudios, programas, estrategias y nuevos campos científicos para abordar los problemas ambientales y la forma en que un

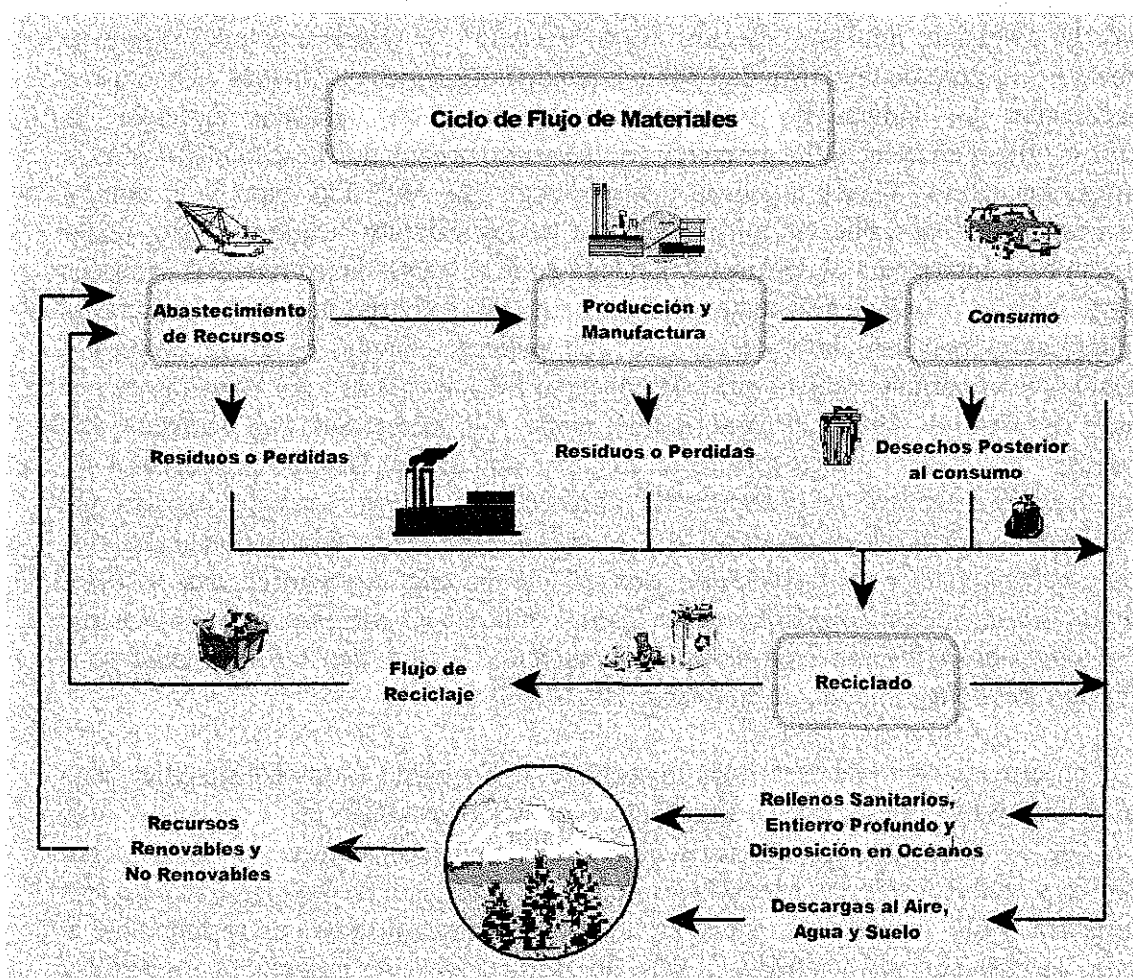
desarrollo económico puede darse en equilibrio con el ecosistema. A continuación se presenta brevemente lo que en la actualidad se está desarrollando sobre un desarrollo responsable y por ende con la minimización de residuos.

Uno de los primeros antecedentes serio y claro al respecto de la problemática ambiental se produce cuando a finales de 1983, el Secretario general de las Naciones Unidas le pide a la Sra. Gro Harlem Brundlam (en ese momento la única política en todo el mundo que ascendió a Primer Ministro procedente del Ministerio del Ambiente en Noruega) que creará una comisión independiente que analizará las formas en que la creciente población del planeta pudiera satisfacer sus necesidades básicas el próximo siglo (es decir, el actual). Así después de estudios y debates en todo el mundo, en abril de 1987, dicha comisión publicó *"Nuestro Futuro Común"* en donde a grandes rasgos se describe que el futuro de la humanidad pelagra debido a los actuales sistemas económicos internacionales, los índices de crecimiento poblacional, los sistemas agrícolas, la creciente cantidad de especies en extinción, el desarrollo urbano, los procedimientos de la administración de los bienes comunes (los océanos, la Antártida, etc.) y la cultura *"armamentista"*; se describe así mismo muchos de los cambios necesarios para poder prever una base futura para el desarrollo, fundada en el aumento de los recursos naturales y la participación popular en la toma de decisiones. Sin embargo uno de los conceptos más importante, que este informe de casi 400 paginas expone, es el de desarrollo sustentable (es importante señalar que este concepto fue mencionado por primera vez por Naciones Unidas en 1972) el cual define como *"el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades"*. Otro concepto sobre el mismo, expresa que *"el desarrollo sustentable representa una economía que existe en equilibrio con los recursos del planeta y su ecosistema natural; desarrollo sustentable trae calidad ambiental y crecimiento económico en armonía... éste es un concepto que reconoce que las actividades económicas y consideraciones ambientales necesitan ser integradas para un bienestar de la humanidad a largo plazo"* (BCSD-GM, 1997).

Con este concepto de desarrollo sustentable, han surgido en los últimos diez años nuevas teorías y filosofías sobre un desarrollo económico armónico con el ecosistema de manera que se minimicen los impactos ambientales sin detrimento de un crecimiento económico y satisfaciendo las necesidades de la sociedad. Una de las primeras acciones que surgieron y que ya fue mencionada en la gestión de minimización de residuos fue el reciclaje, no obstante esta actividad va más allá de su aplicación tradicional, en botellas de vidrio y plástico, envases de latón y aluminio, y del papel; esta actividad debe de diversificarse en todos los ambitos productivos, desde una primera etapa en el proceso

mismo que lo genera (incluida la recuperación de energía), en una segunda etapa que es la utilización de los residuos en la manufactura de un nuevo producto y en una tercera etapa en donde se reutilice el producto que ha sido desechado por el consumidor, lo que cerraría el ciclo de vida del producto (EPA, Buy-Recycled Series, 1997). Sin embargo hoy en día el reciclado es sólo una parte de una estrategia global que han surgido en la utilización eficiente de los recursos. Dos de estas estrategias son las denominadas *Ecología Industrial* y la *Sinergia del Subproducto*, y aunque la primera es más diversa y generalizada, es necesario mencionar la segunda en una forma particular debido a su estrecha relación con los objetivos de la presente investigación.

Figura 5.5-1 Ciclo de Flujo de Materiales



FUENTE: [HTTP://198.183.146.250/CGI-BIN/OM_TSAPT.DLL?CLIENTID=20629067&INFORMBASE=GS&IP33_NFO&JUMP=MEF2000-FIGURE/208&SOFTPAGE=DOCUMENT42&JUMPDEST_MEF2000-FIGURE/208](http://198.183.146.250/CGI-BIN/OM_TSAPT.DLL?CLIENTID=20629067&INFORMBASE=GS&IP33_NFO&JUMP=MEF2000-FIGURE/208&SOFTPAGE=DOCUMENT42&JUMPDEST_MEF2000-FIGURE/208)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La disciplina de la ecología industrial se ha descrito como la ciencia de la sustentabilidad; las actividades humanas que afectan el ambiente regularmente cambian los flujos naturales de los materiales dentro del sistema terrestre, modificando su hidrología, sus suelos, erosionándolos y dragándolos, así mismo modifican la composición del agua, aire y suelo. Es por esta razón que la ecología industrial estudia los flujos de materiales y energía para las actividades industriales y de consumo, y los efectos que éstos traen al ambiente, así como los factores económicos, políticos, de regulación y sociales que influyen en la transformación de los recursos. La investigación del comportamiento de los flujos de materiales puede dar una clara idea de cómo el uso de los recursos naturales afecta la sociedad, la economía y el ambiente desde los procesos de extracción, producción, consumo, disposición y pérdidas o disipación al medio; busca definir la relación entre los flujos de materia y energía en un proceso dado y como es la dinámica de los requerimientos actuales de recursos para con ello conocer los requerimientos futuros de recursos naturales y los desechos que su utilización generará, aborda también políticas de mercado y los efectos en las decisiones del consumidor. Todo este proceso que engloba la ecología industrial se visualiza en forma simplificada en un ciclo de flujo de materiales, en donde éstos se rastrean a través de su ciclo de vida desde la extracción, el proceso de manufactura, su consumo, reuso o reciclado y disposición; en el esquema 5 5-1 se ejemplifica este ciclo (USGS, 1998).

Dentro de esta nueva estructura de la ecología industrial se han propuesto alternativas de solución para los residuos: reciclado, remanufactura y rediseño. Aunque algunos de estos puntos ya han sido mencionados en la gestión de minimización de residuos, es importante retomarlos nuevamente dentro de la estructura de la ecología industrial (adaptado de USGS, 1996; USGS, 1998 y Gilpin, 1996):

- ❖ **Reciclado.** Es el retorno de un residuo al sistema de producción para su utilización en la manufactura de bienes, con lo cual se obtienen beneficios económicos, ahorro energético y se minimiza su impacto en el ambiente ya que no se dispone en el medio, además evita la extracción de materia prima conservando con ello los recursos del ecosistema. Desde hace varios años el reciclado se ha dado con éxito con ciertos materiales y procesos, es bien sabido el reciclado del papel, latas de aluminio, botellas de vidrio y en el proceso de fundición de obtención de acero con la utilización de chatarra y pedacería. Sin embargo en la actualidad esta disciplina puede aplicarse, con los estudios de factibilidad previos, a gran parte de los sectores industriales, de servicio y consumo. Una de las áreas en donde el reciclado ha tenido éxito, es en la industria automotriz, donde en la actualidad se recicla el 75% de sus partes en alguna forma (primordialmente lo metálico); así mismo existe el reuso del agua, principalmente en la industria.

- ❖ **Remanufactura.** Es el proceso de desarmar o desmontar un producto desechado, usado o desgastado, que al ser limpiado, reparado o reemplazado las piezas defectuosas, se ensambla nuevamente con lo que se obtiene un producto reconstruido; muchos productos pueden ser remanufacturados, desde autopartes hasta maquinas expendedoras de refrescos. En los Estados Unidos existen alrededor de setenta y tres mil compañías dedicadas a esta actividad con ventas anuales (1996) de cincuenta y tres mil millones de dólares. La remanufactura es una forma ideal de reciclado, ya que recupera de alguna forma parte de los costos de mano de obra, energía y costo de materiales. Esta actividad es aplicada con éxito en la industria automotriz, un estudio que llevó a cabo el Tecnológico de Massachusset, indicó que aproximadamente el 85% de la energía consumida en la manufactura de componentes de automóviles fue preservada en la remanufactura de algunas de sus partes. Otro estudio realizado en Alemania encontró que la energía anual ahorrada por la remanufactura en todo el mundo equivale a la energía generada por cinco plantas nucleoelectricas. No obstante, la remanufactura tiene ciertos inconvenientes, principalmente de mercado, el tener que competir con nuevos productos con tecnología de vanguardia, coloca en una posición inferior a los productos de remanufactura
- ❖ **Rediseño.** En cualquier proceso se requiere un uso eficiente de los recursos, así mismo se requiere de continua innovación del producto de forma que sean competitivos en el mercado, ésto con igual o menor uso de energía en su manufactura y que en todo el sistema productivo los residuos sean lo mínimo posible, por lo que cualquier industria que se catalogue como vanguardista debe de estar en continuo rediseño de sus productos y procesos de manufactura. El rediseño trae tanto beneficios ambientales como económicos; un ejemplo de ésto fue el caso de las latas de aluminio, en 1976 Daniel F. Cudzik, empleado de la Reynolds Metals Company inventó el mecanismo que permite abrir las latas y consumir su contenido sin que se desprenda parte del mecanismo de apertura (en ingles se le denomina pop-top, que es la pieza que se jala y abre la lata, sin desprenderse), antes dicho mecanismo daba como consecuencia el desprendimiento de la pieza de aluminio, una especie de argolla, por lo que era difícil recuperarlo, y por lo regular terminaba en la basura, desde su rediseño, se han ahorrado alrededor de 200 mil toneladas de aluminio en Estados Unidos, lo que equivale a tres mil millones de kilowatts-hora de energía eléctrica.

Otra de las estrategias para la preservación del ambiente, sin reducir los beneficios económicos, es lo que se le ha denominado *sinergia del subproducto* (otro nombre que se le ha dado es simbiosis industrial), definido como “*la sinergia entre*

diversas industrias, agricultura y comunidades resulta en una conversión provechosa de subproductos y residuos a recursos valiables, con lo que se promueve la sustentabilidad". En palabras más sencillas es crear una interrelación entre diversos sectores productivos de forma que, lo que para una industria es un residuo, a otra le sea de utilidad como materia prima para la manufactura de un nuevo producto, de manera de que se desperdicie lo mínimo de los recursos naturales. Se han identificado seis principios fundamentales que se requieren para llevar a cabo la sinergia del subproducto: colaboración, motivación, comunicación, innovación, participación y evaluación. Debe haber una colaboración y comunicación estrecha con otros sectores productivos del área, de manera que fluya la información sobre los productos manufacturados y los residuos generados; al estar en constante innovación y rediseño existirán alternativas, tanto en el mejoramiento del sistema productivo, como en el manejo de los residuos. Para el éxito de cualquier programa o estrategia debe haber una plena participación por parte de la industria, gobierno y sociedad y pleno interés de colaboración; por supuesto debe darse una evaluación y retroalimentación que mejore continuamente lo hecho, y finalmente todo esto impulsado y motivado por un mayor beneficio económico con equilibrio del ecosistema. Sin embargo aun existen barreras que impide una plena aplicación de este tipo de programas, principalmente el desconocimiento, aunado a los problemas típicos que normalmente están presentes, son los problemas técnicos, económicos, geográficos, regulatorios, etc. Es precisamente la utilización de la escoria, un ejemplo donde este programa ha tenido éxito, que posteriormente será abordado y descrito (BCSD-GM, 1997).

6. ALTERNATIVAS DE RECICLADO PARA LAS ESCORIAS SIDERURGICAS

6.1 Las escorias y la producción de cemento.

6.1.1 Antecedentes.

Las escorias se utilizan en la industria de la construcción, dentro de ésta, una en las que más destaca es en la producción de cemento, es así que se repasarán algunos conceptos relativos a este material, así como sus antecedentes históricos y posteriormente una descripción breve del proceso de manufactura del cemento. El cemento en su definición más simple se describe como un material de construcción que una vez hidratado, es capaz de endurecerse en contacto con aire o con el agua adquiriendo, en un tiempo relativamente breve, una elevada resistencia a la compresión. En términos generales es una sustancia adhesiva utilizada en la construcción de la ingeniería civil y en edificaciones urbanas. Su endurecimiento es resultado de la hidratación ocurrida como consecuencia de una combinación química de los constituyentes que están presentes en el cemento con el agua (<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0.5716.114520+1+108319.00.html>, Enciclopedia Salvat, 1999).

Los materiales de construcción han sido vitales en el desarrollo de la humanidad, ya en la Biblia se hace referencia a la manufactura de ladrillos a partir de materiales arcillosos para la construcción de la torre de Babel (Witt, 1966). Los primeros antecedentes históricos de un material parecido al cemento tal y como se conoce actualmente surgen en la antigua Roma en donde se hacía una mezcla de cal, ceniza volcánica y agua con lo cual obtenían una pasta que ellos utilizaban en sus construcciones hace alrededor de 2000 años; la ceniza volcánica se extraía de las cercanías de la ciudad Pozzuoli (localizada en lo que ahora es Italia), la cual estaba particularmente rica en minerales de aluminio y silicato, que al combinarse con los materiales apropiados, en este caso los romanos la mezclaron con cal dando lugar al clásico cemento puzolánico de la era romana, la misma palabra cemento proviene del término latino *caementum* que significa gravilla de piedra (Lea, 1971, Blanks y Kennedy, 1955). Sin embargo la evolución moderna de este material de construcción comenzó a mediados del siglo XVIII, cuando John Smeaton en 1756 edificó el faro Eddystone en la costa de Plymouth, Devon, Inglaterra con cal, él fue el primero que realizó investigaciones del comportamiento y propiedades de la cal como material de construcción; ya para los años de 1800 en Francia y en la misma Inglaterra se realizaba un material parecido al cemento que se obtenía quemando nódulos caliza arcillosa; por otro lado en los Estados Unidos en 1805 surgió la llamada roca de cemento que pertenece a la clase denominada cemento natural, ya que no requiere un proceso sofisticado para su obtención, sólo se quema ligeramente, su inconveniente es ser un producto de composición no

controlada. En 1810 Edgar Dobbs patentó la manufactura de un material de construcción con piedra puzolánica a la que le denominó cemento romano (Witt, 1966). Pero el nacimiento del cemento es atribuido al albañil de Leeds, Joseph Aspdin en Yorkshire, Inglaterra quien en 1824 obtuvo la patente de lo que él denominó cemento portland debido a la semejanza de éste con una caliza natural que se extraía de la Isla de Portland, Inglaterra; la cuál consistía básicamente de una mezcla sintética de piedra caliza y arcilla; y después este producto, para darle el tratamiento adecuado, es decir, para obtener el cemento moderno, en 1850 Isaac Carlos Johnson lo calentó obteniendo las propiedades adecuadas que en la actualidad posee este material (Lea, 1971; <http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0,5716,114520+1+108319,00.html>).

En 1868 se realiza la primera construcción de concreto reforzado, posteriormente comienza la investigación sobre la química del cemento, en 1887 Le Chatelier descubre el silicato tricálcico, uno de los componentes que se forman en su proceso de fabricación. Para 1902 surge la Asociación de Cemento Portland, iniciando con ello un desarrollo cuesta arriba sobre la manufactura del cemento y tecnologías de construcción. En 1906 surge en México la primera cementera en Hidalgo, N.L., que a la postre daría origen a lo que hoy en día es CEMEX, la cuarta cementera más grande del mundo (Witt, 1966; <http://www.op.cemex.com.mx:8080/ctcident.nsf/pages/ind-ctec.htm>). En la actualidad la industria del cemento ha sido uno de los sectores de más rápido desarrollo en los últimos decenios a causa de las recientes necesidades de vivienda, obras públicas y edificios industriales. Con mucha frecuencia, al igual que con el acero, se toman las cifras de producción de cemento como índices que reflejan el grado de desarrollo económico de un país (<http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761560028>).

6.1.2 Proceso de fabricación del cemento.

El proceso de fabricación del cemento ha evolucionando con el paso del tiempo, se ha hecho más eficiente, tanto en el aprovechamiento de las materias primas, como el mejor manejo de la energía utilizada en el sistema. Los cementos se pueden clasificar de una gran variedad de formas, por su utilización, por su composición, por su resistencia, por sus características especiales, etc. (<http://www.icce.es/icce/ARTICULO15.htm>), una de las clasificaciones comunes es la que a continuación se presenta (adaptado de Lea, 1971; <http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761560028>; <http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0,5716,114520+1+108319,00.html>):

- Cementos naturales se obtienen por trituración, previa cocción de rocas calcáreas y arcillosas a temperatura baja, los cuales son de fraguado rápido y de baja resistencia

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

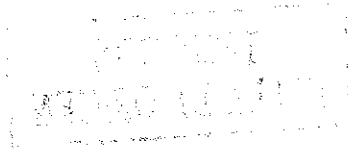
- ❑ Cementos aluminosos se obtiene por trituración de una mezcla fusionada de caliza y bauxita (1500 a 1600 °C) en un horno eléctrico o rotatorio, la composición final es de 35 al 40 por ciento de cal, 40 al 50 por ciento de alúmina, hasta el 15 por ciento de óxidos de hierro y preferentemente no más de 6 por ciento de óxidos de silicio. Entre sus propiedades destaca su rápido endurecimiento, aunque de resistencia y duración limitada, tiene además una elevada resistencia al ataque químico.
- ❑ Cementos puzolánicos, los cuales son materiales, que previamente se han mencionado, hechos de roca volcánica (puzolana, aunque en la actualidad puede ser sustituido por materiales artificiales como son arcillas quemadas, cenizas o pizarras) y clínquer vitrificado en proporción adecuada, aunque la piedra volcánica por si sola no posee propiedades cementantes, sin embargo contienen compuestos de silicio en forma reactiva capaz de combinarse con la cal en presencia de agua para dar materiales con propiedades cementantes, dando lugar a un cemento con alta resistencia a la corrosión.
- ❑ Cementos especiales, que se caracterizan por la adición de sustancias que acentúan determinadas propiedades, dentro de éstas entran entre otras, los cementos a base de escoria de alto horno, más adelante se ampliara la información al respecto.
- ❑ Cemento portland, el más famosos y ampliamente difundido de todos, es fabricado a partir de piedra caliza, arcilla caolinítica y yeso básicamente. A continuación se abordará de una manera condensada la clasificación y manufactura del cemento portland con el fin de que sirva de antecedente para entender la interacción de éste con la escoria y su utilización como aditivo en los materiales de construcción.

Tabla 6.1.2-1 Tipos de Cemento Portland (según la norma ASTM C 150)

Tipo	Nombre	Aplicación
I	Normal	Para uso general, donde no son requeridos
II	Moderado	Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiere un moderado calor de hidratación
III	Altas resistencias	Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas
IV	Bajo calor de hidratación	Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación
V	Resistencia a la acción de sulfatos	Para uso general y además en construcciones donde exista ataque a sulfatos
IS	Cemento portland de escoria de alto horno	Para uso general en las construcciones de concreto
S	Cemento de escoria	Para uso común donde se requieren resistencias inferiores
SM	Cemento portland modificado con escoria	Para uso en todo tipo de construcciones de concreto

Fuente: <http://wwwapp.cemex.com.mx:8080/ctcident.nsf/pages/ind-ctec.htm>

Cada país tiene su propio estándar para el cemento portland, así que no hay ningún estándar universal internacional. Los Estados Unidos usan la especificación listada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM C-150 la Especificación Estándar para el Cemento de Portland). Hay algunos otros países que también han adoptado esto como su estándar, sin embargo, hay otras incontables especificaciones. Lamentablemente,



ellos no usan los mismos criterios para la medición de propiedades y la definición de características físicas entonces ellos son prácticamente "no traducibles". La Asociación de Cemento Europea localizada en Bruselas, Bélgica, publica un libro titulado "Las Normas de Cemento del Mundo" (<http://www.portcement.org/>).

Los tipos diferentes de cemento portland se fabrican para encontrar varias exigencias físicas y químicas. La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) la Especificación C-150 prevé ocho tipos de cemento de portland. El tipo I es un cemento normal, de uso general conveniente para todos los empleos. Esto se usa en proyectos de construcción generales como edificios, puentes, pisos, pavimentos, y otros productos de concretos. El tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfato sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc., basta decir que la norma ASTM C 150 establece como requisito opcional un máximo de 70 cal/g a siete días para este tipo de cemento. El tipo III es un cemento que desarrolla altas resistencias a edades tempranas, de 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda; su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras. El tipo IV es utilizado cuando por necesidades de la obra se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo; el desarrollo de la resistencia de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento y por lo mismo su utilización va dirigida a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas donde hay poca posibilidad para que el calor se disipe. El tipo V se usa sólo en las estructuras de concreto que se expondrán a la acción severa de sulfatos, principalmente donde el hormigón está en contacto con el suelo y con aguas subterráneas que tienen concentraciones altas de sulfatos

(<http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761560028>, <http://www.britannica.com/bson/eb/article/0/0,5716,114520+1+108319,00.html>, <http://wwwapp.cemex.com.mx:3080/ctcident.nsf/pages/ind-ctec.htm>, <http://www.portcement.org/>).

Además de los ocho tipos de cemento portland, se fabrican otros cementos hidráulicos. Entre estos se encuentra el cemento de portland blanco. El cemento portland blanco es idéntico al de color gris excepto en el color, durante el proceso de la fabricación, los fabricantes seleccionan las materias primas que contienen sólo cantidades insignificantes de hierro y óxidos de magnesio, las sustancias que le dan el color gris al

cemento. El cemento blanco se usa siempre que existan consideraciones arquitectónicas que especifican el hormigón o mortero blanco o coloreado. La manufactura del cemento portland requiere como materia prima principalmente piedra caliza y arcillas, haciendo un análisis más detallado se pueden dividir en dos tipos las materias primas: materiales primarios, los cuales están presentes en más de un 85% en peso en el clínquer y los materiales secundarios que están presentes en un máximo de 15% que corresponde a componentes menores, en la siguiente tabla:

Tabla 6.1.2-2 Materiales Primario y Secundarios

Materia Prima	Primario (P) o Secundario (S)	Principales Constituyentes
Piedra Caliza	P	Ca
Roca de cemento (natural)	P	Ca, Si, Al, Fe
Marga	P	Ca
Concha de ostra	P	Ca
Carbonato de calcio (subproducto)	P	Ca
Arcilla	P	Si, Al, Fe
Pizarra	P	Si, Al, Fe
Escoria	P	Si, Al, Fe
Arena	S	Si
Piedra arenisca	S	Si
Bauxita	S	Al
Diáspora	S	Al
Mineral de hierro	S	Fe
Pirita	S	Fe

Fuente: Witt, J.C., Portland Cement Technology, Chemical Publishing Company, N.Y., 1966.

La materia prima calcárea más común son la piedra caliza y la tiza; las arcillas, pizarras, el caolín y fangos estuarinos son las materias primas arcillosas. Existen en la actualidad otros materiales que han sustituido en parte a los minerales de extracción, refiriéndose a los desechos industriales como lo son las cenizas, el carbonato de calcio y las escorias de alto horno, aunque su uso es aun restringido. Otra materia prima esencial es el yeso, que cumple el vital papel de retardar el endurecimiento de la mezcla de concreto u hormigón (<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0.5716.114520+1+108319.00.html>).

En términos generales la fabricación del cemento consta de cuatro etapas: (1) extracción y molienda de las materias primas, (2) la mezcla de los materiales en las proporciones adecuadas, (3) calentamiento de la mezcla en un horno rotatorio (clínquerización) y (4) molienda del producto, conocido como clínquer, junto con yeso para moderar su endurecimiento. Así la primera etapa de manufactura del cemento portland consiste en la extracción de las materias primas de la cantera, la que generalmente se encuentra cercana a la planta, en donde se transportan por medio de camiones, vagones de carga de ferrocarril, bandas transportadoras o teleférico, también se transportan en un estado húmedo o "mojado con agua" a través de tuberías, se transporta así a unos trituradores primarios y secundarios, existe una etapa previa de remoción de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

materiales indeseables que contiene la materia prima. La piedra primero se reduce a un tamaño de 5 pulgadas (125 mm) en el triturador primario, en el siguiente triturador su tamaño se reduce de 3/4 pulgadas (19 mm), la transportación de un equipo a otro se lleva generalmente por medio de bandas, ya en el tamaño deseado, se almacenan por separado, dicha molienda puede ser en seco o húmeda según sea lo conveniente (Lea, 1971; <http://www.portcement.org/>)

Una primera aproximación de la composición química requerida para un cemento en particular se obtiene con la extracción selectiva y el control de la materia prima que se alimenta a los trituradores o molienda, sin embargo se obtiene un control más fino al seguir el comportamiento de dos cargas de materia prima de composición diferente a lo largo del proceso. En el proceso seco, estas mezclas se almacenan en silos, los tanques de mezcla se utilizan en el proceso húmedo. La mezcla de los materiales secos se asegura a través de una agitación cuidadosa y vigorosa inducida con aire comprimido, mientras que en el proceso húmedo la mezcla se lleva a cabo a través de medios mecánicos y también de aire, o ambos; en estos casos dicha mezcla contiene de 35 a 45 por ciento de agua, en algunos casos ésta se filtra, reduciendo con ello el contenido de agua alrededor del 30 por ciento, con lo que se reduce el consumo de combustible, en el proceso de clinquerización (<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0.5716.114520+1+108319.00.html>) El siguiente paso consiste en alimentar al horno con la mezcla molida, en el caso del proceso húmedo se introduce la pasta húmeda (ésta tiene algo de más movilidad para el caso de transportarla), en el caso del proceso seco la mezcla que se alimenta se muele y directamente se introduce al horno, en realidad ésta es, en un sentido práctico, la diferencia de ambos métodos, en lo demás es el mismo proceso. Con anterioridad los hornos eran los denominados hornos de botella, seguidos de los hornos de cámara y luego surgieron los hornos de eje continuo, este último se ha modernizado y se utilizan aun en algunos países, sin embargo el horno empleado en la actualidad es el horno rotatorio. Estos hornos son de hasta 200 metros de largo y seis metros de diámetro, los más largos se utilizan en el proceso húmedo; estos hornos son de acero, cilíndricos, recubiertos con material refractario, giran despacio sobre su eje y está ligeramente inclinado con respecto a su horizontal, estando la parte más elevada, en la entrada de la mezcla; en la parte final inferior hay una llama en forma de ráfaga, producida por la quema con precisión controlada de carbón pulverizado, combustible líquido o gas, las temperaturas generadas tienen una gama de 1350° a 1550 °C (<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0.5716.114520+1+108319.00.html>; <http://www.portcement.org/>), durante el proceso se generan una serie de reacciones que dan lugar a lo que se conoce como clínquer, a continuación se presenta un resumen de las reacciones de formación del clínquer (Taylor, 1990):

1. La primera etapa es el secado y precalentamiento se lleva a cabo entre los 200 y 900°C lo cuál libera vapor de agua (proceso húmedo).
2. Después se inicia la calcinación entre los 600 y 900°C con lo que comienza el desprendimiento de CO₂, aunque éste continuará en las etapas subsecuentes.
3. Las reacciones cercanas a 1300 °C son: (a) la descomposición de la calcita, (b) la descomposición de las arcillas y (c) la reacción de la cal formada con los productos de descomposición de la arcilla y el cuarzo dando belita ((CaO)₂SiO₂), aluminato ((CaO)₃Al₂O₃) y ferrita (Ca₂(Al_xFe_{1-x})₂O₅). El líquido se forma solo en menor extensión en esta etapa, sin embargo tiene un efecto primordial en las reacciones. Al final de esta etapa, la mayor fase presente consiste en belita, cal, aluminato y ferrita.
4. Las reacciones a 1300-1400 °C (clínquerización) consisten en: un fundido que se forma, principalmente de aluminato y ferrita, y para 1450 °C alrededor del 20-30% de la mezcla es líquida. Mucha de la belita y la cal recién formada en presencia del líquido, dá alita ((CaO)₃SiO₂). El material noduliza y forma el clínquer
5. Reacciones durante el enfriamiento. El líquido cristaliza, dando principalmente aluminato y ferrita.

El clínquer formado son nódulos del producto deseado que salen al rojo vivo del horno, y pasan a una zona de enfriamiento donde se sopla aire, retirando el calor del clínquer, en muchos casos éste aire caliente se recircula a la etapa previa al horneado, de esta manera se recupera parte de la energía y se ahorra combustible en el horno, ya que parte del material entra con cierta temperatura. La emisión de polvos en los hornos de cemento puede ser un problema ambiental serio, en lugares poblados deben colocarse ciclones arrastradores de polvos con sistema de filtros o un precipitador electrostático entre la salida del horno y el tubo de la chimenea. Las plantas modernas de cemento se equipan con la instrumentación sofisticada para el control de la combustión; las materias primas en algunas plantas se prueban automáticamente, y una computadora calcula y controla la composición de mezcla cruda. Los hornos rotatorios más grandes tienen salidas que exceden 5000 toneladas por día. Finalmente se realiza la molienda final en donde se adiciona la cantidad requerida de yeso, se introduce en unos molinos giratorios con bolas de acero que trituran el clínquer con el yeso hasta obtener un polvo fino, entonces se bombea neumáticamente hasta los silos de almacenaje, para que finalmente sea distribuido, en la figura 7.2-1 está descriptivamente el proceso de manufactura del cemento (<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0,5716,114520+1+108319,00.html>]; Taylor, 1990). A continuación se presenta la composición típica tanto química como mineralógica del clínquer del cemento portland:

Tabla 6.1.2-3 Composición química y mineralógica del clínquer del cemento portland

Componente	% en peso
SiO ₂	19.71 - 24.25
Al ₂ O ₃	3.76 - 6.78
TiO ₂	0.21 - 0.52
P ₂ O ₅	0.02 - 0.27
Fe ₂ O ₃	1.29 - 4.64
Mn ₂ O ₃	0.03 - 0.68
CaO	63.76 - 70.14
MgO	0.00 - 4.51
SO ₃	0.20 - 2.07
K ₂ O	0.31 - 1.76
Na ₂ O	0.03 - 0.33
Na ₂ O-equivalent	0.31 - 1.34
CO ₂	0.03 - 0.83
H ₂ O	0.04 - 1.11
Módulos*	
Saturación de cal (LS)	90.5 - 104.1
Razón de silicio (SR)	1.6 - 4.1
Razón de aluminio (AR)	1.4 - 3.7
Grado de sulfatación (GS)	34.8 - 188.5
Fase mineralógica en el clínquer (%)	
C ₃ S	51.5 - 85.2
C ₂ S	0.2 - 27.1
C ₃ A	6.8 - 15.6
C ₄ AF	4.0 - 16.2
CaO libre	0.08 - 5.58

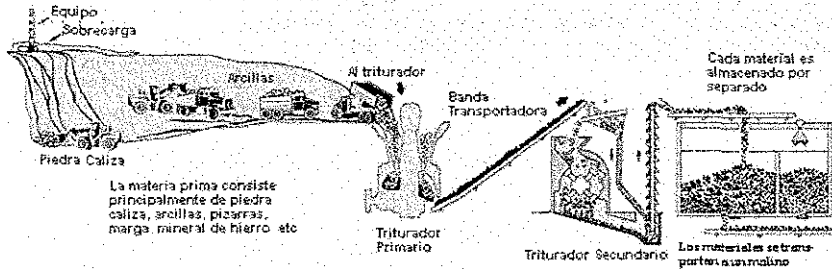
* Más adelante se explicará el origen de estos módulos

Fuente: CEMBURAU, "Best Available Techniques" for the Cement Industry, Bélgica, 1999, p. 21

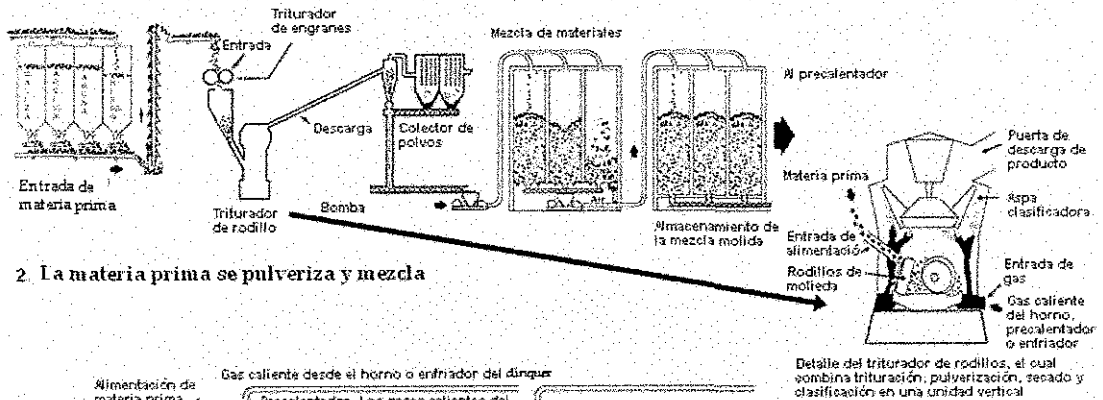
Este resumen pretendió únicamente dar a conocer los procesos básicos para comprender la utilización de la escoria como una alternativa de la materia prima en la manufactura del cemento, queda fuera del alcance de esta investigación un análisis detallado de todas las variables que están involucradas en los procesos de producción de cemento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

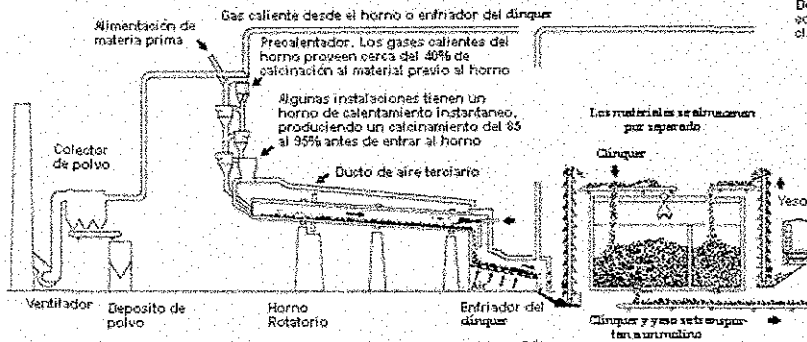
Figura 6.1.2-4 Proceso de manufactura del cemento portland (Fuente: <http://www.portcement.org/>)



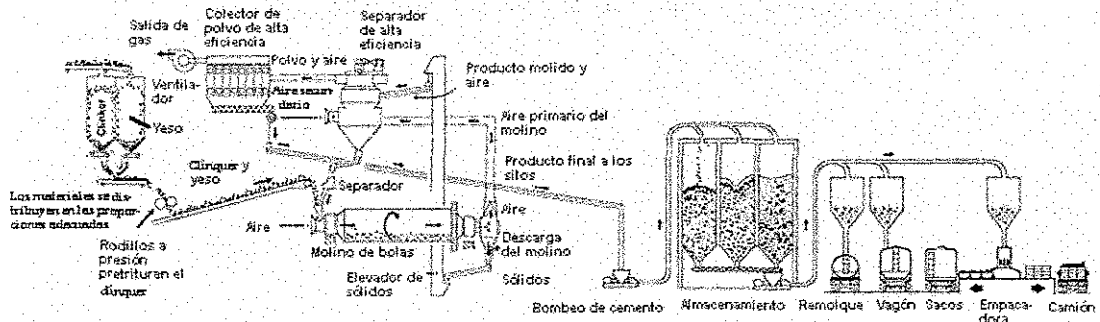
1 La piedra a primer o se reduce a un tamaño de 125 mm y luego a 20 mm, y se almacena



2 La materia prima se pulveriza y mezcla



3. El calentamiento transforma la mezcla química en cemento clínquer



4 El clínquer se mezcla con yeso para obtener el cemento portland y se distribuye

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

6.1.3 La escoria como materia prima del cemento

6.1.3.1 Antecedentes.

Ya desde 1774 se utilizaba la escoria como material de construcción, pero no fue hasta 1853 cuando se obtuvo la escoria granulada. En 1862 Emil Langens descubrió que el proceso de granulación de la escoria con agua producía un material que al ser mezclado con cal daba un producto con buenas propiedades cementantes. Las propiedades de la escoria fueron posteriormente investigadas por Michālis, Prüssing, Tetmajer, Prost, Feret y Grün entre otros. Passow, quien introdujo el proceso de granulación con aire, aportó parte del desarrollo y utilización de la escoria de alto horno. El primer cemento de escoria-cal se comercializó primeramente en Alemania en 1865 y para 1883 la escoria se comenzó a utilizar como una de las materias primas en la manufactura de cemento portland (NSA, 2000; Swamy, 1986).

Pero no fue sino hasta 1892 que se comenzó a realizar una producción regular de cemento en base a la mezcla y molienda de escoria granulada de alto horno y cemento portland en Alemania, para 1901 la manufactura tuvo suficiente desarrollo para el cemento "eisenportland" (nombre que se le da al cemento de escoria y cemento portland) que se fundó la Asociación de Cemento Eisenportland; pocos años después en 1907 surge un segundo cemento hecho a base de escoria granulada de alto horno llamado "hochofen" con lo que la producción de cemento de escoria se incrementó, para 1930 la producción de eisenportland y hochofen alcanzaron las 550,000 y 460,000 toneladas de producción respectivamente, y siguió aumentando hasta alcanzar en 1961 4.2 y 3.2 millones de toneladas respectivamente. Pero en Europa en general no fue sino hasta la Segunda Guerra Mundial cuando su uso se extendió como una medida para ahorrar energía en tiempos de guerra (Lea, 1971).

Otro sistema de producción de cemento de escoria, es el moler el clínquer de cemento portland y escoria granulada por separado, los cuáles pueden ser mezclados en el mismo sitio donde se va utilizar, dicho sistema fue desarrollado por primera vez en 1933 y patentado como el proceso Trief. En la actualidad el cemento con escoria representa el 7% de la producción en Europa; en Alemania, Bélgica, Francia y Países Bajos cuentan con aproximadamente 25, 30, 40, 60 % respectivamente de la producción interna de cemento. En Estados Unidos es considerablemente menor, con alrededor del 1% del cemento producido; en la tabla 6.3.1-1 se muestra la tasa de utilización de la escoria en cemento con respecto a la escoria generada en el alto horno en 1983. (Swamy, 1986; Tüfekci et. al., 1997; CEMBUREAU, 1997).

Tabla 6.1.3.1-1 Utilización de la escoria de Alto Horno en cemento y concreto en 1983

País	Tasa de utilización (%)
Australia	3.61
Canadá	6.89
China	76.92
Francia	52.23
Alemania	25.45
Japón	41.67
Sudáfrica	64.70
Reino Unido	2.85
Estados Unidos	3.84

Fuente: Swamy, R.N. "Cement Replacement Materials", Surrey University Press, 1986, pp. 77

6.1.3.2 Obtención de la escoria granulada.

Como se explicó en el capítulo tres, de acuerdo al tipo de enfriamiento que se le da a la escoria al salir del alto horno se obtendrán diferentes sólidos con estructura y propiedades diferentes, la escoria que tiene las características adecuadas para utilizarse como material cementante son: la escoria granulada y la peletizada; a continuación se retoma parte del proceso de enfriamiento que da como resultado este tipo de escoria. La escoria que se utiliza en la manufactura del cemento es aquella que se enfría rápidamente a través de la adición de agua, esto con la finalidad de evitar la cristalización de la escoria y permitir únicamente la solidificación en estado vítreo. Si se permite un enfriamiento lento la escoria se cristaliza, lo que produce un sólido estable formado especialmente de melita, que es una solución sólida de gehlenita ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) y akermanita ($3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) que no tiene prácticamente propiedades cementantes. Sin embargo si se enfría rápido se obtiene un material vítreo, el enfriamiento debe ser suficientemente rápido por debajo de 800°C , lo cuál genera un sólido con elevada energía de cristalización (alrededor de 200 kJ/kg), a este tipo de escoria se le denomina escoria granulada (Lea, 1971; Taylor, 1990).

El método convencional para llevar a cabo este enfriamiento consiste en utilizar un exceso de agua ya sea por inmersión o por chorro, sin embargo este proceso consume mucha agua, alrededor de 100 m^3 por tonelada de escoria. Otro método consiste en utilizar agua a presión por medio de aspersores que esparcen el agua a una presión de 0.6 MPa con

lo cuál el consumo de agua se reduce a 3 m³ por tonelada; posterior al tratamiento, el agua contenida en la escoria ($\leq 30\%$) se elimina en secadores o con filtros (Swamy, 1986).

En un proceso semiseco más novedoso (proceso de peletización mencionado en el capítulo 3) la escoria se enfría con agua y se arroja al aire por medio de un tambor rotatorio (300 r.p.m.), lo que da como resultado gránulos denominados pelets de varios tamaños que van desde unos pocos milímetros hasta de 15 mm, con este proceso el consumo de agua se reduce aun más, a únicamente 1 m³ por tonelada de escoria y la humedad residual es de alrededor de 10%. La peletización tiene ventajas al manufacturar acero ya que requiere un bajo capital de inversión, como mencionó anteriormente consume poca agua en comparación con lo otros procesos de enfriamiento, disminuye las emisiones de gases sulfurosos, y la formación de un producto prácticamente seco con lo que se ahorra energía en el secado del mismo. Sin embargo tiene la desventaja de que la proporción de vitrificación decrece al incrementarse el tamaño del pelet, lo que puede dar como resultado una fracción de vitrificación tan bajo como 50%, en comparación con el proceso de granulación donde la fracción de vitrificación es de alrededor del 95%, aunque es importante señalar que la escoria peletizada puede ser utilizada también como agregado ligero cuando su vitrificación es pobre para ser utilizada en la manufactura de cemento (Taylor, 1990; Swamy, 1986; <http://www.ecotrade.net>).

Después del enfriamiento, las escorias calientes suelen tener un color claro, mientras que las frías tendrán un color marrón oscuro; si se observan las partículas de la escoria fría con un microscopio polarizado, se pueden observar los cristales de melita en la fase vidriosa, lo que indica que estas partículas de escoria han sido enfriadas cuando su temperatura se encontraba entre las temperaturas de líquido y sólido para esta composición. Cuando se enfría una partícula de escoria que tiene una temperatura muy por encima de la temperatura de líquido, se solidifica como un material amorfo (<http://www.ecotrade.net>).

6.1.3.3 Vitrificación de la escoria.

La escoria vítrea, como se ha mencionado, es la que tiene el potencial hidráulico para ser utilizada como ingrediente de materiales cementantes. Un material vítreo o mejor conocido como vidrio, se considera como un líquido superenfriado (supercooled liquids), ésta es una característica de los silicatos fundidos que en un rápido enfriamiento tienden a vitrificar. El paso del estado líquido al sólido cristalino está acompañado de un proceso de reordenamiento de los iones, los cuáles toman una definida orientación en los cristales, y la viscosidad de los silicatos fundidos cercar de su punto de fusión es tan grande que este rearrreglo toma lugar lentamente. Si el enfriamiento es rápido los principales grupos ionicos

permanecen en un arreglo irregular y la viscosidad se incrementa rápidamente conforme la temperatura desciende y la escoria pasa desde el estado líquido a uno en que la rigidez es parecido a un sólido pero sin el desarrollo de una estructura cristalina, es decir, los materiales vítreos son líquidos que tienen una elevada viscosidad y no tienen un definido punto de fusión, pasan gradualmente a un estado líquido bajo calentamiento, a temperatura ambiente estos materiales pueden permanecer indefinidamente en estado vítreo, pero si se recocen y se dejan enfriar lentamente puede ocurrir la desvitrificación (Lea, 1971).

Existen varias teorías sobre la estructura vítrea de la escoria que han sido discutidas en términos de la teoría clásica de "*formación de redes*" y "*elementos de redes-modificadas*". La estructura cristalina del silicio como cuarzo se conforma como un armazón tridimensional de SiO_4 tetraédrico, con un patrón de repeticiones de este tetraedro a intervalos regulares en todas direcciones, es decir, hay un orden bien definido con todas las cargas balanceadas. En una forma de silicio vítreo la estructura o patrón de la red se modifica por la ruptura de algunos enlaces de Si-O-Si y la incorporación de cationes metálicos, los cuáles dan como resultado una estructura modificada. Ya en un silicato vítreo la red estructural ha sido rota y la conectividad* varía en rango de 1 a 4 dentro de su estructura interna, es así como el término vítreo significa cadenas ramificadas y arreglos aislados (Swamy, 1986)

En las escorias vítreas algunas de las posiciones de silicio son ocupadas por átomos de otros elementos, especialmente Al, es así que los cationes de silicio y aluminio se ligan con átomos de oxígeno en forma tetraédrica; cada remplazo de Si^{4+} por Al^{3+} es equivalente a uno de SiO_2 por AlO_2^- con lo cuál se introduce una carga negativa que es balanceada por la introducción de otros cationes. Iones de calcio y magnesio ocupan vacíos relativamente grandes en la estructura de red; los iones de aluminio pueden actuar como un precursor o modificador de red, pero éstos sólo pueden remplazar iones de silicio en una limitada extensión. Estos espacios incrementan la distancia inter-ionica entre el catión y los iones de oxígeno, con lo que se incrementa el volumen específico del material vítreo y produce una red más abierta que puede acomodar más iones de calcio en los huecos de la estructura, al incrementarse el contenido de Ca o iones similares se asocia con el incremento de la despolimerización o fragmentación de la estructura tetraédrica. A diferencia de la fase cristalina, en el material vítreo hay un orden en las distancias cercanas, pero no en las distancias lejanas, así los iones tales como Na^+ , Mg^{2+} y los mencionados Ca^{2+} quedan distribuidos de una manera desordenada e irregular en la red inter-espacial. En resumen, el modelo de la estructura vítrea se basa en un continuo, aunque incompleta conexión de redes

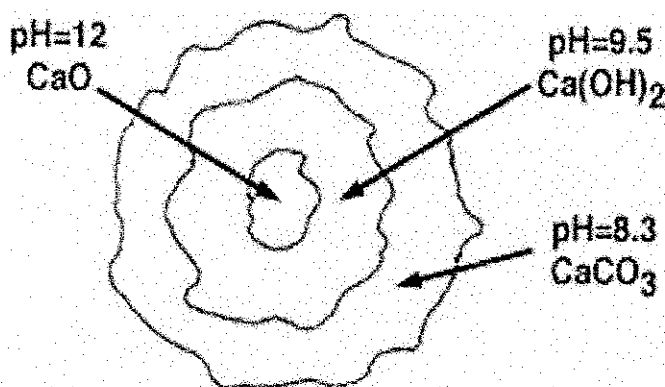
* La conectividad (Q) es un término cristalografico que significa, por ejemplo que para $Q=1$ de un tetraedro de SiO_4 se encuentra aislado y para $Q=2$ es doble tetraedro SiO_7

aniónicas compuestas de oxígeno, silicio, aluminio y otros elementos relativamente electronegativos y su carga es balanceada por el calcio y otros elementos electropositivos y el desorden que hay en su estructura se debe precisamente a cantidades menores de estos elementos en la solución sólida (Na, K, S, P, Ti, F), a la microheterogeneidad de partículas de 300-1000 Å y la presencia de submicroscópicos cristales de melita y merwinita. Y es este desorden la gran ventaja que le da a la escoria ser un material con potencial hidráulico que se aprovecha en el cemento (Taylor, 1990; Fu *et al.*, 2000).

6.1.3.4 Composición.

La composición química de la escoria vítrea es importante en la evolución de las propiedades hidráulicas, la composición más favorable del material vítreo es de 50% CaO, 31% SiO₂ y 19% Al₂O₃, debido a que el MgO se apaga muy lentamente cuando se mezcla con agua y causa ruptura después de endurecerse el concreto, no deberá exceder en la composición de la escoria más del 5%, igualmente la presencia de más de 1% de óxidos alcalinos como el K₂O y Na₂O pueden causar fallas en el concreto. El CaO libre actúa como el MgO y causa ruptura del concreto conforme se endurece, es por eso que la escoria de los convertidores de aceración tienen en ocasiones limitantes para ser utilizados en la manufactura del cemento, ya que al ser parte el CaO del fundente en ocasiones no toda la cantidad que se añade reacciona por lo que cierta cantidad queda como tal, y perjudica al mortero o concreto aunque éste parcialmente vitrificada. También es necesario limitar la cantidad de sulfatos-sulfuros en la escoria a un máximo de 2%. A continuación se presenta un esquema de una partícula de escoria (<http://slagarden.cfa.cmu.edu/research/content/remediation.html>):

6.1.3.4-1 Esquema de una partícula de escoria



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALÉ
DE LA BIBLIOTECA

Se han hecho intentos para tasar el contenido de óxidos presentes en la escoria en base a un modulo que incluya la composición de la escoria, el más comúnmente usado en la predicción de la reactividad hidráulica o resistencia a la compresión es

$$\frac{(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2}$$

en Alemania este valor debe ser ≥ 1.0 y en Japón ≥ 1.4 entre otros. Existen otros factores más específicos que se utilizan para la manufactura de cemento (Monshi y Asgarani, 1999):

Factor de saturación de CaO (LSF por sus siglas en ingles)

$$\text{LSF} = 100(\text{CaO} + 1.5)/(2.85\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Razón de silicio (SR)

$$\text{SR} = \text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

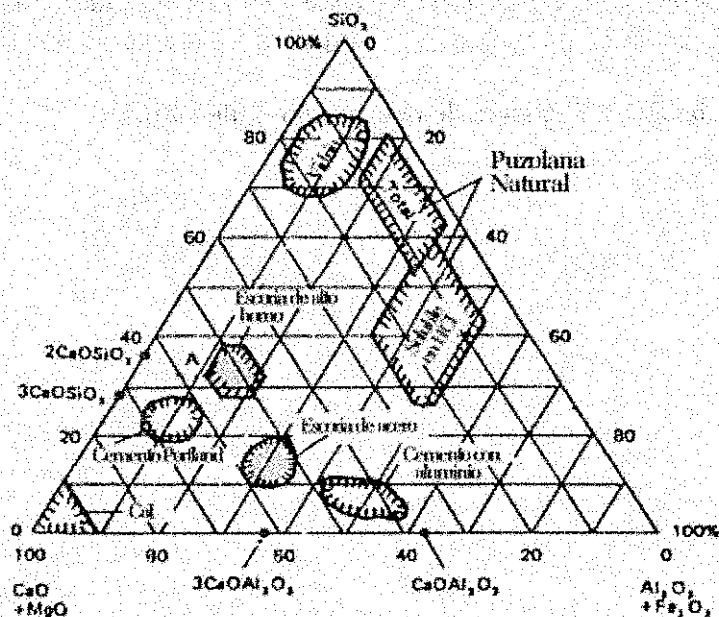
Razón de aluminio (AR)

$$\text{AR} = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$$

Altos valores de CaO y Al_2O_3 son ventajosos en la actividad de la escoria, mientras que la viscosidad se incrementa con el contenido de SiO_2 . En términos generales la actividad hidráulica de la escoria granulada depende de las cantidades y las propiedades del material amorfo, así como de la composición química, se ha comprobado que ha mayor proporción de material vítreo mayor es la actividad con la misma composición química (Fu *et. al.*, 2000). La composición de los diferentes tipos de escorias son en general muy similares a la composición del cemento portland y es por eso que se puede utilizar como un ingrediente para su fabricación, esto se puede observar en la figura 6.3.4-2.

Figura 6.1.3.4-2 Composición de diferentes materiales de construcción

(Fuente: Monshi y Asgarani, 1999)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.1.3.5 Activación de la escoria.

La escoria granulada tiene propiedades potenciales cementantes, pero si un activador presenta estas propiedades no se desarrollan como en el cemento portland. Como las escorias granuladas reaccionan más lentamente con agua que el cemento portland deben de ser activadas para lo que existen diferentes formas: químicamente con cal o activadores de sulfatos, físicamente por molienda, o térmicamente con aplicación de calor. La función del activador ha sido concebida por Locher como un proveedor de composición química en la solución tal que los iones disueltos de la escoria puedan rápidamente iniciar la fase de hidratación, el activador puede abrir la estructura del material vítreo y con ello acelerar la velocidad de hidratación. Dos activadores en la hidratación de la escoria están presentes en el cemento portland de escoria de alto horno, el yeso (que es un activador de sulfato) y la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberada por la hidratación de los silicatos presentes en el clínquer ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) que son activadores de cal. Si la escoria granulada o peletizada se coloca en agua, únicamente se disuelve en una pequeña proporción, pero una película protectora de Ca^{2+} rápidamente se forma e inhibe la reacción, ésta continuará si el pH se mantiene lo suficientemente alto. La solución que se forma durante la hidratación del cemento portland, esencialmente hidróxidos alcalinos (principalmente portlandita), son el medio necesario para mantener el pH alto, la escoria también se puede activar por otros compuestos como lo son el hidróxido de sodio, silicato de sodio o carbonato de sodio. El sulfato de calcio (yeso) acelera también la reacción, probablemente porque la precipitación de ettringita produce un debilitamiento para los iones de Ca^{2+} y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ emitidos desde la escoria, aunque el sulfato de calcio no es muy efectivo a menos que un poco de solución alcalina esté también presente y por eso a veces se describe a éste más que como activador como un poderoso reactante. La reacción entre la escoria y CaSO_4 se utiliza con mucho mayor extensión en los cementos supersulfatados (Taylor, 1990; Fu *et al.*, 2000).

6.1.3.6 Hidratación de la escoria.

La hidratación de la escoria se inicia cuando ésta reacciona con agua para producir silicato de calcio hidratado, aluminato de calcio hidratado, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ hidratado y $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La hidratación de la escoria conduce a su disolución parcial en la mezcla con agua y a la precipitación de $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y a los aluminatos y silicioaluminatos. Al proseguir la reacción habrá una acumulación de alúmina en la solución hasta que da comienzo la cristalización de los aluminatos hidratados y la solidificación de la mezcla. El comportamiento hidráulico de la escoria depende de la cantidad en la cuál los iones de aluminio estén presentes como precursores de red, lo que da una red aluminio-silicatos (Lea, 1971).

La naturaleza de los productos de hidratación estará determinada por la concentración de los activadores, la influencia de SO_3 (proporcionado por el activador de sulfato) en la escoria de cemento es no sólo reaccionar con el $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ del clínquer, sino también reaccionar con AlO_4^{5-} desde la disolución vítrea para formar trisulfoaluminato de calcio que impulsa la hidratación de la escoria lo que ocurre en la presencia de suficiente solución de SO_4^{2-} , por lo tanto es importante que para completar la despolimerización del material vítreo y la subsecuente hidratación se mantenga suficiente SO_4^{2-} en la solución. En general los productos de hidratación se forman desde la despolimerización de la escoria vítrea y su separación, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ producido por la hidratación del clínquer del cemento portland que actúa como activador alcalino y SO_3 ayudan a que la fragmentación de la red vítrea se lleve a cabo hasta el final y la hidratación ocurra completamente y se desarrolle la densidad estructural de la roca de cemento (Swamy, 1986; Fu *et. al.*, 2000).

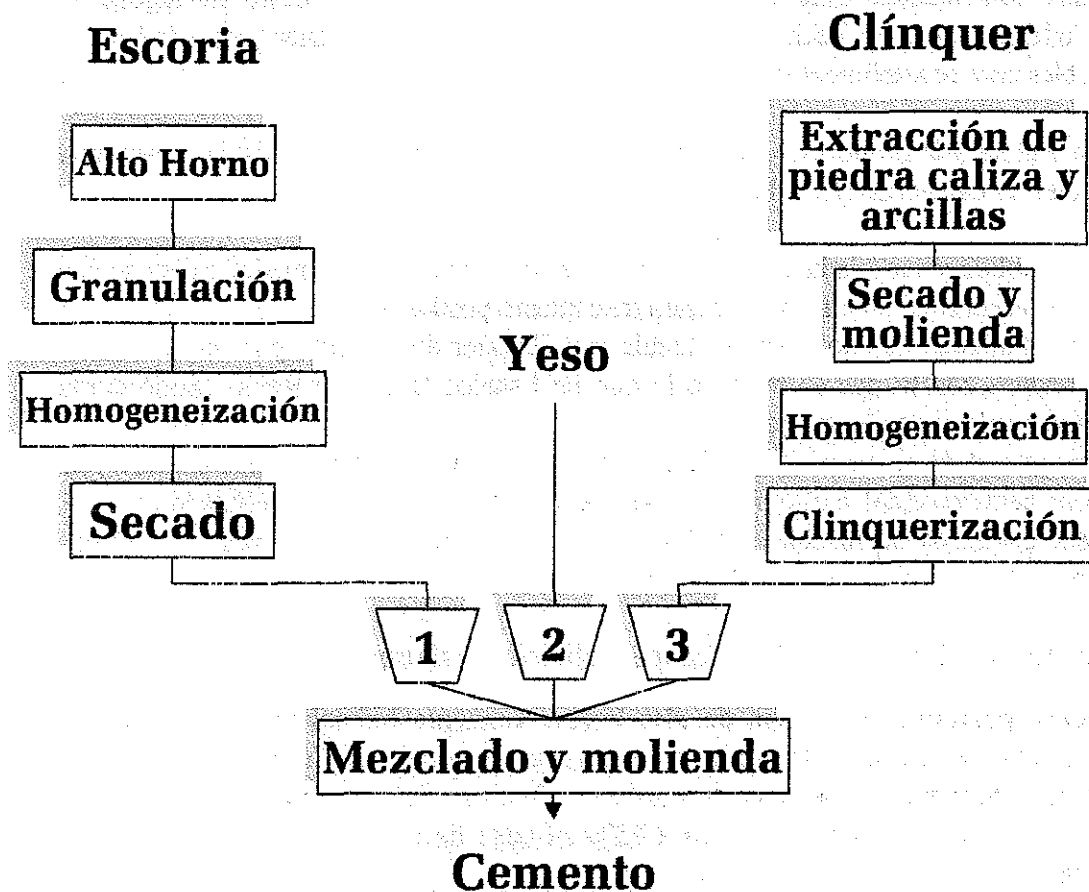
6.1.3.7 Manufactura

La manufactura del cemento a base de escoria vitrificada es similar a la del cemento portland, por lo que no se entrará en detalle al respecto ya que esto se explica al inicio del capítulo. Existen tres formas de utilizar la escoria para producir el material cementante o cemento; en el primero la escoria vítrea se utiliza como materia prima sustituyendo a los materiales arcillosos; la escoria y la piedra caliza se muelen y mezclan en las proporciones adecuadas y posteriormente se introducen a un horno rotatorio en la forma usual, el clínquer resultante frecuentemente tiene un color café debido a los óxidos de manganeso presentes en la escoria, pero éste no difiere algún otro aspecto con el clínquer obtenido con los materiales arcillosos, excepto en algunas propiedades mencionadas posteriormente. La escoria granulada normalmente contiene de 10 a 40% de agua y se remueve en un secador y es entonces cuando se utiliza como materia prima para la elaboración de cemento, las operaciones de secado y posterior molienda son relativamente caras, más aun si el proceso de elaboración del cemento es en seco, mientras que el proceso húmedo evita la necesidad del secado de la escoria (Lea, 1971).

Otro método de elaboración del cemento con escoria es el mezclado al final del proceso, es decir, el clínquer de cemento portland se hace de la forma usual, el clínquer se muele cuando se enfría y almacena en los silos, por otro lado se lleva a cabo el proceso de enfriamiento de la escoria se muele y seca posteriormente para ser almacenado en otro silo, en un tercer silo se encuentra el yeso. Cada uno de éstos se mezcla en las proporciones adecuadas y/o requeridas y se muele finamente para obtener el cemento de escoria (la finza de la molienda es importante para que se obtenga el mejor potencial hidráulico del

cemento, la fineza es típicamente menor a $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$, el proceso se esquematiza en el diagrama de bloques 6.3.7-1. También está el proceso de mezclado en el lugar donde se produce y utiliza el concreto, éste es el proceso Trief anteriormente mencionado. Estas son las formas más utilizadas para aprovechar la escoria granulada como material cementante (Swamy, 1986; <http://thfrc.gov/hnr20/recycle/waste/>).

Figura 6.1.3.7-1 Uno de los procesos de manufactura de cemento con escoria



Fuente: Adaptado de SWAMY, R.N. "Cement Replacement Materials", Surrey University Press, 1986, p 83

6.1.3.8 El cemento con escoria.

Cuando el cemento portland y uno más materiales inorgánicos que toman parte en las reacciones de hidratación y por lo tanto hacen una contribución sustancial a la hidratación del producto se le denomina cemento hidráulico compuesto; a los materiales

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

inorgánicos se les llama minerales adicionales, los más importantes son las cenizas de combustible pulverizado (ceniza voladora, pfa por sus siglas en ingles), escoria granulada de alto horno, puzolana natural y microsilica. Los cementos compuestos se producen por varias razones, de los cuáles destacan dos desde el punto de vista ambiental, primero la necesidad por utilizar materiales residuales y segundo disminuir el consumo de energía, pfa y la escoria son materiales residuales producidos en grandes cantidades, dichos residuos al combinarse con puzolanas naturales o con cemento portland se produce un material con propiedades cementantes similares a las del cemento portland a bajo costo por unidad de volumen, además concretos hechos con estos cementos compuestos tienen propiedades que son deseables para requerimientos específicos (Taylor, 1990).

En cuanto a la producción de materiales cementantes a base de escoria se agrupan en las siguientes categorías (Lea, 1971):

- ▶ Escoria molida y mezclada en las proporciones especificadas con piedra caliza se usa como materia prima para la manufactura de cemento portland.
- ▶ Escoria granulada de alto horno se muele con clínquer de cemento portland en varias proporciones con lo que se produce lo que en Estados Unidos y Reino Unido como cemento portland de alto horno.
- ▶ Escoria granulada se mezcla y muele con una pequeña proporción de yeso anhidro y se adiciona cemento o cal, a este producto se le denomina cemento supersulfatado.
- ▶ Escoria granulada se mezcla y muele con cal hidratada, a esta mezcla en Estados Unidos se le denomina cemento de escoria.

La ASTM C219-91 tiene las siguientes definiciones al respecto:

- ▶ **Cemento portland de escoria de alto horno.** Cemento hidráulico que consiste de mezclar clínquer de cemento portland y escoria granulada de alto horno o una intima y uniforme intermezclado de cemento portland y fina escoria granulada de alto horno en que la cantidad de escoria va de 25 a 65% en peso de la mezcla cemento portland-escoria.
- ▶ **Cemento de escoria.** Cemento hidráulico que consiste de un mezclado uniforme de escoria granulada de alto horno y cal hidratada o cemento portland en el que la escoria constituye al menos el 70% del peso de la mezcla.

En la siguiente tabla se muestran los estándares relativos a la utilización de la escoria en la fabricación de cemento de algunos países donde el desarrollo en la elaboración de éste tipo de productos ha sido mayor:

Tabla 6.1.3.8-1 Especificaciones del cemento con escoria en el Mundo

País	Especificación	Notas
Reino Unido	BS 146	Cemento portland de alto horno (contenido de escoria \leq 65%)
	BS 4246	Cemento portland de alto horno de bajo calor (50-60%)
Alemania	DIN 1164	Eisenportland (\leq 40%)
		Hochofen (41-65%) Sulfathütten (50-85%)
Francia	NFP15-301	Ciment de fer (25-35%)
		Ciment metallurgique mixte (45-55%)
		Ciment de haut fourneau (65-75%)
		Ciment de laitier au clínquer ($>$ 80%)
Holanda	NEN	
E.U.A.	ASTM C595	Cemento portland de alto horno (25-65%) Cemento de escoria ($>$ 70%) Cemento supersulfatado (80-85%)
	ASTM C989	
	AASHTO M240	
	COE CRD-C 203	
	ACI 233R	
Sudáfrica	SABS 626	Cemento portland de alto horno
Australia	AS 1317	Cementos tanto de escoria como de cenizas
Canadá	CSA-A362-M1977	Cemento portland de alto horno
	CSA-A363-M1983	Escoria hidráulica cementante
México	NMX-C-414- ONNCCE-1999	Cemento hidráulico*

* A continuación se explica con más detalle esta norma

Fuente: Adaptado de Lea, 1971; Swamy, 1986; Taylor, 1990;
<http://www.epa.gov/cpg/products/cemspecs.htm>; <http://www.onncce.org.mx/catalogos.html>

En cuanto a la normatividad mexicana existía una norma específica para el cemento de escoria denominada NMX-C-184-1970 que entró en vigor el 7 de septiembre de 1970, pero fue sustituida con la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999 que tiene el nombre de *industria de la construcción - cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba*, que establece los rangos de los componentes que forman los diversos tipos de cementos, así mismo indica las exigencias mecánicas, físicas y químicas que deben satisfacer los cementos hidráulicos destinados a la industria de la construcción, con el propósito de orientar adecuadamente al usuario en función a la exposición y características de los productos en que se incorporan. Dicha norma está organizada de la siguiente forma:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

0.	PREFACIO
1	INTRODUCCIÓN
2	OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN
3	REFERENCIAS
4	DEFINICIONES
5	CLASIFICACIÓN
6	ESPECIFICACIONES
7	MUESTREO
8	MÉTODOS DE PRUEBA
9	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS
10	MARCADO, ETIQUETADO Y ENVASE
11	BIBLIOGRAFÍA
12	CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES
A.	APÉNDICE NORMATIVO
B.	APÉNDICE INFORMATIVO

En el apartado cuatro se hacen tres definiciones con respecto a los cementos con escoria:

- ▶ Cemento con escoria granulada de alto horno. Es el conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínquer portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.
- ▶ Cemento portland compuesto. Es el conglomerado hidráulico que resulta de la molienda conjunta del clínquer portland que usualmente contiene sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza éste puede ser componente único.
- ▶ Cemento portland con escoria granulada de alto horno. Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínquer portland, materiales puzolánicos y usualmente sulfato de calcio.

Así mismo se señalan las denominaciones con respecto a los diferentes cementos que a continuación se presentan (<http://www.cemexmexico.com/publica/normativas/cemento101.asp>):

CPO	Cemento portland ordinario
CPP	Cemento portland puzolánico
CPEG	<i>Cemento portland con escoria granulada de alto horno</i>
CPC	<i>Cemento portland compuesto</i>
CPS	Cemento portland con humo de sílice
CEG	<i>Cemento con escoria granulada de alto horno</i>

6.1.3.9 Propiedades.

El cemento que contiene escoria tiene propiedades similares a las del cemento portland cuando éstas se utilizan en la elaboración de concreto. La escoria reacciona considerablemente más lentamente en el proceso de hidratación que el cemento portland ordinario y entre más escoria hay el cemento, más lenta es la reacción. En los primeros la resistencia a la compresión desarrollada por los concretos que contienen cemento de escoria es menor que los del cemento portland, pero a los 28 días la resistencia es similar y 91 días es de alrededor del 12% mayor. Pero la característica más importante que le confiere al concreto hecho con cemento de escoria es su resistencia a ambientes agresivos, esto se debe principalmente a la impermeabilidad que presenta como resultado de la disminución de la porosidad capilar en alrededor de un 30% con respecto al cemento portland, se tiene una distribución diferente del tamaño de poro, por ejemplo los poros más pequeños tienen diámetros de 300 Å, se ha encontrado que cuando se añade 20% de escoria en proporción de la mezcla al cemento se reduce considerablemente la difusión del ion cloruro debido a la reducción de la porosidad. El volumen de poro decrece con el incremento de la edad, la principal razón de esto es que al incrementarse los productos químicos de la hidratación del cemento y las reacciones puzolánicas llenan los poros con lo que reducen tanto su volumen como su cantidad (Li et. al., 1997; Jau y Tsoy, 1998; Swamy, 1986). En la tabla siguiente se muestran algunas propiedades especiales que tiene el concreto hecho con cemento de escoria, así como los factores que afectan sus propiedades cementantes:

Tabla 6.1.3.9-1 Factores que afectan las propiedades cementantes de las escorias y las propiedades del concreto que contienen escoria

Factores que afectan a las propiedades cementantes de la escoria	Propiedades del concreto con escoria
<input type="checkbox"/> Composición química	<input type="checkbox"/> Reducida permeabilidad a los cloruros
<input type="checkbox"/> Concentración de álcalis del sistema reactante	<input type="checkbox"/> Mejor resistencia al ataque de sulfatos
<input type="checkbox"/> Contenido vítreo de la escoria	<input type="checkbox"/> Reducido calor de hidratación en grandes masas de concreto
<input type="checkbox"/> Finesa de la escoria granulada y el cemento portland	<input type="checkbox"/> Mejor resistencia a la compresión
<input type="checkbox"/> Contenido de CaO libre, MgO, K ₂ O y Na ₂ O.	<input type="checkbox"/> Resistencia al ataque de aguas carbonatadas
	<input type="checkbox"/> Disminución de la corrosión del acero en estructuras de concreto

Fuente: NSA, 2000; Jau y Tsay, 1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.13.10 Uso de los cementos hechos con escoria.

El cemento hecho con escoria tiene en la actualidad uso en muchos países para trabajos de construcción que incluyen concreto reforzado, estructuras para contención de agua y para productos prefabricados como tuberías de concreto. Los cementos con escoria tienen la misma capacidad que el cemento portland de proteger la estructura de acero en el concreto reforzado, así mismo debido a su bajo calor de hidratación y baja permeabilidad se recomienda su uso en la construcción de grandes obras, donde se requieren grandes masas de concreto tales como presas, reservorios, albercas, trabajos en agua, por ejemplo en estaciones hidroeléctricas, embalses de ríos, canales y torres de enfriamiento en plantas nucleoelectricas. Pero la utilidad principal que este tipo de cemento tiene y para lo que es ampliamente recomendado es para ambientes agresivos debido a su gran resistencia al ataque de compuestos químicos como anteriormente se mencionó, como son el agua de mar, agua carbonatada, suelos con contenido de sulfatos y aguas termales (Swamy, 1986).

Algunos ejemplos de estructuras que en el Mundo se construyeron con cementos con contenido de escoria se mencionan a continuación (NSA, 2000; Swamy, 1986):

- ▶ El Metro de París (Francia)
- ▶ Estación eléctrica Rance en Francia (produce electricidad a partir de la fuerza de las mareas)
- ▶ Plataforma de producción petrolera de Mar del Norte Chevron (Reino Unido)
- ▶ Estación nuclear Widscale, en el estanque de almacenamiento de residuos de plutonio (R.U.)
- ▶ Edificio Kay Tower en Cleveland (E.U.A.)
- ▶ Edificio del estacionamiento en el Baltimore-Washington International Airport (E.U.A.)
- ▶ Puente de Koln sobre el río Rhin (Alemania)

Un ejemplo reciente es el edificio Scotia Plaza en Toronto, Canadá cuyo costo fue de 450 millones de dólares, está constituido de 69 pisos y en su construcción se ocuparon 74 mil m³ de concreto, se utilizaron 14 clases de concreto incluido el que contiene cemento con escoria, el porcentaje de éste ultimo fue de 20-30% del total de materiales cementantes que se ocuparon, en general se utilizaron 40000 toneladas de escoria de alto horno, tanto en el concreto como en unidades de construcción (ladrillos) hechos a base de escoria ligera (<http://www.slag.com/>).

6.13.11 Ambito ambiental.

Aunque el uso de la escoria en la industria del cemento ya tiene como tal cerca de un siglo, en la actualidad ha tenido mayor relevancia, conforme las industrias han

optimizado sus procesos y están en una búsqueda continua de encontrar alternativas que les ahorren costos de producción lo que incluye el ahorro de energía, por tal razón la industria del cemento ha sido capaz de utilizar residuos como alternativa en combustibles y materias primas con el fin no sólo de reforzar su competitividad sino al mismo tiempo contribuir a solucionar algunos problemas sociales de residuos, al ver éstos no como un material carente de utilidad sino valorizándolos, lo que les trae beneficios económicos y al mismo tiempo un beneficio ambiental.

A continuación se presentan algunos datos que muestran el ahorro de consumo de energía y que deriva en primer lugar en un menor uso de combustibles fósiles y por lo tanto una reducción en las emisiones de CO₂ y en segundo lugar el aprovechamiento de un residuo que por sus volúmenes hace de su disposición un problema, he aquí algunos puntos importantes al respecto (adaptado de Lea, 1971; Swamy, 1986; CEMBUREAU, 1997; Van Oss, 1998; Van Green, 2000):

- Una tonelada de cemento portland requiere de 1.5 a 1.6 toneladas de materia prima (seca), con la utilización de escoria, un cemento con 65% de ésta última la cantidad de materia prima se reduce a sólo 0.5 toneladas.
- Al utilizar la escoria en la mezcla de materia prima en la producción de clínquer se evita parte de la energía que implica pasar el carbonato de calcio (piedra caliza) a óxido de calcio desprendiendo CO₂, lo que en el proceso representa un gasto de alrededor de 7% de carbón estándar (definido como 12,600 Btu/lb ó 7000 cal/gr) en peso de clínquer producido. Se estima que para producir una tonelada de cemento se requiere 120 kg de carbón y se consumen de 90 a 120 kW-hr en energía eléctrica.
- La energía asociada a la producción de una tonelada de cemento portland tipo I es de 4710MJ, la granulación y molienda de la escoria requiere de 273MJ, por lo tanto, la energía asociada con una tonelada métrica de varias mezclas de cemento y escoria es como sigue:
 1. 0% escoria 4710 MJ/ton
 2. 5% escoria 4490 MJ/ton
 3. 10% escoria 4260 MJ/ton

Los datos anteriores provienen del National Institute of Standards and Technology (NIST) a través de su programa BEES 2.0 y se asumen los siguientes hechos:

- a. No se tomó en cuenta la energía asociada con el transporte de la escoria a la planta de cemento, lo que significa que la distancia a la planta de cemento es pequeña como para despreciarla o que la escoria se transporta en grandes cantidades por ferrocarril o barco.
- b. La escoria no se seca antes de molerse con el clínquer y yeso.

- c. La energía asociada con la molienda de la escoria es la misma que para la escoria cuando se muele sola, que cuando se hace con el clínquer y yeso.
- En términos generales se puede llegar a ahorrar hasta el 70% en consumo de energía comparado con la que se requiere al producir cemento portland, lo que disminuye las emisiones de CO₂ por la disminución de consumo de combustible.
- Se disminuyen las emisiones de CO₂ no sólo por un menor consumo de combustible, sino también por la disminución de CO₂ desprendido en la reacción de pasar CaCO₃ a CaO, si se toma en cuenta que alrededor de 65% de CaO componen el clínquer y se asume que todo éste proviene del CaCO₃ entonces se estima que aproximadamente se generan 0.51 toneladas de CO₂ por cada tonelada de clínquer producido, a esto hay que añadir que por cada tonelada de éste último se emiten de 0.48 a 0.5 toneladas de CO₂ provenientes de la quema de combustibles en el horno, lo que da como resultado que por cada tonelada de clínquer se produce otro tanto de CO₂, en términos generales si se traslada al producto final, es decir, el cemento portland, la tasa de producción de CO₂ es de 0.95 a 0.97 toneladas por cada tonelada de cemento portland, y si se utiliza algún sustituto del carbonato de calcio (piedra caliza) como lo es la escoria se pueden disminuir las emisiones de CO₂ de un 25 a 50% aproximadamente.

6.1.3.12 Caso de estudio.

En el capítulo cinco se mencionó sobre el manejo eficiente de las materias primas, en términos generales sobre la minimización de residuos y se describió a grandes rasgos la sinergia del subproducto. Un caso que tiene que ver con esta práctica y que está relacionada a las escorias es el que a continuación se presenta.

Chaparral Steel Company se localiza en Midlothian, Texas, Estados Unidos; es una industria siderúrgica que produce barras y estructuras de acero, propiedad en 84% de Texas Industries Inc. (TXI) una compañía productora de cemento. Chaparral Steel surgió en 1976, en ese año produjo 228 mil toneladas de acero y para 1995 su producción se incrementó a 1.6 millones de toneladas, sus productos se venden a la industria de la construcción, de automóviles, de la defensa y al sector energético; su fuente primaria de materia prima en la manufactura de acero proviene de automóviles viejos, en 1996 transformó alrededor de 700 mil toneladas de carros viejos y otras chatarras en material listo para ser usado como materia prima en la manufactura de acero, para su procesamiento utiliza dos sistemas avanzados computarizados de hornos de arco eléctrico (EAF), en todo el proceso se generan tres principales residuos y subproductos férricos: escoria de EAF, escamas metálicas y polvos del sistema para control de la contaminación del aire (USGS, 1996; BCSD-GM, 1997).

En 1993 con el fin de dar una solución al creciente problema de sus residuos crean el proyecto "*Sistemas y Tecnología para el Reciclado Avanzado*" (STAR por sus siglas en inglés) que se dedica a reducir los residuos del proceso, conservar los recursos naturales y prevenir la contaminación a través del reciclado de materiales residuales generados por la manufactura del acero y el cemento, con una perspectiva tanto económica como ambiental, es decir, la misión del proyecto STAR es desarrollar las sinergias entre los procesos de manufactura del cemento y el acero, y los servicios de la chatarra de automóviles, todos localizados en Midlothian, la meta final es alcanzar lo más que se pueda el tener cero residuos (o 100% productos) a través de un entendimiento de los requerimientos del proceso y la aplicación de tecnologías innovadoras y mejor administración del proceso. La técnica para llevar a cabo tal proyecto fue primero realizar un balance de materia donde identificaron todas las entradas y salidas incluyendo sus cantidades y cuanto les costaba disponer de ellos. Esta identificación la realizaron para cada etapa del proceso con tal detalle que se puede catalogar como un rastreo de flujo de materiales en el proceso con la finalidad de optimizar todos los recursos del sistema, al final de esta labor, dio como resultado entre otros puntos la aplicación de los principios para la sinergia de las escorias de EAF (Rostik, 1996; BCSD-GM, 1997).

Es así como en 1993 Gordon Foward y Robert D. Rogers, presidente de Chaparral Steel y IXI respectivamente se unieron para lograr el aprovechamiento de la escoria creando lo que denominaron "*CemStar*" proceso patentado que utiliza la escoria del EAF como materia prima para la elaboración de cemento portland tipo I con las mismas características que el cemento portland hecho en base a materias primas tradicionales. La escoria sustituye a la piedra caliza en la mezcla que se introduce al horno cementero, pero ellos hicieron un mecanismo tal que permite alimentar al horno con la escoria en pedazos relativamente grandes (2 pulgadas o 5 cm) sin previa molienda lo que permite ahorrar energía y se evita una parte del proceso. El proceso CemStar permite una fácil mezcla e integración de la escoria EAF y los demás materiales lo que produce una producción de calidad y mayor volumen de cemento portland, lo que ha permitido reducir el consumo de energía de 10 a 15% que equivale a 1500 kW-hr por tonelada por lo que se disminuyen las emisiones de CO₂ en similares porcentajes. Esto ha redituado no sólo con beneficios ambientales, sino también económicos, la planta incremento su capacidad en la elaboración de clínquer en alrededor de 5 a 15% con poco capital de inversión y reducido incremento de los costos, de esta forma el valor de la escoria se ha incrementado 20 veces en comparación con respecto a su tradicional uso como material de construcción de carreteras, ya que si se toma en cuenta que el valor de la escoria de acero fluctúa de 3 a 8 dólares por tonelada y que ya transformado en cemento el precio promedio es de 70 dólares por tonelada (precios de 1999); además por cada tonelada de escoria utilizada en la elaboración de clínquer se

obtiene una tonelada adicional de éste último, lo que dio como resultado un incremento de la producción sin una expansión de la planta, sin adicionales emisiones de CO₂ y requerimientos mayores de energía (Rostik, 1996; NSA, 2000).

Por la creación de este innovador proceso la TXI recibió en 1999 el premio a la *Protección del Clima* otorgado por la USEPA ya que en opinión de éstos últimos dicho proceso tiene el potencial para reducir en todo el Mundo alrededor de 90 millones de toneladas de emisiones de CO₂ cada año, además de reducir significativamente las emisiones de óxidos de nitrógeno de los hornos cementeros. Cabe señalar que el desarrollo de esta tecnología requirió 18 meses de estudios, pruebas técnicas y evaluaciones económicas para hacer de CemStar un proyecto viable de sinergia del subproducto. Actualmente TXI está en planes de colaboración con otras industrias que tienen el potencial para la aplicación de esta tecnología con productores de cemento locales e internacionales, proveyéndoles del permiso para usar esta tecnología, además de darles el equipo, asesoría técnica y el algunos casos de la materia prima si es necesario (BCSD-GM, 1997; NSA, 2000).

6.2 Otras alternativas de reciclado para las escorias siderúrgicas

6.2.1 Introducción.

Se ha mostrado la aplicación de las escorias en la industria del cemento, sin embargo ésta no es la única área productiva donde este subproducto tiene aplicación. Existen otras utilidades, unas han sido ampliamente investigadas, probadas y aplicadas por varios años, no obstante existen algunas otras aplicaciones que están en actual investigación o se han llevado a cabo recientemente. En el presente capítulo se mostrará la gama de aplicaciones que van desde la misma industria de la construcción hasta la actividad agrícola, pasando por el tratamiento de aguas residuales.

Como el volumen de residuo y subproductos generados en la sociedad y el costo de su disposición se incrementa continuamente, lo que presiona e incentiva su recuperación y reciclado para estos materiales en aplicaciones secundarias. Debido a que la construcción de pavimentos requiere de grandes volúmenes de materiales, es por tal motivo que las constructoras han vuelto la vista hacia otras opciones, con lo que han contribuido, en muchos casos sin ser su prioridad, participes en el esfuerzo del reciclaje y aliviar en cierto grado el problema social de los residuos. Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados son una buena opción que no compromete la calidad de la construcción, sin embargo residuos y subproductos difieren en tipos y

propiedades, lo que requiere una minuciosa selección para no comprometer las regulaciones, especificaciones y estándares al respecto, para con ello estar consiente de sus usos y limitaciones. Existen muchos materiales residuales que son de interés para este tipo de aplicaciones, en la tabla 7.1-1 se muestran algunos de estos residuos y sus aplicaciones, en la cuál entran las escorias siderúrgicas (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/>).

Tabla 6.2.1-1 Aplicaciones de materiales residuales en la construcción de pavimentos

APLICACIÓN - USO	MATERIAL
Asfalto - agregado (mezcla caliente)	Escoria de alto horno Escoria de calentadores de carbón Escorias no ferrosas Escorias de acero
Concreto de cemento portland -- agregado	Escoria de alto horno
Concreto de cemento portland – material cementante suplementario	Escoria de alto horno
Base granular	Escoria de alto horno Escoria de calentadores de carbón Escorias no ferrosas Escorias de acero
Rellenos	Escorias no ferrosas
Bases de estabilización – agregado	Escoria de calentadores de carbón

Fuente: Adaptado de <http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/>

La cantidad de agregado que se utiliza en la elaboración de concreto representa entre el 60 y 85% de la fracción de volumen de todos los materiales utilizados, por lo tanto su influencia en la mecánica y otras propiedades es importante. Los agregados se pueden clasificar de acuerdo a su densidad dentro de las siguientes categorías (Brandt, 1995):

1. Agregado pesado con una densidad mayor a 3000 kg/m³
2. Agregado estructural con densidad entre 2000 y 3000 kg/m³
3. Agregado ligero con densidad con densidad menor a 2000 kg/m³

Existen agregados naturales y artificiales, los primeros son explotados en canteras donde la roca es triturada en tamaños adecuados para su transportación, los principales tipos de rocas son: basalto, granito, arenisca y piedra caliza, pero otros materiales son utilizados de acuerdo a su

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

disponibilidad en la proximidad de las áreas de demanda. Los agregados artificiales son utilizados en varios países debido a tres principales razones: (1) satisfacer la creciente demanda para agregados, (2) aprovechar los grandes volúmenes de residuos industriales y de la construcción acumulados, y (3) obtener diferentes tipos de concreto ligero para elementos no estructurales y capas aislantes. Entre las características más importantes en los agregados están: forma y textura, resistencia a la compresión, distribución del tamaño del grano, humedad, coeficiente de expansión térmica, relación química con el cemento portland, este último debido a que en ocasiones existe un enlace químico entre los granos del agregado y la pasta de cemento, aunque en muchos casos esta interacción es más debida a características mecánicas (Brandt, 1995).

6.2.2 *La escoria utilizada en la industria de la construcción.*

6.2.2.1 *Escoria enfriada al aire (ACBF).*

Debido a que el proceso de enfriamiento que tiene esta escoria (enfriamiento lento) se obtiene un producto cristalino en su mayor parte, lo que la hace poco atractiva para usarse en la elaboración de cemento. Sin embargo la escoria ACBF tiene otras aplicaciones como lo son: agregado para concreto y mezcla asfáltica, como base y sub-base en la construcción de carreteras, entre otros.

En el caso de la escoria como parte de la mezcla asfáltica, la escoria ACBF puede remplazar tanto al agregado fino como al agregado grueso, además de tener algunas ventajas sobre los agregados convencionales. Este tipo de escoria es durable, dura y tiene elevada resistencia al pulido o desgaste, presente buena adherencia en la mezcla asfáltica, además de ser menos pesada por el mismo volumen que los agregados naturales, lo cual resulta en un mayor rendimiento en la pavimentación con asfalto. En los pavimentos en que se ha utilizado estas escorias han mostrado buenas características de fricción lo que minimiza el patinaje o derrape de los autos tanto en las condiciones de humedad severa (climas donde llueve mucho) como en el congelamiento de agua sobre el pavimento en épocas invernales (<http://www.slag.com>)

Entre las características y propiedades que debe tener la escoria enfriada al aire cuando se utiliza en la preparación de asfalto (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/>):

- ▶ La escoria debe ser molida y tamizada para producir un agregado de acuerdo a los requerimientos y especificaciones.
- ▶ La densidad se encuentra en el rango de 1120 a 1940 kg/m³ que es relativamente menor que los agregados convencionales.

- ▶ Debido a su superficie porosa y textura vesicular, la escoria tiene una mayor propiedad de absorción que los agregados utilizados normalmente, lo que ocasiona un mayor requerimiento de asfalto (alrededor de 3% más por peso de mezcla) lo que incrementa el costo.
- ▶ Aunque la resistencia al desgaste de la escoria enfriada al aire como agregado, medida por la maquina de Los Angeles no es particularmente favorable su aplicación, no obstante en experiencias en campo ha mostrado un comportamiento satisfactorio.
- ▶ La escoria enfriada al aire ha mostrado buena resistencia a los cambios bruscos de temperatura.
- ▶ Debido a su forma y elevado ángulo de fricción interno (40°-45°) de la escoria molida, le da una buena estabilidad cuando es incorporada en las mezclas asfálticas.
- ▶ Una de las propiedades más notables de la escoria como integrante del asfalto es su alta resistencia a la fricción debido a su textura rugosa y dureza (en la escala de Mohs de 5 a 6)
- ▶ Debido a su naturaleza hidrofóbica, la escoria enfriada al aire tiene gran afinidad por el asfalto, lo que da como resultado una excelente integración entre ambas.

Otra de las aplicaciones de esta escoria triturada es como base y sub-base en las estructuras de pavimento y losas de concreto, ya que posee las propiedades adecuadas para tal fin, como las mencionadas, ángulo de fricción interna y dureza que es comparable a las rocas ígneas, sin embargo la escoria enfriada al aire es relativamente frágil y propensa a quebrarse cuando es sujeta a cargas de impacto. Es por esta razón que para asegurar un buen rendimiento se debe disponer en una graduación uniforme y en capas gruesas, una buena uniformidad se consigue al combinar agregado fino y grueso con una cantidad optima de agua para la compactación, lo cuál puede lograrse en un 100% con un rodillo vibratorio con sólo la mitad de esfuerzo que con loa agregados convencionales. Deberá permitirse un libre escurrimiento y prevenir encharcamiento dentro o adyacente al material para evitar lixiviados alcalinos que pueden darse en tales condiciones. Se pueden ahorrar costos de transportar como consecuencia de alrededor de 12% menor densidad, cuando el material se aplica se obtiene 35% mayor rendimiento que los materiales que generalmente son ocupados. Con el fin de evitar los lixiviados con pH alto, se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones (<http://tfhrc.gov/hmr20/recycle/waste/>):

- ▶ La escoria deberá ser aplicada y acumulada por lo menos un mes antes que se utilice
- ▶ La escoria ya “envejecida” deberá colocarse como base arriba del nivel de cualquier cuerpo de agua y no colocarse en áreas de insuficiente o pobre drenaje

- ▶ Se recomienda su uso en suelos con un buen sistema de escurrimiento subterráneo.

Finalmente la escoria enfriada al aire puede ser utilizada como agregado en las mezclas de concreto, así como en productos de concreto precolado; debido a sus propiedades y composición mineralógica elimina la formación de rupturas en el concreto de cemento portland y su porosidad le da un buen mecanismo de enlace con la pasta de cemento portland, le confiere un 10% mayor de resistencia a la compresión en el concreto, además la ventaja de su bajo peso en comparación con la grava da como resultado ocupar 15% menos en agregado grueso (<http://www.slag.com>). En la tabla 6.2.2.1-1 se muestra un resumen de las aplicaciones de este tipo de escoria.

Tabla 6.2.2.1-1 Aplicaciones de la escoria enfriada al aire

Aplicaciones	Ventajas de su aplicación
▶ Concreto	▶ Como agregado tiene una buena integración con la pasta de concreto
▶ Pavimento asfaltado	▶ Mayor rendimiento en aplicaciones de construcción
▶ Agregado ligero	▶ Mejor resistencia al derrape y estabilidad en pavimento asfaltado
▶ Unidades de mortero	▶ Alto ángulo de fricción interna
▶ Aplicaciones en diques o canales	▶ Bajo peso lo que le da ventaja en la construcción estructural
▶ Acondicionador de suelos	▶ Resistente al fuego para aplicaciones de mortero y concreto
▶ Fundente metalúrgico	▶ Bajos costos de flete y manejo
▶ Manufactura de vidrio	▶ Relleno de suelo con balance mineral y de pH

Fuente: National Slag Association, 2000

6.2.2.2 Escoria expandida y peletizada.

Este tipo de escoria resalta por su peso ligero en comparación materiales similares e incluso comparada con otras escorias, es esta una de las principales características que la hacen atractiva en ciertas áreas de la construcción. La escoria expandida se utiliza como agregado ligero en la fabricación de concreto ligero, en concreto no estructural, o en cualquier otro tipo de construcción de ingeniería de peso ligero, en donde esta escoria ofrece las siguientes ventajas (NSA, 2000):

- ▶ Carga reducida
- ▶ Mayor resistencia al fuego
- ▶ Mejor aislamiento
- ▶ Ruptura térmica reducida

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- ❑ Transportación y manejo económico
- ❑ Cumple con los estándares ASTM C330 y C331

Tanto la escoria expandida como la peletizada se utiliza para la elaboración de mampostería o mortero ligero, lo cuál provee economía de ingeniería como resultado de las reducidas cargas de peso muerto para aplicaciones nuevas y de reingeniería en una construcción ya establecida, aunado a los beneficios mencionados de resistencia al fuego y aislamiento térmico; en el concreto prefabricado ofrece reducciones de entre 35 y 40% en la masa total, lo que da como resultado beneficios económicos en el manejo y embarque. Para rellenos también ofrece ventajas al reducir las cargas de peso muerto, por ejemplo para la estabilización de suelos, en aplicaciones para rellenos en estructuras (<http://www.slag.com>).

Otra de las utilidades que tienen estas escorias es en la elaboración de unidades de construcción (ladrillos o bloques de concreto prefabricados), como consecuencia de su buen aislamiento térmico, y su estructura celular que le confiere ligereza y al mismo tiempo firmeza. Las unidades de construcción tienen una coloración que va de gris tenue a blanco, el peso típico de unidades con tamaño de 8"x 8"x 16" (estándar en Estados Unidos) o 20.32cm x 20.32cm x 40.64cm hechos con 100% de escoria están en los siguientes rangos:

- ❑ Escoria expandida 11-16 kg
- ❑ Escoria ACBF 16-20 kg
- ❑ Escoria granulada 12-16 kg



Las unidades de construcción tienen mínimo encogimiento en el secado, el producto final tiene baja conductividad térmica, tienen un mayor efecto tanto en la absorción de firmeza como en la transmisión de firmeza a través de las paredes construidas con este tipo de materiales (<http://www.edwclevy.com/slag/homeslag.htm>). En la tabla 6.2.2.2-1 se muestra un resumen de las aplicaciones para ambos tipos de escorias. Existen patentes para este tipo de "blocs" comercializados en Estados Unidos, como el denominado "Sound Cell System"

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ofrecido por *Best Block & Richvale York Block*; este tipo de materiales de construcción ya han sido usados en obras masivas, un ejemplo es el nuevo parque de béisbol en Chicago, Estados Unidos, llamado "*Comiskey Park*" en el se utilizaron alrededor de 900 000 unidades de construcción a partir de escoria expandida de alto horno con el fin de alcanzar el peso estructural deseado (NSA, 2000).

Tabla 6.2.2.2-1 Aplicaciones de las escorias peletizada y expandida

Aplicaciones	Ventajas de su aplicación
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Unidades de concreto y mortero de peso ligero <input type="checkbox"/> Agregado ligero para concreto estructural <input type="checkbox"/> Manufactura de cemento (peletizada) <input type="checkbox"/> Como relleno ligero <input type="checkbox"/> Como base y sub-base para la construcción de pavimentos 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Propiedades únicas para la construcción de unidades de construcción <input type="checkbox"/> Sustancial ahorro en el manejo, embarque y transportación debido a su peso ligero <input type="checkbox"/> Altos estándares en resistencia al fuego en pruebas realizadas por la <i>Asociación Americana de Seguridad (American Insurance Association)</i> <input type="checkbox"/> Reducción en las "<i>cargas muertas</i>" <input type="checkbox"/> Buenas propiedades térmicas, principalmente como aislante

Fuente: National Slag Association, 2000

6.2.2.3 Escoria del proceso de aceración.

Las escorias generadas en el proceso de aceración han sido utilizadas desde hace varios años en Estados Unidos, Japón, Alemania, Bélgica, Holanda, entre otros como base granular en la construcción de carreteras o como agregado en la construcción, históricamente la escoria del proceso de aceración se muele y reutiliza como material fundente en los hornos de producción de hierro, sin embargo esto ha caído en desuso debido a que en el acero parte de las impurezas que se desean eliminar es el fósforo y éste al ser removido pasa a formar parte de la escoria y si se recicla como fundente, se está contribuyendo a aumentar las impurezas indeseables. Estas escorias pueden ser procesadas como agregado fino y grueso para usarse en las mezclas de concreto asfáltico, alguna de las características favorables para este fin son: buena propiedad de fricción, alta estabilidad, resistencia al desgaste y deformación. Las escorias del proceso de aceración son más densas en comparación con las otras escorias y demás materiales utilizados en las mezclas de asfalto, de modo que cuando las escorias están presentes la mezcla suelen ser de 15 a 25% más pesada. El agregado de escoria de acero es muy duro y resistente a la abrasión, por lo mismo muestra durabilidad a los cambios meteorológicos y a la erosión, en los países donde ha sido aplicado para este fin ha mostrado satisfactoria resistencia a la fricción, esto es una ventaja cuando se requieren altas resistencias, es el caso de caminos industriales y

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

áreas sujetas a tráfico intenso. Ha sido reportado que la escoria de acero como agregado retiene el calor considerablemente más que los utilizados normalmente, lo cuál tiene ventajas cuando la mezcla asfáltica se utiliza en climas fríos, así mismo la escoria de acero tiene una alta estabilidad (1.5 a 3 veces más que las mezclas convencionales) con buenas propiedades de flujo (<http://www.heckettmultiserv.com>)

Sin embargo este tipo de escoria tiene ciertas desventajas con las que se debe tener cuidado; las escorias de acero generalmente son propensas a expandirse debido a la presencia de cal libre y óxido de magnesio que no reaccionó en el proceso de aceración y que pueden hidratarse y expandirse en ambientes húmedos. Esta expansión natural, donde su volumen cambia alrededor de 10% o más, puede causar dificultades con productos que contienen esta escoria, como rupturas en el pavimento. Para evitar que esto se presente, la escoria deberá apilarse en exteriores por varios meses, mínimo tres y quizás hasta 18 meses, y exponerlo de esta manera a condiciones de precipitación pluvial y humedad natural o en su caso aplicación de agua, con el propósito de permitir la hidratación perjudicial antes de ser aplicada. Se recomienda que la cantidad de los compuestos con el potencial para hidratarse no debe exceder el 3% en peso de éstos y que no se detecten partículas aglomeradas de óxido de calcio. Cuando la escoria de acero se utiliza como base granular en carreteras, se tiene también el inconveniente de la formación de toba (precipitado blanco formado por la reacción química de CO_2 atmosférico y el CaO de las escorias de acero) la cuál se deposita entre los espacios vacíos y ocasionan taponamiento sobre el pavimento lo que crea retención de agua y condiciones de reblandecimiento de éste, además que épocas del año de intenso frío el agua retenida puede congelarse y provocar severos problemas en el pavimento. En países como Bélgica y Holanda han limitado el contenido de CaO libre a 4.5% cuando se aplica como base granular y se recomienda que las carreteras construidas con este material deben tener buen drenaje para evitar encharcamientos prolongados. El pH que tienen los gránulos de escoria está en el rango de 8 a 10 y sus lixiviados en alrededor de 11 lo cuál puede corroer tuberías galvanizadas o de aluminio si se encuentran en contacto directo con la escoria o sus lixiviados (<http://tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/>)

Se han desarrollado nuevos productos con escoria de acero que se han aplicado con éxito como pavimento en carreteras, por ejemplo, se ha hecho una mezcla de escoria de EAF pulverizada y un compuesto polimérico que recibe el nombre de "F-4", el cuál combinado con agregado grueso de alta calidad ha dado como resultado, dicho por sus inventores, la rodada más segura para el autotransporte (NSA, 2000). En la tabla 6.2.2.3-1 se muestran en términos generales los usos principales que tiene la escoria de acero.

Tabla 6.2.2.3-1 Usos de la escoria de acero

<input type="checkbox"/>	Agregado en concreto asfáltico
<input type="checkbox"/>	Balastos de ferrocarril
<input type="checkbox"/>	Rellenos en construcciones
<input type="checkbox"/>	En bases y sub-bases
<input type="checkbox"/>	Acondicionador de suelos

Fuente: NSA 2000

6.2.3 Utilización de la escoria como acondicionador de suelos.

Los productos de la degradación de las rocas bajo la acción de la intemperie junto con los residuos orgánicos arrastrados por el agua forman poco a poco una capa superficial en la corteza terrestre que se le denomina suelo y es donde se da el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los principales elementos que conforman el suelo son cuatro: arena o silice ($\approx 50\%$), arcilla ($\approx 25\%$), caliza ($\approx 15\%$) y humus ($\approx 10\%$); si alguno de estos componentes se excede notablemente, al suelo se le suele denominar arenoso, arcilloso, calcáreo o humífero. Se requieren 16 elementos o nutrientes esenciales para el crecimiento y reproducción de las plantas; los nutrientes primarios incluyen al nitrógeno, fósforo y potasio; los nutrientes secundarios lo conforman el azufre, calcio y magnesio; el tercer grupo de elementos esenciales son llamados micronutrientes debido a que se requieren en pequeñas cantidades por las plantas, éstos son el hierro, manganeso, boro, cinc, cobre, molibdeno y cloro. El dióxido de carbono, en el aire, y agua son fuente de carbón, hidrógeno y oxígeno para la mayoría de las plantas superiores. La disponibilidad de estos elementos se ve influenciada por el pH del suelo a través de los mecanismos de fijación y liberación de estos elementos (<http://www.ag.ohio-state.edu/~ohioline/b472/fertile.html>).

Debido a las transformaciones fisicoquímicas naturales que sufre el suelo, convierten la roca y sus minerales en material terroso que contiene arcillas, iones o nuevos minerales, parte de los iones que se liberan percolan hacia el interior del suelo, dicho proceso se ve intensificado en lugares donde la precipitación pluvial es alta por lo que la percolación es más intensa, no obstante iones como los de hidrógeno, hierro y aluminio que son poco móviles y tienden a acumularse en relación con otros, es debido a esto que zonas de alta precipitación existe mayor concentración de iones de hidrógeno y aluminio que caracterizan a los suelos ácidos. La acidez del suelo es una importante característica del suelo debido a que su efecto en la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, de igual manera la acidez del suelo también afecta la actividad microbiana, la capacidad de intercambio iónico del suelo y su estructura física. El pH de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

muchos suelos están en el rango de 3.5 a 10, cuando el pH es bajo la disponibilidad de nutrientes en las plantas tales como fósforo y molibdeno se reduce; en caso contrario cuando el pH es alto, la disponibilidad de hierro, manganeso, cinc, cobre y boro disminuye. Aun cuando el suelo tiene cierta capacidad para amortiguar cambio en el pH existen factores tales como la cantidad y tipo de arcilla o materia orgánica que la afectan. Muchos suelos en trópicos húmedos son ácidos y existe un elevado intercambio de iones de aluminio lo que puede ser tóxico para el desarrollo de las plantas, el problema se da cuando el pH es menor de 5.5, lo cual es necesario corregir (Agudelo et. Al., 2000; <http://www.uog.edu/cals/site/users/soil/soil/fertfet3.html>) Para mejorar las condiciones de los suelos ácidos por lo general se lleva a cabo el encalado que consiste en suministrar cal o algún compuesto que lo contenga ya que neutraliza la excesiva acidez de este tipo de suelos, los beneficios del encalado son los siguientes (<http://www.ag.ohio-state.edu/~ohioline/b472/fertile.html>):

- ❑ Suministra calcio y magnesio
- ❑ Incrementa el pH del suelo
- ❑ Reduce el daño debido a las concentraciones de aluminio
- ❑ Favorece el incremento de la actividad microbiana, lo cuál resulta en la liberación de nitrógeno, fósforo, boro, azufre y otros elementos desde la materia orgánica del suelo.
- ❑ En el caso de suelos arcillosos el encalamiento los hace más permeables y les impide endurecerse excesivamente por la desecación.

Los materiales agrícolas usados para la corrección de la acidez del suelo incluyen al óxido de magnesio, óxido de calcio, hidróxidos, carbonatos, silicatos o combinaciones de éstos; comercialmente los productos utilizados para tal fin son cal viva, cal hidratada, carbonato de calcio, piedra caliza, escoria pulverizada para uso agrícola, piedra caliza granulada, escoria granular, etc. Entre más finamente molido se encuentre el material es mayor su eficacia y más rápidamente reacciona con el suelo ácido. Hay dos tipos de escoria utilizada para este fin: escoria enfriada al aire y escoria granulada; la primera debe tener la misma fineza que la piedra caliza, mientras que la granulada generalmente se tamiza antes de ser aplicada. Las escorias no sólo se utilizan como encalante, sino también como una fuente de nutrientes debido a su contenido de fósforo, magnesio, calcio y de algunos micronutrientes presentes (<http://soils-earth.massey.ac.nz/cysoil/article/slag.htm>; Agudelo et. al., 2000). En términos generales aplicar la escoria como encalante no es peligroso ya que el contenido de metales pesados es bajo o sólo está presente en trazas como es el caso de cromo, la mayor proporción de su composición son óxidos de calcio, silicio y magnesio como se observó en el capítulo tres. Se han llevado estudios sobre la cantidad de escoria requerida por la corrección del suelo, ésto sin embargo, dependerá de la composición de la

escoria que en sus componentes básicos varía dentro de cierto rango, del pH y características del suelo donde se va a aplicar; por ejemplo en un estudio realizado en el país Vasco, España se utilizaron 7500kg de escoria por hectárea para incrementar el pH del suelo de 5.3 a 6.4; en otro estudio realizado en Colombia se requirieron 2.0 gramos de escoria por kg de suelo para incrementar el pH de 4.8 a 5.5 (Pinto *et. al.*, 1995; Agudelo *et. al.*, 2000).

Se han llevado a cabo también la recuperación de sitios donde durante años se depositaron escorias siderúrgicas mediante la aplicación de vegetación que permita su reincorporación al paisaje y lo menos traumáticamente posible al ecosistema, sin embargo las escorias presentan algunas dificultades para llevar a cabo esta restauración. Para que se dé crecimiento y supervivencia de las plantas se requiere de ausencia de intolerables esfuerzos físicos (derrumbes, escurrimientos de tierra), ausencia de compuestos tóxicos o fitotóxicos, adecuado almacenamiento de agua que evite el secado, adecuada disponibilidad de nutrientes, anclamiento (un suelo que permita ser penetrado por raíces, es decir, que sea un soporte estable) y que se tenga una buena aireación. En la recuperación que se llevó a cabo en Pittsburgh, Pennsylvania, Estados Unidos en un sitio llamado *Nine Mile Run* donde se depositaron con el tiempo escoria siderúrgica, se llegó a la conclusión de los siguientes puntos para un establecimiento exitoso de vegetación en la escoria (<http://www.slaggarden.cfa.cmu.edu>):

- ❑ Introducción de especies adaptadas a las condiciones del suelo (las escorias y sus lixiviados son alcalinos, pH de 9.5 a 11).
- ❑ Ruptura de la escoria para incrementar la penetración de la raíz.
- ❑ Mezclado de materiales dentro de la escoria para permitir la retención de agua.
- ❑ Añadir fertilizantes como fuente de nutrientes que permita su disponibilidad para la vegetación.
- ❑ Introducción de especies fijadoras de nitrógeno para el mantenimiento natural del nitrógeno y permitir la fertilidad.
- ❑ Cubrir con pajote para minimizar la erosión.
- ❑ Aplicar un proceso sucesivo de especies vegetales, es decir, conforme las primeras plantas se desarrollen, las condiciones serán mejor para introducción de nuevas especies.

Las limitaciones de la escoria para tal fin se señalan a continuación:

- ❑ Textura gruesa, lo que ocasiona baja retención de agua.

- ❑ La escoria por ser oscura absorbe excesivo calor directo de la luz solar, provocando deshidratación de las semillas antes de que pueda germinar.
- ❑ La característica cementante, en algunos casos, de la escoria le hace ser un medio poco adecuado para permitir que las raíces se distribuyan en ella.
- ❑ Tienen un pH relativamente alto (9-11).
- ❑ Lo anterior está asociado con una baja solubilidad de nutrientes (fósforo, hierro, manganeso, cobre, cinc) y tendencia de que la forma amoniacal del nitrógeno se volatilice.
- ❑ Falta de disponibilidad de nitrógeno en las plantas.
- ❑ Falta de enzimas en el suelo que faciliten el ciclado de nutrientes.
- ❑ Debido a lo escaso de vegetación queda expuesto a las condiciones meteorológicas imperantes sin protección alguna.

Las escorias presentan ciertas ventajas como medio para el crecimiento de plantas que incluyen: su alta porosidad que permite buen intercambio del aire con las raíces, las plantas pueden potencialmente interceptar adecuadas cantidades de agua a través de las raíces, esto compensa en parte la reducida retención de agua por parte de la escoria, y ésta expuesta a la intemperie con el tiempo puede alcanzar un pH estable de entre 7 y 8.3. En el estudio mencionado anteriormente se describen las características de árboles que crecen en la escoria, que se presenta a continuación.

Tabla 6.2.3-1 Algunas características de árboles que crecen en la escoria

Nombre científico	pH	Patrón de raíz	Longevidad
Acer negundo	6.5 – 7.5	Profunda	Corta
Morus rubra	6.3 – 8.0	Profunda	Corta
Planatus occidentalis	6.6 – 8.0	Superficial	Larga
Populus grandidenta	5.1 – 6.3	Superficial	Corta
Rhus glabra	6.1 – 7.0	Superficial	Corta
Rhus typhina	6.1 – 7.0	Superficial	Corta
Robina pseduacacia	5.1 – 7.7	Superficial	Corta
Ulmus americana	6.6 – 8.0	De superficial a profunda	Mediana

Fuente: adaptado de <http://www.slaggardon.cfa.cmu.edu>

6.2.4 Áreas de actual investigación para la escoria siderúrgica.

Existen dos áreas de investigación que recientemente ha involucrado el uso de la escoria que tiene que ver con el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales: la remoción de fósforo y de algunos metales pesados disueltos, a continuación se hace una exposición general sobre estos dos puntos. Desde hace mucho tiempo se ha

aplicado el sistema de autopurificación a través del suelo para el tratamiento de aguas residuales, principalmente domésticas, lo que implica el uso de las plantas, de la superficie y de la matriz del suelo para el tratamiento de aquellas; existen tres principales procesos de aplicación al terreno de agua residual: (1) el riego, proceso que implica la aplicación del efluente al terreno para su tratamiento y para proporcionar las necesidades de ciertos compuestos para el crecimiento de plantas, el efluente aplicado sufre un tratamiento por medios físicos, químicos y biológicos al filtrarse en el suelo; (2) infiltración rápida, donde el efluente se aplica al suelo a tasas elevadas generalmente por aspersión, llevándose a cabo el tratamiento al atravesar el agua la matriz suelo cuyos objetivos principales son la recarga del acuífero, el tratamiento natural seguido de la extracción por bombeo o por drenaje para su recuperación; y (3) circulación superficial, tratamiento biológico en el cuál se aplica el agua residual sobre la zona superior de unas terrazas dispuestas con cierta pendiente desde donde fluye el agua a través de la superficie vegetal hasta una zona donde se colecta. Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales son especialmente atractivos en áreas rurales que no cuenta con sistema de alcantarillado o drenaje (Metcalf & Eddy, 1985; Johansson, 1999).

Este tipo de tratamiento puede ser mejorado utilizando un medio conveniente que sea capaz de captar alguno de los contaminantes presentes. Se han llevado a cabo estudios con algunos materiales que incluyen zeolita, cenizas, opoka y escorias siderúrgicas entre otros para la remoción de fósforo. Las aguas residuales contienen fósforo en forma de polifosfatos, ortofosfatos y fósforo orgánico con la forma inorgánica; cuando está en contacto con el suelo, el fósforo puede ser retenido por óxidos de hierro, aluminio y carbonato de calcio, sin embargo para optimizar y hacer más rápido este proceso se pueden utilizar materiales sorbentes reactivos que sean fáciles de cambiar cuando la saturación del material se alcance, aunado a una buena conductividad hidráulica, es deseable también que el fósforo retenido esté en una forma tal que las plantas lo puedan asimilar, lo que haría que el material sea utilizado en la agricultura (Johansson y Gustafsson, 2000).

Se ha encontrado que la escoria de alto horno retiene eficientemente el fósforo lo que lo hace ser una posible alternativa como material filtrante para la remoción de fósforo de aguas residuales en humedales. En estudios que se han realizado al respecto la escoria ha mostrado una elevada capacidad de adsorción de este elemento en tasas de 44.2 gr de fósforo por kg de escoria, más alto que otros materiales estudiados. Los mecanismos involucrados en la sorción del fósforo aun no se conocen muy bien, sin embargo se cree que el calcio contenido en los materiales alcalinos de la escoria puede ser un eficiente material para la remoción del fósforo, a través de mecanismos de adsorción y precipitación, estos mecanismos se ven influenciados por el potencial redox, el pH, la presencia de hierro,

aluminio y calcio, tiempo de contacto y carga hidráulica; además de que en lugares cálidos o épocas del año cálidas, por el aumento de temperatura del ambiente, la adsorción se incrementa debido a que la adsorción es un proceso exotérmico, así que ésta aumenta o baja dependiendo de la temperatura (Skadevan y Bavor, 1998; Agyei *et al.*, 2000). En los estudios donde se ha probado tanto la escoria cristalina (enfriada al aire) como la escoria amorfa (granulada), se ha observado que cuando el tiempo de contacto es corto, la escoria amorfa presenta mayor retención de fósforo, mientras que cuando el tiempo de contacto es grande (24 horas) la escoria cristalina tiene mayor capacidad de adsorción, esto probablemente a que como la estructura de la escoria cristalina es porosa, tiempos de contacto largos permite que mayores cantidades de fósforo se difundan dentro de los poros, por lo que a la larga se retiene mayor fósforo en su estructura (Johansson y Gustanfsson, 2000).

Otro de los estudios que se han llevado a cabo sobre la utilización de las escorias es la remoción de metales pesados disueltos, en especial se han investigado para el caso del cobre, cinc, níquel y plomo. La adsorción de iones metálicos por las escorias de alto horno ocurre principalmente por mecanismos de intercambio iónico; el proceso se inicia con una parcial disolución e hidrólisis del silicato de calcio y aluminosilicatos presentes en la escoria lo que incrementa el pH con la liberación de iones de calcio lo que origina que los lugares que éstos ocupaban ahora los tomen los iones metálicos desde la solución, el proceso está acompañado por una precipitación parcial del hidróxido metálico sobre la superficie de la escoria, aunque el mecanismo dominante es la adsorción, ya que éste es cinéticamente más rápido que el de precipitación, además de que la precipitación del hidróxido metálico dentro de los poros o espacios alrededor de las partículas es apenas posible. Este tipo de resultados abre la posibilidad de utilizar este tipo de materiales para la remoción de metales pesados de aguas residuales principalmente de origen industrial, ya que su aplicación es menos costosa que la utilización de quelatos poliméricos para este fin, aunque aun se requieren más investigaciones (Dimitrova y Mehanjiev, 1998 y 2000).

6.2.5 Otros aspectos.

Otras investigaciones se han llevado a cabo para la utilización de las escorias en el área de la construcción; desde hace 14 años una investigación llevada a cabo en Sao Paulo, Brasil, se utilizó la escoria para la construcción de paredes hechas con cemento de escoria de alto horno y fibra de coco. Por un lado la fibra de coco es un material no peligroso en comparación con la fibra de asbesto, más barato que la fibra de vidrio y más eficiente que la fibra de sisal, sin embargo la fibra de coco es sensible a las sustancias químicas que conforman el cemento portland ordinario, por tal razón su investigación se centró en la

utilización de la escoria de alto horno que, según sus investigaciones, son menos alcalinas y afectan menos la durabilidad de la fibra de coco, además la escoria utilizada como material cementante es más barato que el cemento portland ordinario. La investigación está enfocada en la construcción de casas de interés social a un costo de 11% menor que las construidas con materiales convencionales, dándole un contenido social en conjunto con el aspecto ambiental (http://www.idrc.ca/nayudamma/wall_55e.html).

Usos muy variados se le han dado a la escoria; se utiliza como material abrasivo dado que su estructura física externa que le confiere cierta textura rugosa se aprovecha por ejemplo para borrar "graffiti" o en limpieza de estructuras rocosas, en esculturas o en edificios. Otro uso es como materia prima para la elaboración de vidrio, debido a que la manufactura de vidrio implica el uso de materiales como cal, sílice y alúmina entre otros, la escoria puede ser una fuente parcial de estos materiales, una de las compañías productoras de vidrio a partir de escoria es *Culumite Corporation* de Estados Unidos, quienes desde 1969 aprovecha la escoria de alto horno para la manufactura de botellas de vidrio entre otros productos como se observa en la figura de la derecha (<http://www.appleby-group.demon.co.uk/>).



Finalmente se presenta a continuación una tabla con los precios de comercialización de las diferentes escorias en los Estados Unidos, única referencia que ofrece este tipo de información, con el fin de que se tenga una idea de los costos relacionados con las escorias.

Tabla 6.2.5-1. Valor promedio de las escorias siderúrgicas en los Estados Unidos
(Dólares por tonelada)*

Año	ESCORIAS DE ALTO HORNO			Escoria de Acero	Total Promedio
	Enfriada al aire	Expandida (incluye granulada)	Promedio		
1995	5.68	29.73	8.82	3.16	6.89
1996	5.55	31.21	8.66	3.24	6.90
1997	5.73	30.57	9.41	3.54	7.23
1998	6.00	34.00	10.00	4.00	8.00
1999	6.50	32.00	11.00	4.00	8.00

* A precios corrientes. Fuente: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/

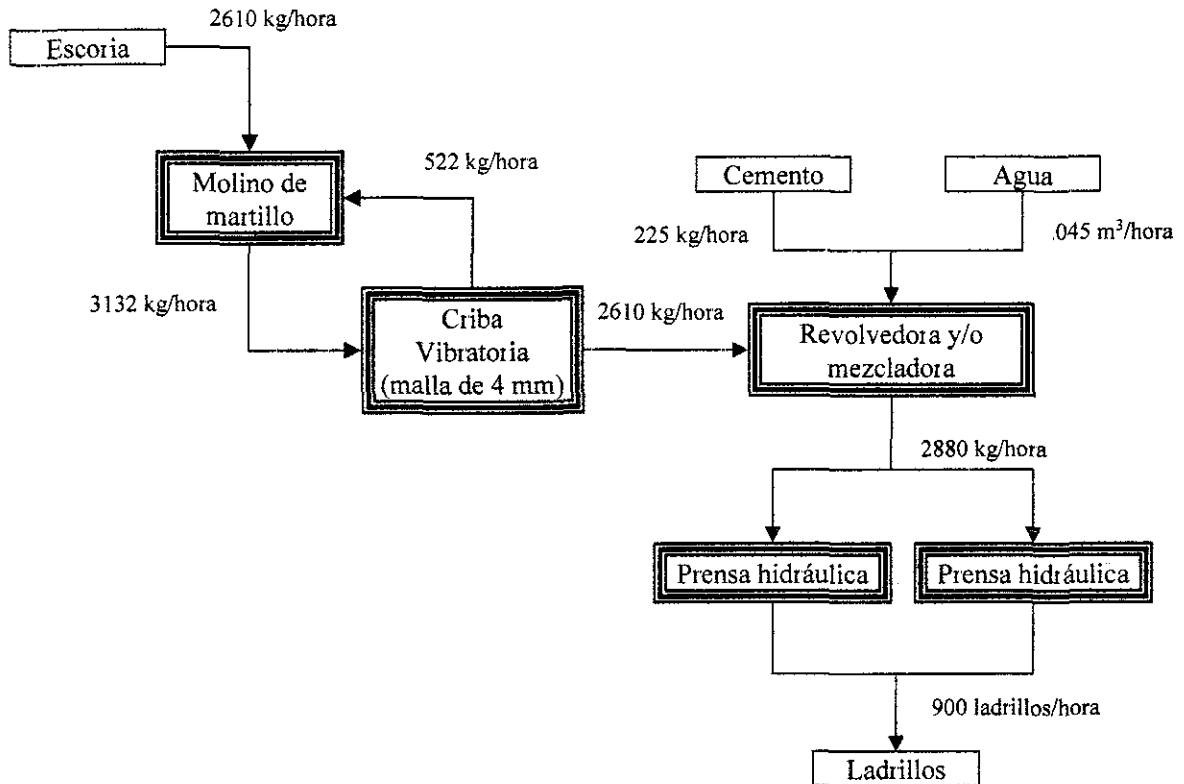
Con la finalidad de ilustrar desde el punto de vista económico el uso de la escoria siderúrgica en alguna de las alternativas mencionadas, se hace un análisis de costos para la fabricación de unidades de construcción (ladrillos). Existen diferentes procesos utilizados en la actualidad para la elaboración de estas unidades; la forma tradicional es aquella donde se utiliza arcilla, a la cual se le adiciona agua y otros aditivos para darle consistencia a la mezcla como lo es la arena, dicha mezcla se vierte en moldes, se dejan secar a la temperatura ambiente para posteriormente ser horneados, lo que como resultado el tradicional ladrillo rojo. Existen, sin embargo, otros tipos de unidades de construcción, los denominados “blocks” y/o tabiques, los cuales se preparan a partir de la mezcla de materiales de construcción como lo son los diferentes tipos de arenas, grava, polvo de mármol, tepetate, tezontle, etc., así como de materiales residuales de la propia industria de la construcción, de la explotación minera, de procesos industriales como la cerámica, el vidrio y en este caso la industria siderúrgica, todos estos materiales tanto de origen natural como industrial se mezclan con materiales cementantes y agua para dar un material sólido con resistencia estructural adecuados para la construcción en general (Mclean, 1969).

A este último proceso se le llama proceso en frío ya que no requieren cocción u horneado. El proceso propuesto para la fabricación de ladrillos utilizando escoria siderúrgica consiste básicamente en la recepción del material triturado, luego cribarlo bajo una granulometría específica, generalmente que pase a través de una malla de 4 mm, el material ya cribado se mezcla con cantidades establecidas de agua y cemento para formar una pasta semiseca que se deposita en los moldes de una prensa hidráulica y se somete a una compresión elevada, lo que da como resultado un material endurecido de granos apretados y denso, sin aire en su interior, sin retención de agua y sin canales capilares que toma la forma del molde, a este tipo de material se le denomina “piedra Marmoor”, dicho material ha sido ya probado en otros países con diferentes materias primas, sin embargo, se debe aclarar que esta propuesta debe sujetarse a pruebas experimentales que demuestren que la utilización de la escoria siderúrgica es adecuada en las condiciones mencionadas o si éstas deben modificarse para obtener los resultados deseados o simplemente este material no es adecuado para tal fin mediante el proceso mencionado, lo cual queda abierto para una investigación subsiguiente (<http://www.recyclingstones.com/>)

Las materias primas utilizadas para cada ladrillo macizo (24 x 11.5 x 5.2 cm):

- Escoria 2.9 kg
- Cemento 0.25 kg
- Agua 0.05 L (+/-)

En el diagrama que se presenta a continuación se muestra el proceso básico para la elaboración de ladrillos:



En la elaboración del proceso se tomaron las siguientes consideraciones:

- ❑ Para llevar a cabo el análisis de costo en la elaboración de estos ladrillos se tomó un sistema básico o batería de producción en pequeña escala, el cual puede escalarse con varias de estas baterías, sin embargo está la posibilidad de verificar los costos para la trituración y cribado, ya que con una producción mucho mayor puede ser más factible económicamente la utilización de equipos de mayor capacidad.
- ❑ La recomendación de uso continuo de la prensa hidráulica por el proveedor es de siete horas.
- ❑ La cantidad de mezcla preparada está basada en la capacidad de producción de ladrillos por las prensas hidráulicas, que es cada una de 450 ladrillos por hora.
- ❑ Dependiendo del tamaño máximo de alimentación y capacidad de producción de la trituradora será la granulometría del material producido y un porcentaje de dicho material no pasará por la criba con una malla determinada, para lo cual existen gráficas que muestran el porcentaje retenido o el mismo proveedor lo puede indicar,

en este caso del 15 al 20 por ciento del material no pasara una malla alrededor de 4 mm, para este análisis se considera que el 20 por ciento no pasa en la criba y se retorna de nuevo al molino (Day, 1978).

- Se considera que las perdidas que se pueden llegar a ocasionar en el prensado no son considerables.
- El proceso se puede automatizar casi en su totalidad, sin embargo esto en encarecería el producto, máxime si es en pequeña escala, como el aquí analizado; de todas maneras para el transporte de la materia prima en el sistema puede llevarse a cabo mediante bandas transportadoras, así mismo la preparación de la mezcla se puede llevar a cabo a través una mezcladora mecánica o manualmente dependiendo de la inversión que se quiera o el capital con que se cuente.

COSTOS DE MATERIA PRIMA Y SU PREPARACIÓN

Insumos	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Escoria siderúrgica	Kg/hora	2610	\$ 0.06	\$ 166.65
Cemento	Kg/hora	225	\$ 1.30	\$ 292.50
Agua	m ³ /hora	0.045	\$ 19.00	\$ 0.86
			Subtotal	\$ 460.00

Mano de Obra	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Oficial de albañilería (2)	Jor	0.25	\$ 62.11	\$ 15.53
Peón (4)	Jor	0.5	\$ 58.77	\$ 29.39
			Subtotal	\$ 44.91

Total Costo Horario	\$ 504.92
----------------------------	------------------

La maquinaria necesaria en el proceso son:

- Molino de martillos
- Criba vibratoria
- Mezcladora o revolvedora
- Prensa hidráulica

A continuación se presenta los costos horarios de la maquinaria antes mencionada:

Molino HAZEMAG unirotor 4190/190 con capacidad de hasta 3 ton/hora

Valor de adquisición	(Va) =	\$ 122,000 00
Horas anuales de uso	(Ha) =	2,230 00
Vida económica	(V) =	12 00
Tasa de seguro	(s) =	3 00
% de mantenimiento	(Q) =	70 00
% de rescate	(r) =	20 00
Tasa de interés	(i) =	16 00
Vr = Va * r	=	\$ 24,400 00
Ve = V * Ha	=	26 760 00

CARGOS FIJOS

a) Depreciación	$D = (Va - Vr) / Ve$	\$	3 65
b) Inversión	$I = i * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	5 25
c) Seguros	$S = s * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	0 98
d) Mantenimiento	$M = Q * D$	\$	2 55

TOTAL DE CARGOS FIJOS: \$ 12 44

CONSUMOS

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Energía eléctrica	KWH	50 00	0 5022	\$ 25 11

TOTAL DE CONSUMOS: \$ 25 11

OPERACIÓN

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Operador de maquinaria pesada	jor	0 125	166 75	\$ 20 84

TOTAL DE OPERACIÓN: \$ 20 84

COSTO HORARIO: \$ 58.39

Criba HAZEMAG de una cama con malla de 4 mm

Valor de adquisición	(Va) =	\$ 50,000 00
Horas anuales de uso	(Ha) =	2,230 00
Vida económica	(V) =	12 00
Tasa de seguro	(s) =	3 00
% de mantenimiento	(Q) =	70 00
% de rescate	(r) =	20 00
Tasa de interés	(i) =	16 00
Vr = Va * r	=	\$ 10 000 00
Ve = V * Ha	=	26,760 00

CARGOS FIJOS

a) Depreciación	$D = (Va - Vr) / Ve$	\$	1 49
b) Inversión	$I = i * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	2 15
c) Seguros	$S = s * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	0 40
d) Mantenimiento	$M = Q * D$	\$	1 05

TOTAL DE CARGOS FIJOS: \$ 5 10

CONSUMOS

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Energía eléctrica	KWH	20 00	0 5022	\$ 10 04

TOTAL DE CONSUMOS: \$ 10 04

OPERACIÓN

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Operador de maquinaria pesada	jor	0 125	166 75	\$ 20 84

TOTAL DE OPERACIÓN: \$ 20 84

COSTO HORARIO: \$ 35.98

Revolvedora Mípsa R-20 de 30 HP

Valor de adquisición	(Va) =	\$ 103,472 00
Horas anuales de uso	(Ha) =	2,230 00
Vida económica	(V) =	3.00
Tasa de seguro	(s) =	3.00
% de mantenimiento	(Q) =	60 00
% de rescate	(r) =	20 00
Tasa de interés	(i) =	16 00
$Vr = Va * r$	=	\$ 20,694 40
$Ve = V * Ha$	=	6,690.00

CARGOS FIJOS

a) Depreciación	$D = (Va - Vr) / Ve$	\$	12 37
b) Inversión	$I = i * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	4 45
c) Seguros	$S = s * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	0 84
d) Mantenimiento	$M = Q * D$	\$	7 42
TOTAL DE CARGOS FIJOS:		\$	25 09

CONSUMOS

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Gasolina	lt	3.00	4.70	\$ 14.10
Aceite lubricante	lt	0 045	12 93	\$ 0 58
TOTAL DE CONSUMOS:				\$ 14 68

OPERACIÓN

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Operador de maquinaria pesada	jor	0 125	166 75	\$ 20.84
TOTAL DE OPERACIÓN:				\$ 20 84

COSTO HORARIO:	\$ 60.61
-----------------------	-----------------

Maquina Ecopress EF1, 11 Kw de potencia, capacidad de 450 ladrillos por hora

Valor de adquisición	(Va) =	\$ 2,125,350 00
Horas anuales de uso	(Ha) =	4,270 00
Vida económica	(V) =	10.00
Tasa de seguro	(s) =	3 00
% de mantenimiento	(Q) =	60 00
% de rescate	(r) =	20 00
Tasa de interés	(i) =	16 00
$Vr = Va * r$	=	\$ 425,070 00
$Ve = V * Ha$	=	42,700 00

CARGOS FIJOS

a) Depreciación	$D = (Va - Vr) / Ve$	\$	39 82
b) Inversión	$I = i * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	47 78
c) Seguros	$S = s * (Va + Vr) / 2 * Ha$	\$	8 96
d) Mantenimiento	$M = Q * D$	\$	23 89
TOTAL DE CARGOS FIJOS:		\$	120 45

CONSUMOS

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Electricidad	KWH	16 00	0 5022	\$ 8 04
TOTAL DE CONSUMOS:				\$ 8 04

OPERACIÓN

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Operador de maquinaria pesada	jor	0 125	166.75	\$ 20.84
TOTAL DE OPERACIÓN:				\$ 20 84

COSTO HORARIO:	\$ 149.33
-----------------------	------------------

Para la obtención de estos costos horarios se tomaron cuenta los siguientes aspectos:

- ❑ Algunos datos aquí presentados fueron obtenidos del “Catalogo de costos horarios de maquinaria 2001” publicado por Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
- ❑ Los procedimientos para los cálculos se basaron en la publicación anterior y en el libro publicado anualmente “La Determinación del precio en la Obra Privada y Publica” de Carlos Suárez Salazar en su novena edición.
- ❑ Como referencia para la maquinaria utilizada en la industria de la construcción se utilizó “Maquinaria para la Construcción” de David A Day publicada en 1978 por editorial Limusa
- ❑ El precio y datos de la criba y molino fueron proporcionados por la compañía Hazemag, S.A de C V en comunicación personal vía correo electrónico.
- ❑ El precio por tonelada de escoria se basan en los datos mostrados en la tabla 6.2.5-1 con los cuales se realizó una proyección para el obtener el dato del año 2001.
- ❑ El costo del cemento es en base a los precios proporcionados en la pagina de Internet de la Secretaría de Desarrollo Social en su apartado de sistema nacional de información de precios (<http://www.sedesol.gob.mx/snip/snip.htm>).
- ❑ El costo del agua es el reportado oficialmente por el Departamento de Distrito Federal para el uso de agua industrial.
- ❑ El costo de la energía eléctrica para uso industrial está basado en los precios promedio publicados por la Secretaría de Energía en el sitio de Internet <http://www.energia.gob.mx/estadisti/electricidad/preciosmedios.htm>.
- ❑ El precio de la prensa hidráulica y el método de producción fue proporcionado por la compañía Hyperbrick s.l. en comunicación personal con el gerente general Michel Bride.
- ❑ Los salarios están basados en los tabulados por la Comisión Nacional de Salarios Mínimos para este año.
- ❑ Debido a que esto no es una evaluación de proyecto, no se analizan a detalle todos los gastos involucrados en este tipo de instalaciones, sino únicamente los aspectos más importantes como lo son la materia prima y la maquinaria.

Para obtener el costo horario total se suman cada unos de los costos horarios individuales:

CONCEPTO	COSTO HORARIO
Materia prima y preparación de la mezcla	\$ 504.92
Molino de martillos	\$ 58.39
Criba vibratoria	\$ 35.98
Revolvedora	\$ 60.61
Prensa hidráulica	\$ 149.33
Subtotal	\$ 809.23
Errores u omisiones (10%)	\$ 80.92
Total	\$ 890.15

El costo total obtenido significa que se requieren \$890.15 por cada hora de producción, para obtener el costo por cada ladrillo se divide esta cantidad entre el número de ladrillos producidos por hora, es decir, 900, por lo tanto

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\$890.15 / \text{hora}}{900 \text{ ladrillos} / \text{hora}} = \$0.98906 / \text{ladrillo}$$

Ahora este costo de producción se compara con los precios de venta de materiales similares en la siguiente tabla:

Material	Precio por unidad
Ladrillo natural (2x12x24 cm)	\$ 0.78
Tabicón pesado (12x7x24 cm)	\$ 0.83
Tabique perforado (20x10x10 cm)	\$ 7.72
Block (10x10x20 cm)	\$ 2.17
Block de concreto (10x20x40 cm)	\$ 4.09
Block hueco (12x20x40 cm)	\$ 4.38
Ladrillo de escoria (24 x 11.5 x 5.2 cm)*	\$ 0.99

*Costo de producción. Fuente: www.costonet.com.mx

Se puede observar que el costo de producción sin ganancia adicional parece razonable en comparación con otros productos similares, sin embargo, para que este tipo de aplicación sea atractivo a la iniciativa privada deberá agregarse un costo de ganancia para ser rentable su producción, aunque en un momento dado como incentivo para el aprovechamiento de este tipo de residuos puede darse un subsidio por parte del gobierno en una etapa inicial, esto queda como una reflexión al respecto.

7. CONCLUSIÓN.

Durante la presente investigación se llevaron a cabo las actividades pertinentes para el cumplimiento tanto del objetivo general como de los diferentes objetivos específicos y de ellos se desprenden las siguientes reflexiones:

- Si bien la información se recabo en diferentes fuentes, la mayoría provienen de referencias internacionales, ya que en México en los medios consultados existe muy poca información al respecto, en las diferentes asociaciones, cámaras y oficinas gubernamentales donde se solicitó información mostraron poca disposición debido en algunos casos a su desconocimiento del tema en otros no hubo interés en colaborar y hubo situaciones en donde la información era confidencial y únicamente se proporciona a socios, por lo que sobra decir que la investigación en muchos aspectos se baso en experiencias de otros países.
- Como se pudo observar en el documento la escoria siderúrgica cumple una función primordial en la obtención de hierro fundido y de acero crudo, ya que es el medio por donde se incorporan las impurezas del mineral y los retiene de modo que no se recombinen, por lo tanto la escoria es parte indispensable en los actuales procesos masivos de producción siderúrgica, esto significa que la escoria es un subproducto residual que en las condiciones presentes no se puede evitar su generación, y que aunque en las últimas décadas se han producido nuevas tecnologías que han optimado los procesos de fundición y resultado de ello ha sido que cada vez se generan menos escorias sin detrimento de la calidad del producto. Se considera que en los próximos quince a veinte años los proceso actuales de fundición de hierro permanecerán como los mayores productores siderúrgicos, empero con mayores rendimientos y menor generación de escoria, aunque otras tecnologías que actualmente se están investigando o de recién aplicación poco aportarán mayor volumen de producción al mercado internacional y subsecuentemente sustituirán a los sistemas presentes de producción.
- La legislación respecto a las escorias siderúrgicas en México es nula no existe ningún control al respecto, las autoridades del ramo ambiental al no considerar a este tipo de escoria como un residuo peligroso no ejerce ningún tipo de restricción, es más, como autoridades encargadas de regular los aspectos ambientales no exigen de manera obligatoria que la industria siderúrgica les reporte la cantidad de escoria que producen y mucho menos que es lo que hacen con ella, ésto es en parte la razón

por la que en México no se tengan datos que muestren la situación de estos residuos industriales generados en grandes volúmenes.

- Es por eso que parte del objetivo de la presente investigación fue obtener balances típicos de los procesos siderúrgicos y a partir de esto realizarse una estimación de las escorias que se generan en México, sin embargo estos datos se deben tomar con reserva, la función que cumplió esta actividad es tener una referencia sobre la magnitud del problema que implica producir grandes volúmenes de este subproducto y tener que disponerse de alguna forma con el menor impacto posible al ambiente.
- Al presentar en este trabajo las alternativas más importantes que en la actualidad existen sobre la aplicación de la escoria en otras actividades o procesos, se realizó de manera general, no se pretendió en ningún momento analizar con profundidad cada uno, ya que en la mayoría de los casos que se presentaron es posible dedicarles una investigación completa que implique actividades de campo y laboratorio, en muchos casos estas aplicaciones están en actual investigación y se requiere de mayores conocimientos al respecto para saber si es viable su uso a gran escala, lo que implicaría en un momento la colaboración de un grupo interdisciplinario.
- La investigación llevada a cabo está justificada desde el punto de vista ambiental ya que por los volúmenes generados, estos residuos se pueden considerar como peligrosos y el demostrar que las escorias siderúrgicas a pesar de ser un material residual que a simple vista parece ser carente de utilidad, es posible su aprovechamiento y con ello no sólo resolver el problema de su disposición, sino que en las mismas aplicaciones presentadas se obtienen beneficios ambientales; un caso específico es la manufactura de cemento, donde de acuerdo a la información recabada, al utilizar escoria habrá una reducción significativa de las emisiones de dióxido de carbono, así se reducirá el deterioro del ecosistema al dejarse de explotar nuevos bancos de materiales obteniéndose cemento sin menos cabo de su calidad.
- Es necesario que en México se conozcan todas las posibilidades para el uso de las escorias provenientes de la industria siderúrgica, ya que aún cuando algunas de estas opciones tienen mucho tiempo de ser utilizadas en otros países, en México es muy poca la cantidad de escoria que se recicla y/o reutiliza, un ejemplo claro de esto es Altos Hornos de México que al ser mayor la productora de hierro fundido y acero en México generan la mayor cantidad de escorias y únicamente comercializa el veinte por ciento de las escorias generadas, principalmente debido esto a la

ubicación geográfica de la siderúrgica, según me informo en comunicación personal un ejecutivo de la empresa. Sin embargo existen conversaciones entre cementos Apasco y Grupo Acerero del Norte para llegar a un convenio y producir cemento a gran escala sobre la base del aprovechamiento de la escoria por la segunda.

- El problema más serio en el aprovechamiento de la escoria en México y en el Mundo en general es por un lado los costos de transporte hasta las zonas de demanda y por otro lado el desconocimiento de su aplicación en otros procesos o actividades. Como pudo verse en el análisis de costo en la alternativa de elaboración de ladrillos a partir de la escoria, su costo de producción se observa hasta cierto grado competitivo con respecto a otros productos similares, si el margen de ganancia es estrecho, cabe reflexionar que si se toma en cuenta la contribución ambiental que su uso puede tener, el partir con un subsidio de arranque es posible considerarlo, aunque un estudio económico más detallado es necesario.
- Finalmente es importante tener presente la reutilización y/o reciclado de cualquier residuo o subproducto que se genere dentro de cualquier proceso productivo, de tal forma que se evite desecharlo al ambiente; es una realidad confirmada que todo centro industrial o fábrica que se considere moderna y progresista tiene el deber y la necesidad de integrarse, de la manera menos traumática posible dentro del entorno ambiental y dentro de la comunidad en la que opera, haciendo todo lo que pueda, poniendo el máximo esfuerzo para mejorar la situación ambiental, máxime si se está conciente que toda decisión que se tome ahora repercutirá indudablemente en el bienestar de las generaciones venideras.

8. GLOSARIO

- Adsorción.** Fenómeno de adhesión de los átomos o moléculas de una sustancia (adsorbato) a la superficie de otra (adsorbente). Si la interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente se debe sólo a las fuerzas de van der Waals, se trata de adsorción física, pero si las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, entonces es una adsorción química.
- Agregado.** Son grava y arena que se extraen de las canteras y se usan para dar al concreto premezclado el volumen necesario e incrementar su resistencia. Bajo circunstancias normales, un metro cúbico de concreto fresco contiene dos toneladas de grava y arena.
- Aleación.** Mezcla sólida o líquida de un metal con otro u otros metales o elementos no metálicos producida por fusión conjunta o por aglutinación. Las propiedades de las aleaciones son a menudo muy diferentes de los componentes; conservan las características de los metales (brillo, conductividad, etc.) y aumentan su resistencia mecánica. Aleaciones fusibles son las que funden entre 130 y 60° C. Son normalmente mezclas de bismuto, plomo y estaño. Se emplean para soldar y en dispositivos de seguridad en calderas, extintores, etc. Aleaciones ligeras son las que tienen como característica fundamental su poco peso. Suelen ser de aluminio, y se utilizan en la construcción de aviones, vagones de ferrocarril, etc. Aleaciones magnéticas son las de alta permeabilidad magnética para baja intensidad de campo. Se usan en la construcción de aparatos de medida.
- Alto Horno.** Horno de unos 25 m de altura revestido interiormente de material refractario y con forma de dos troncos de cono unidos por sus bases mayores, por cuya parte inferior se inyecta aire a presión, se alimenta por la parte superior en la entrada del cono, llamado tragante, conformado por tres partes más de arriba hacia abajo cuba, vientre, atalajes (parte más caliente) y crisol; es utilizado en producción de hierro o arrabio.
- Angulo de Fricción Interna.** Término usado con referencia a suelos granulares sin cohesión, tales como la arena. El símbolo para este ángulo es ϕ : para arena limpia es aproximadamente igual al ángulo de reposo.
- Angulo de Reposo.** El ángulo de reposo de un material granular. Es el ángulo de mayor inclinación con la horizontal a la cual una pila amontonada de este material estando en condiciones estables.
- Arcilla.** Tierra natural relativamente suave que, por su abundante cantidad de silicatos, es la segunda materia prima en importancia para la elaboración del cemento.
- Arrabio.** Aleación de hierro con más de 2% de carbono y otras impurezas que sale del alto horno.

Blaine. Parámetro que define la finura del cemento en términos de cm^2 por cada gramo de ese material. Ejemplo: un blaine de $3000 \text{ cm}^2 / \text{gr}$ significa que la suma de las superficies de todas las partículas de un gramo de esta muestra pueden cubrir un área de 0.30 m^2 .

Bronce. Término genérico que designa una extensa serie de aleaciones que tiene como base el cobre y el estaño. Suele contener cantidades variables de otros elementos, como fósforo, plomo y cinc, que se añaden a la aleación bimetálica base para mejorar sus propiedades mecánicas. Tiene numerosas aplicaciones industriales: grifería, muelles, cojinetes, instrumentos de precisión, campanas, etc.

Cal libre. Compuesto químico (CaO) que normalmente se encuentra en baja proporción en el clínquer. En concentraciones mayores, superiores probablemente a un 2%, puede ser peligrosa porque provoca expansiones en el concreto ya endurecido.

Calcinación. Proceso al que se somete a la materia prima del cemento exponiéndola a temperaturas de hasta $1,400$ grados centígrados de donde se obtiene el material al que se denomina clínquer.

Caliza. Piedra dura, muy abundante en la naturaleza, rica en calcio. Es la materia prima más importante para la fabricación del cemento.

Calor de hidratación. Es el calor liberado de las reacciones que producen el endurecimiento del cemento portland, por su reacción con el agua.

Carbonitruración. Operación metalúrgica consistente en aumentar el contenido en carbono y nitrógeno de las capas superficiales de un acero.

Cementación. Proceso de transformación del hierro en acero calentando el primer recubierto con carbón. También se aplica este término a la formación de aleaciones por un proceso análogo en el que el metal base se calienta recubierto de polvo del otro metal.

Cementante. Cualquier producto que tenga la capacidad de unir piezas entre si mismas, por ejemplo, el cemento portland, el asfalto, las resinas, etc.

Cementita. Carburo de hierro, Fe_3C , que forma parte de la estructura del acero.

Cemento de bajo álcali. Cemento cuyo contenido de álcalis (óxidos de sodio y potasio), no sobrepasan un 0.6% expresados como Na_2O . Este cemento debe usarse cuando los agregados para el concreto: arena y grava, sean potencialmente reactivos con los álcalis del cemento, causando el deterioro de la obra.

Cemento blanco. Es un cemento portland de alta calidad que difiere del cemento gris exclusivamente por su color. Es fabricado con materias primas de alta calidad que contengan cantidades mínimas de óxido de hierro y manganeso, sustancias que dan el color al cemento gris.

Cemento de albañilería. Cementante hidráulico, muy trabajable, que se usa para pegar tabiques, ladrillo y rocas entre sí, para revestimientos, aplanados, etc.

Cemento de escoria de alto horno. Cementante hidráulico, elaborado con cemento portland y escoria de alto horno, diseñado para obras donde se requiera una alta resistencia a agresiones químicas empleándose además en las construcciones de concreto en general.

Cemento hidráulico. Cualquier cemento, que fragua y se endurece con agua debido a la reacción química entre el agua y el cemento.

Cemento para pozos petroleros. Cementante hidráulico que se produce con clínquer portland y es empleado para elaborar pozos petroleros, generalmente tiene un fraguado lento y debe ser manejable a temperaturas y presiones elevadas. Se produce en las clases de la a hasta h y j. Cada clase es aplicable a cierto rango de profundidad, agresión química o presión.

Cemento portland. Es un agente aglutinante hidráulico con una composición por peso de no menos de 95% de clínquer y de cero a cinco por ciento de un componente menor (generalmente sulfato de calcio). Puede fraguar y endurecer bajo el agua y, al mezclarse con agregados y agua, produce concreto o mortero.

Cemento puzolánico. Se denomina así a un cemento portland al cual se le ha agregado un material activo (puzolana) que contribuye a aumentar las resistencias mecánicas tardías, así como la resistencia a ataques químicos.

Cemento volantes (fly ash). Puzolana artificial, similar al polvo de cemento, subproducto de la combustión de carbón en polvo, en las plantas generadoras de electricidad.

Clínquer. Es un producto intermedio en el proceso de elaboración de cemento. La piedra caliza, la arcilla y el óxido de hierro se calcinan en un horno a 1,450 grados centígrados para producir el clínquer.

Crisol. Vaso hecho con materias refractarias o metales de elevado punto de fusión y que se emplea para fundir alguna materia a temperatura muy alta. Parte inferior de los hornos de fundición en que se acumula el metal fundido.

Ductibilidad. Capacidad de un material para ser deformado plásticamente sin presentar fracturas. Usualmente se expresa como el porcentaje máximo de elongación que alcanza una barra del material al ser estirado.

Dureza. Capacidad de un material para resistir a las ralladuras o las muescas. La dureza de un material se mide haciendo incidir sobre su superficie una punta de diamante y es proporcional a la carga sobre el diamante e inversamente proporcional al tamaño de la huella que resulta en la superficie.

Electrodeposición. Producción de una fina capa de metal sobre otro por electrólisis.

- Electrometalurgia.** Conjunto de procedimientos eléctricos utilizados en la obtención y afino de metales. Sus ramas más importantes son la electrometalurgia por fusión, en la que se utiliza el calor eléctrico como fuente térmica, y la electrometalurgia por electrólisis, para provocar fenómenos de descomposición.
- Escoria.** Sustancia que sobrenada en el crisol de fundir metales, formada por las impurezas. La escoria de alto horno tiene una composición media de 40% de CaO, 35 % de SiO₂ y 15% del Al₂O₃, con menores cantidades de MgO, MnO, FeO, CaS; las cantidades que se producen son enormes y, a pesar de emplearse en la preparación de cemento de alto horno, en firmes de carreteras y ferrocarril y otras aplicaciones, queda una gran cantidad sin poder ser utilizada. La escoria metálica es la materia que a los martillazos suelta el metal candente sacado del fuego.
- Ferrita.** Componente del acero que contiene más del 99.95% de hierro y muy poco carbono. Su red cristalina es cúbica centrada en el cuerpo, existen cuatro formas alotrópicas: la α -ferrita, estable por debajo de 768 °C, con propiedades magnéticas; la β -ferrita, estable hasta los 898 °C; la γ -ferrita, que aparece a 1400 °C y funde a 1530 °C.
- Finura de cemento.** Tamaño de las partículas del cemento, las cuales pueden ser desde 60 hasta 1 micra (micra = milésimo de milímetro). Normalmente se define como el por ciento de finura al porcentaje del material que puede pasar a través de un tamiz.
- Forja.** Serie de operaciones para moldear los metales maleables, especialmente el hierro, trabajándolos en caliente por medio de golpes o presión.
- Fundiciones.** Aleaciones de hierro que contiene de 1,8 a 4,5 % de carbono; suele contener azufre (0,1 a 0,2 %), silicio (0,5 a 3 %) y fósforo (1 %). No puede moldearse por forjado, laminado o prensado. Conocidas también como hierros colados.
- Granos.** Cristales con que se estructuran internamente los metales y los cerámicos. En cada grano los átomos están arreglados con la red cristalina en una sola orientación.
- Hidrometalurgia.** Parte de la metalurgia que trata del conjunto de procedimientos que emplean reacciones químicas en solución acuosa para la extracción de metales a partir de menas y concentrados.
- Hierro dulce.** Hierro maleable que contiene menos del 1% de carbono, que se ha producido a partir de una condición pastosa, sin subsiguiente fusión y que retiene una gran cantidad de escorias. Se usa en la fabricación de piezas que han de resistir la tracción, y para los núcleos de electroimanes, se suelda con gran facilidad.
- Hierro esponja.** Hierro casi completamente puro con estructura sumamente porosa. Del cual se obtiene el hierro forjado

Hierro fundido. Producto que se obtiene directamente en el alto horno al beneficiar los minerales ferrosos.

Hierro galvanizado. Hierro recubierto de cinc, para evitar la corrosión.

Horno para producción de cemento. Cilindro de placa de acero, en posición semi horizontal, con un diámetro aproximado de 4.5 metros y 60 a 100 metros de longitud en donde se calcina la materia prima para la elaboración del cemento someténdola a altas temperaturas.

Humedales. Es la aplicación al terreno del agua residual lo que implica el uso de las plantas, de la superficie y de la matriz del suelo para el tratamiento de aquella.

Losas de concreto hidráulico para pavimentos. Son las que se construyen de concreto hidráulico, con o sin acero, cuya función es soportar y transmitir las cargas que actúan sobre ellas.

Mata. Mezcla de sulfuros metálicos, que se obtiene en la metalurgia de las menas sulfuradas. La mata de cobre es una mezcla compleja de sulfuros cuprosos y ferrosos, que varía desde el 15 al 60 % de cobre y con puntos de fusión de 850 °C y 1025 °C, respectivamente.

Maleable. Se aplica a los metales que pueden batirse y extenderse en planchas o láminas muy finas.

Martensita. Red cristalina del acero templado, donde el contenido de carbono es alto y los átomos de carbono ocupan posiciones que producen una distorsión elástica.

Materiales o mezclas asfálticas. Materiales bituminosos con propiedades aglutinantes, sólidos, semisólidos o líquidos, que se utilizan en las estabilizaciones, en riegos de impregnación, de liga y de sello, en construcción de carpetas y en la elaboración de mezclas y morteros.

Materiales para la construcción de sub-bases y bases. Materiales pétreos seleccionados por sus características físicas para emplearse en la construcción de sub-bases y bases.

Mena. Materia bruta de un mineral o depósito que por sus propiedades o valor comercial se explota para beneficiar cierto elemento.

Metalografía. Ciencia que trata del estudio de la estructura de los metales y aleaciones mediante la utilización del microscopio.

Metalurgia. Ciencia aplicada que trata de la producción y elaboración industrial de metales a partir de sus menas minerales. En los procesos metalúrgicos se pueden distinguir dos fases perfectamente diferenciadas: la extracción (metalurgia extractiva) y el tratamiento físico (metalurgia física). La primera fase comprende, además de la meramente extractiva, el análisis, la preparación y la separación de los metales a partir del mineral en bruto. Las diversas maneras de efectuar esta última operación dan lugar a la

pirometalurgia (fusión o calcinación), a la hidrometalurgia (en la recuperación o afino) y a la electrometalurgia (basándose en hornos eléctricos, o por electrólisis en seco o de soluciones de sales metálicas) también incluye el refinado. La segunda fase comprende la fusión (a partir de lingotes), la colada (en los moldes correspondientes), los tratamientos térmicos y superficiales (laminado, forja, estirado, etc.) y la soldadura (de distintas partes). Estos tratamientos no sólo se realizan sobre metales puros, férricos y no férricos, sino también sobre aleaciones. Asimismo entra dentro de la metalurgia el estudio de las estructuras, la constitución de las aleaciones y sus características magnéticas, eléctricas y mecánicas.

Molino. Equipo cilíndrico, giratorio, de acero en cuyo interior se aloja una carga de bolas metálicas de diferentes diámetros que muelen las materias primas, ya dosificadas.

Nitruración. Procedimiento utilizado para endurecer superficialmente los aceros aleados mediante la formación de una capa dura de nitruros metálicos por calentamiento de los metales en atmósferas de nitrógeno.

Pajote. Estera de cañas y paja con que se cubren ciertas plantas los agricultores.

Perlita. Componente de la estructura de los aceros formado por laminillas alternadas de ferrita y de cementita.

Puzolana. Material natural o artificial amorfo, silicoso, capaz de reaccionar con la cal que libera el cemento durante su hidratación para mejorar las propiedades del concreto. La puzolana más popular es la piedra poma.

Razón de Soporte (o apoyo) California. Una prueba en la cual se mide la carga requerida para empujar un embolo circular a una tasa estándar dentro del suelo. La carga es expresada como una razón de porcentaje con relación a una carga estándar. Está prueba es utilizada para el diseño del pavimento de carreteras y pistas de aterrizaje.

Revenido. Tratamiento térmico que se da a las aleaciones para eliminar la fragilidad que han adquirido al ser templadas.

Revestimiento. Capa de materiales seleccionados que se tienden sobre las terracerías de una obra vial o aeropista, a fin de servir como superficie de rodamiento.

Resistencia. Capacidad de los materiales para soportar esfuerzo. Se determina cuantificando la fuerza máxima por unidad de área de sección que resiste un material antes de romperse.

Siderurgia. Conjunto de técnicas que estudian la producción y transformación industrial del hierro.

Sinterización. Procedimiento que consiste en calentar un material pulverulento a temperaturas próximas a la fusión, con lo que se obtiene un reblandecimiento de la superficie de los granos y la unión de estos en un material sólido y poroso sin haber pasado por el estado líquido. Es un

Tamiz. Instrumento similar a una coladera, que se usa para separar las partículas gruesas de las finas, que integran un conjunto o una mezcla.

Temple. Endurecimiento del acero normalmente se obtiene calentándolo al rojo vivo (alrededor de 800 °C) y después enfriándolo súbitamente por inmersión en un líquido.

Templado superficial. Operación en la que el hierro dulce se calienta recubriéndolo de carbón, con lo que se forma una capa superficial de acero.

Tenacidad. Capacidad de un acero para absorber energía de golpes o deformación. Generalmente se mide cuantificando el trabajo necesario para deformarlo hasta provocar su fractura y dividiéndolo entre el volumen del material deformado.

Yeso. Piedra natural, muy suave, de color blanco y rica en sulfatos de calcio que, en pequeña proporción, se adiciona en la fabricación del cemento. Actúa como retardador del fraguado.

9. BIBLIOGRAFÍA

- AGUDELO, Jorge H., et. al. *Evaluación de las escorias de horno cuchara (HC) de Simesa como correctoras de acidez*, Revista Facultad de Ingeniería No. 20, Universidad de Antioquia, Colombia, Junio de 2000, pp. 79-85.
- AGYEI, N. M. et. al. *An investigation of phosphate ion adsorption from aqueous solution by flay ash and slag*, Cement and Concrete Research, No. 30, 2000, pp. 823-826.
- Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Construction, Volume 04.01, Cement, Lime, Gypsum, USA, 1991, pp. 166, 167, 290-294.
- APRAIZ, José. *Aceros Especiales y otras Aleaciones*, 6ª ed., Editorial Dossat S.A., Madrid, 1982, pp. 3,4.
- BARCELO, José R. *Diccionario Terminológico de Química*, 2ª ed., Ed. Alhambra, sin año, varias paginas.
- BARRERE, Martine. *La tierra patrimonio común*, Ed. Paidós, España, 1992, pp. 61-73, 129-151, 221-235.
- BLANKS, Robert F.; KENNEDY, Henry L. *The Technology of Cement and Concret*, John Wiley & Sons, N.Y., 1955, pp. 3, 13, 18, 22, 23, 28, 36, 99, 100, 104-146.
- BEGEMAN, Myron L.; AMSTEAD, B. H. *Procesos de Fabricación*, Editorial CECSA, México, 1969, pp. 12-17, 21-25, 30-33, 37-40.
- BOND, Richard G.; STRAUB, Conrad P. *Handbook of Environmental Control*, Volume II, Solid Waste, CRC Press, USA, 1973, pp. 3, 4, 5.
- BRANDT, A. M. *Composites Materials, Properties and Performance*, E & FN Spon, USA, 1995, pp. 55-61.
- CASTELLAN, Gilbert W., *Físicoquímica*, 2ª ed., Addison-Wesley Iberoamericana, Estados Unidos, 1987, p. 454.
- Catalogo de Costos Horarios de Maquinaria 2001*, CMIC, México, pp. 5-35, 94, 116.
- CEMBUREAU, The European Cement Association. *Association Alternative Fuels in Cement Manufacture Technical and Environmental Review*, Bélgica, 1997, pp. 5-28.
- CEMBUREAU, The European Cement Association. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Bélgica, 1999, pp.15-60.
- Code Federal Regulations 40, Protection of Environmental*, United States Environmental Protection Agency, USA, July, 1991.
- COTTRELL, Ala. *An Introduction to Metallurgy*, 2ª

- COTTRELL, Ala. *An Introduction to Metallurgy*, 2^a edición, Ed. Edward Arnold, Gran Bretaña, 1975, pp. 1-3.
- DAY, David A. *Maquinaria para la Construcción*, Ed. Limusa, México 1978, pp. 35-67, 479-512.
- DIMITROVA, S. V.; MEHANJIEV, D. R. *Lead removal from aqueous solutions by granulated blast-furnace slag*, Water Research, Vol. 32, No. 11, 1998, pp. 3289-3292.
- DIMITROVA, S. V.; MEHANJIEV, D. R. *Interaction of blast-furnace slag with heavy metal ions in water solutions*, Water Research, Vol. 34, No. 6, 2000, pp. 1957-1961.
- Enciclopedia Multimedia Salvat*, CD Rom, Editorial Salvat Editores S.A., 1999, Estados Unidos.
- Encyclopedia Americana*, Volumen 18, Estados Unidos, 1963, p. 699.
- Encyclopedia Encarta, 1999*; CD Rom, Editorial Microsoft, Estados Unidos.
- EPA. *Waste Minimization Opporturtunty Assessment Manual*, Government Institutes, USA, 1992, pp. 1-5, 16, 17.
- FREEMAN, Harry. *Hazardous Waste Minimization*, Mc Graw-Hill, USA, 1990, pp. 3, 4, 5, 16, 17, 19, 21, 25-27, 30-32.
- FRIER, W.T. "*Elementary Metallurgy*", Mc Graw-Hill, USA, 1952, pp.4 y 5.
- FU, Xinghua; *et. al. Studies on Portland cement with large amount of slag*, Cement and Concrete Research, Vol. 30 (2000), pp. 645-649.
- GILCHRIST, J.D., *Extraction Metallurgy*, 3^a ed., Editorial Pergam Press, Gran Bretaña, 1989, pp. 89-93, 93-98, 257, 300-303, 342-348.
- GILPIN, Alan. *Dictionary of Environmental and Sustainable Development*, John Wiley & Sons, USA, 1996.
- HAMMOND, Rolt. *Concise encyclopaedia dictionary of civil engineering*, Ed. Elsevier Publishing Company, Gran Bretaña, 1968, pp. 8, 34.
- HENRY, J. Glynn; HEINKE, Gary. *Ingeniería Ambiental*, 2^aed., Ed. Prentice-Hall, México, 1999, pp. 25-45.
- HIGGINS, R.A. *Engineering Metallurgy*, 5^a ed., Ed. Edward Arnold, Gran Bretaña, 1983, pp. 144-164.
- JACKSON, A. *Fabricación de Acero al Oxígeno*, Editorial URMO S.A., España, 1981, pp. 11, 12, 14, 15, 91, 110, 111.
- JAU, W.C. and TSAY, D.S. *A Study of the Basic Engineering Properties of Slag Cement Concrete and its Resistance to*

- Seawater Corrosion*, Cement and Concrete Research Vol. 28 (1998), No. 10, pp. 1363-1371.
- JOHANSSON, Lena. *Blast furnace slag as phosphorus sorbent-column studies*, the Science of the Total Environment, No. 229, 1999, pp. 89-97.
- JOHANSSON, Lena; GUSTAFSSON Petter. *Phosphate removal using blast furnace slags and opoka –mechanism*, Water Research, Vol. 34, No. 1, 2000, pp. 259-265.
- KUDIN, V.A. *Metallurgia del Acero*, Editorial Mir, Moscú, 1984, pp. 60-63, 71-74.
- LEROY, Jean-Bernard. *Los Desechos y su Tratamiento*, Fondo de Cultura Económica, México, 1981, pp. 8-11, 62-66.
- LEA, F.M. *The Chemical of Cement and Concrete*, Chemical Publishing Company, 3^a ed., USA, 1971, pp. 1-10, 12-14.
- LI, Dongxue; et. al. *Durability Study of Steel Slag Cement*, Cement and Concrete Research, Vol. 27 (1997), No. 7, pp. 983-987.
- LOSANA, Luigi; MORERA, J. M. *Metallurgia*, Ed. Manuel Marín, Barcelona, 1951, pp. 111-151, 265-276, 302-306, 323-344.
- LUXAN, M. P., et. al. *Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace*, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 517-519.
- Manual de minimización, tratamiento y disposición. Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro de la fundición*. Comisión Ambiental Metropolitana. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Diciembre de 1996.
- MARTÍNEZ Gómez, Lorenzo. *Acero*, Editorial Fondo de Cultura Económica, SEP, CONACYT, 1989, México, pp. 20-24, 26-35, 42, 46-67, 68-76, 105 y 106.
- MCLEAN, Va. *Structural Clay Products Institute*, Estados Unidos, 1969.
- Metals Handbook*, Volumen 1, 8^a. ed, Estados Unidos, 1975, p. 43.
- METCALF & EDDY, *Ingeniería Sanitaria*, 2^a ed., Ed. Labor S.A., México, pp. 832-850.
- MONSHI, Ahmad and ASGARANI, Masaud K. *Producing Portland Cement from Iron and Steel Slags and Limestone*, Cement and Concrete Research Vol. 29 (1999), pp. 1373-1377.
- MORRAL, F. R.; JIMENO, E.; MOLERA, P. *Metallurgia General*, Tomo I, Ed. Reverté, España, 1982, pp. 1-17, 73-77, 181-206, 210, 215, 219-225, 247-253, 260, 270.

- MURARKA, Ishwar P. *Solid Waste Disposal and Reuse in the United States*, Volume I, CRC Press, USA, 1987, p. 3.
- National Slag Association, "Slag: The Material of Choice" (folleto proporcionado en el 2000), USA, sin paginas.
- PINTO, M. et. al. *Effects of Linz-Donawitz (LD) slag on soil properties and pasture production in the Basque country (Northern Spain)*, New Zealand Journal of Agricultural Research Vol. 38, 1995, pp. 143-155.
- Preceptor Multimedia*, Volumen 3, Ed. Oceano, España, 2000, pp. 535-566.
- Producción más limpia en el sector de la fundición. Guías de producción más limpia*, IPN, ONUDI, PNUMA, CONACINTRA; USAID, 1998, pp. 17-21.
- RCRA: *Reducing Risk From Waste*, United States Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response, 1997, pp. 2-27.
- ROSTIK, F. Libor. *Zero Waste Electric Arc Furnace (Eaf) Steelmaking Chaparral Steel Company Target*, EPA Region III Waste Minimization/Pollution Prevention, USA, 1996, pp. 466-473.
- SAKAVEDAN, K; BAVOR, H. J. *Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems*, Water Research Vol. 32, No. 2, 1998, pp. 393-399.
- SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes), *Normas para Construcción e Instalaciones, Carreteras y Aeropistas, Pavimentos*, Titulo 3.01.03, México, 1983, pp. 9, 21, 33, 65, 149.
- SUAREZ Salazar, Carlos. *La Determinación del Precio en la Obra Privada y Publica*, Ed. Limusa, México, 1997, pp. 25, 31, 34, 103-125.
- SWAMY, R.N. *Cement Replacement Materials*, Volume 3, Surrey University Press, USA, 1986, pp. 73-98.
- TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*, Academic Press, Gran Bretaña, 1990, pp. 1-4, 60, 62-72, 77, 84, 276-290.
- TCHOBANOGLIOUS, George; THEISEN, Hilary; VIGIL, Samuel A. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Volumen I, Mc Graw-Hill, España, 1994, p. 6.
- The Bussines Council for Sustainable Development-Gulf of Mexico. By-product Synergy: A Strategy for Sustainable Development*, USA, April 1997, pp. 1-7.

- The Foundry Industry Code of Practice*, Department of Employment, Training and Industrial Relations, Australia, 1999, pp. 51-53.
- The New Encyclopaedia Britannica*, volumen 8, Estados Unidos, p. 59.
- TÜFEKCI, M. et. al. *Evaluation of Steel Furnace Slags as Cement Additives*, Cement and Concrete Research, Vol. 27 (1997), No. 11, pp. 1713-1717.
- US Department of Energy, *Energy and Environmental Profile of the US Steel Industry*, August 2000, pp. 27-70.
- USEPA Office of Compliance Sector Notebook Project, *Profile of the Iron and Steel Industry*, September 1995, pp. 13-25.
- United States Geological Survey. *Materials, Report of the Interagency Working Group on Industrial Ecology, Material and Energy Flows*, USA, March 1996, pp. 7-28.
- United States Geological Survey. *Materials and Energy Flows in the Earth Science Century*, USA, November 1998, pp. III, 4, 8, 11, 13, 18, 21, 23, 24, 25, 31, 32, 34, 48 y 57.
- United States Geological Survey, *Mineral Commodity, Summaries 2001*, U.S. Department of the Interior, 2001, pp. 82-89.
- Van ARSDALE, George D. *Hidrometalurgia de Metales Comunes*, Editorial UTEHA, México, 1965, pp. 1,2,11, 31-33, 75, 108, 110-115.
- Van GREEN, Martha. *The Portland Cement Association*, en comunicación personal, ella trabaja en el laboratorio de tecnología de construcción e ingeniería del mencionado instituto, 2000.
- Van OSS, Hendryk. *Cement, U.S. Geological Survey*, USA, 1998, pp. 16.1-16.5.
- VEL, Alfonso del. *El libro del reciclaje*, Ed. Integral, 1993, pp. 7, 8, 10-18.
- VOSKOBOINIKOV, V.G.; KUDRIN, V.A.; YAKUSHEV, A. M. *Metalurgia General*, Editorial Mir, Moscú, 1982, pp. 26-30, 35-49, 51-53, 70-72, 78-86, 92-97, 116-119.
- WHITTEN, K. W.; GAILEY, K. D.; DAVIS, R. E. *Química General*, Ed. Mc Graw-Hill, México, 1992, pp. 7, 653-655.
- WITT, J.C. *Portland Cement Technology*, Chemical Publishing Company, USA, 1966, pp.1-19, 26-32, 60-71.
- 1997 Buy-Recycled Series. Construction Products*, USEPA, USA, November 1997, p. 2

Sitios de Internet consultados:

<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/printable/1/0.5722.119871.00.html>; 15:00. 22/febrero/2001
<http://www.csa.com/routnet/epar/epanote.html>; 11:00. 10/febrero/2001
<http://www.cibermetal.com/metales/clas-aceros.htm>; 16:15 23/febrerp/2001
<http://www.worldsteel.org/>; 16:00 26/febrero/2001
http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_3.html; 14:30 26/febrero/2001
http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_6.html; 14:30 26/febrero/2001
http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_2.html; 14:30 26/febrero/2001
http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_17.html; 14:30 26/febrero/2001
http://www.worldsteel.org/trends_indicators/figures_18.html; 14:30 26/febrero/2001
<http://www.minerals.usgs.gov/>; 15:00 14/febrero/2001
<http://www.secofigm.gob.mx/promocion/estadisticas/produccion/Forma1.asp>; 11:00 10/febrero/2001
<http://www.ilafa.org/index.html>; 16:00 27/febrero/2001
<http://www.mp.tudelft.nl/CV/local/section/gallery/gallery.html>; 14:30 14/marzo/2001
<http://www.viewimages.com/viewimage/?imageid=253418&promotionid=1&partnerid=2&type=results>;
 15:00 14/marzo/2001
http://corbis.altavista.com/referrals/av_image_details.asp?linkid=2623&imageid=10577547; 09:30
 15/marzo/2001
<http://metalonline.com/azovstal/slag.htm>; 09:45 15/marzo/2001
<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/printable/1/0.5722.119871.00.html>; 10:00 15/marzo/2001
<http://www.ilafa.org/index.html>; 09:45 20/marzo/2001
<http://www.semarnap.gob.mx/>; 15:00 06/junio/2001
<http://www.ine.gob.mx/>; 15:30 06/junio/2001
<http://www.oit.doe.gov/mining/materials/flows.html>; 10:00 27/enero/2001
<http://www.britannica.com/bcom/eb/article/0/0.5716.114520+1+108319.00.html>; 9:00 4/mayo/2001
<http://wwwapp.cemex.com.mx:8080/ctcident.nsf/pages/ind-ctec.htm>; 10:30 4/mayo/2001
<http://encarta.msn.com/find/Concise.asp?z=1&pg=2&ti=761560028>; 12:45 9/abril/2001
<http://www.icce.es/icce/ARTICULO15.htm>; 20:00 4/febrero/2001
<http://www.portcement.org> ; 17:00 02/octubre/2000
<http://www.ecotrader.net>; 14:00 13/abril/2001
<http://slaggarden.cfa.cmu.edu/research/content/remediation.html>; 21:00 13/abril/2001
<http://thfrc.gov/hnr20/recycle/waste/>; 11:00 03/marzo/2001
<http://www.epa.gov/cpg/products/cemspecs.htm>; 18:30 9/abril/2001
<http://www.onncce.org.mx/catalogos.html>; 10:00 4/mayo/2001
<http://www.cemexmexico.com/publica/normativas/cemento101.asp>; 10:10 11/mayo/2001
<http://www.slag.com/>; 15:00 15/mayo/2001 última consulta
<http://thfrc.gov/hnr20/recycle/waste/>; 15:00 14/mayo/2001 última consulta
<http://www.cemexmexico.com/publica/includes/referencia/01092.htm>; 16:00 5/junio/2001
<http://www.edwclevy.com/slag/homeslag.htm>; 15:00 29/mayo/2001
<http://www.heckettmultiserv.com>; 15:00 29/mayo/2001

<http://www.ag.ohio-state.edu/~ohioline/b472/fertile.html>; 15:30 29/mayo/2001
<http://www.uog.edu/cals/site/users/soil/soil/fertfct3.html>; 15:30 29/mayo/2001
<http://soils-earth.massey.ac.nz/cysoil/article/slag.htm>; 15:30 29/mayo/2001
<http://www.slaggarden.cfa.cmu.edu>; 16:00 29/mayo/2001 última consulta
http://www.idrc.ca/nayudamma/wall_55e.html; 09:30 06/junio/2001
<http://www.appleby-group.demon.co.uk/>; 10:00 06/junio/2001
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/; 10:30 06/junio/2001
<http://www.costonet.com.mx>; 10:00 21/septiembre/2001
<http://www.recyclingstones.com/>; 12:30 21/septiembre/2001
<http://www.sedesol.gob.mx/snip/snip.htm>; 10:00 22/septiembre/2001
<http://www.energia.gob.mx/estadisti/electricidad/preciosmedios.htm>; 11:00 22/septiembre/2001
<http://www.hyperbrick.com>; 15:00 22/septiembre/2001

<http://www.ag.ohio-state.edu/~ohioline/b472/fertile.html>; 15:30 29/mayo/2001
<http://www.uog.edu/cals/site/users/soil/soil/fertfct3.html>; 15:30 29/mayo/2001
<http://soils-earth.massey.ac.nz/cysoil/article/slag.htm>; 15:30 29/mayo/2001
<http://www.slaggarden.cfa.cmu.edu>; 16:00 29/mayo/2001 última consulta
http://www.idrc.ca/nayudamma/wall_55e.html; 09:30 06/junio/2001
<http://www.appleby-group.demon.co.uk/>; 10:00 06/junio/2001
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/; 10:30 06/junio/2001
<http://www.costonet.com.mx>; 10:00 21/septiembre/2001
<http://www.recyclingstones.com/>; 12:30 21/septiembre/2001
<http://www.sedesol.gob.mx/snip/snip.htm>; 10:00 22/septiembre/2001
<http://www.energia.gob.mx/estadisti/electricidad/preciosmedios.htm>; 11:00 22/septiembre/2001
<http://www.hyperbrick.com>; 15:00 22/septiembre/2001