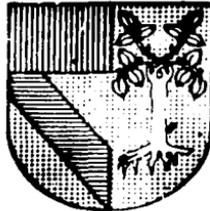


308917

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

10



ANALISIS DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS UTILIZADOS
EN LA CONSTRUCCION DE UN ALTO HORNO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA: INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A :

JUAN ANTONIO GARDUÑO RUVALCABA

REVISOR: ING. ENRIQUE GOMEZ IBARRA

MEXICO, D.F.,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACION

DISCONTINUA

DEDICATORIA.

A la persona que fomentó en mí el hábito del estudio, que me enseñó a asumir la responsabilidad de las acciones, que inculcó en mí la disciplina, la honestidad y las demás virtudes que hacen a un ser humano crecer día a día; a la persona que me enseñó (y me sigue enseñando) más que con palabras con el ejemplo, a la persona que me dio la vida.

Ruth Ma. Ruvalcaba

Gracias Mamá.

Agradecimientos.

A Dios, por estar siempre en mi camino.

A mis hermanos Abraham y Rogelio, por los momentos de juego, de trabajo, de alegrías y de enojos porque de eso está hecha la vida; mis compañeros de mil y un batallas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi Padre José Juan Garduño (q.e.p.d.) por darme el ejemplo de la superación personal y la entrega.

A mi tía Esther por apoyarme en mis años de estudio, por entregar alma y corazón. Por estar en las buenas y en las malas.

A mi tío René por fomentar el inicio de mi carrera en la Universidad Panamericana.

A mi tío Rogelio por enseñarme lo que es el agradecimiento a los padres, a la familia y a Dios.

A mi Hilda por acompañarme en los desvelos y dificultades de este trabajo y alegrar cada uno de esos momentos con su presencia.

A todos ustedes mis amigos de la infancia por estar siempre en el momento oportuno: Pedro, Lalo, Arturo, Marcos, Mauricio, Beto y Toño.

A mis amigos y compañeros de la Universidad Panamericana IME 1996.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | I |
| CAPÍTULO 1. EL ALTO HORNO | 1 |
| 1.1 Desarrollo del Alto Horno | 1 |
| 1.2 Procesos de Reducción del Acero | 4 |
| 1.2.1 Procesos Neumáticos | 4 |
| 1.2.2 Procesos de Corazón Abierto. | 8 |
| 1.2.3 Fabricación de Acero por Horno Eléctrico | 14 |
| 1.3 Características del Alto Horno | 16 |
| 1.3.1 Aparatos de Carga | 17 |
| 1.3.2 Cuerpo del Horno | 19 |
| 1.3.3 Campanas para Evitar la Salida de Gases | 24 |
| 1.3.4 Dispositivos Refrigerantes Empleados en los Altos Hornos | 30 |
| 1.3.5 Anillo de Aire y Toberas | 34 |
| BIBLIOGRAFÍA | 36 |
| CAPÍTULO 2. CONDUCCIÓN DEL CALOR | 37 |
| 2.1 Gradiente de Temperatura | 38 |
| 2.2 Transferencia de Calor por Conducción. | 40 |
| 2.3 Conductividad Térmica | 41 |
| 2.3.1 Conductividad Térmica de Sólidos | 42 |
| 2.3.1.1 Parámetros de Choque Térmico | 44 |
| 2.3.1.2 Ecuación diferencial de la Conducción. | 46 |
| 2.4 Transferencia de Calor por Convección. | 52 |
| 2.5 Transferencia de Calor por Radiación. | 55 |
| BIBLIOGRAFÍA | 56 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 3. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN 57

| | |
|--|----|
| 3.1 Deformación Normal bajo Carga Axial | 57 |
| 3.2 Diagrama Esfuerzo-Deformación | 59 |
| 3.3 Ley de Hooke. Módulo de Elasticidad. | 61 |
| 3.4 Comportamiento Elástico contra Comportamiento Plástico de un Material. | 61 |
| 3.5 Deformación Térmica | 62 |
| 3.6 Esfuerzos Residuales | 64 |
| 3.7 Deformación y Esfuerzos en Materiales Compuestos | 67 |
| 3.7.1 Materiales policristalinos | 69 |
| 3.7.2 Porosidad | 70 |
| 3.8 Comportamiento Mecánico de Cerámicos y Compuestos Cerámicos. | 71 |
| 3.8.1 Cerámicos a Temperatura Ambiente | 71 |
| 3.8.2 Cerámicos a Temperatura Moderada | 73 |
| 3.8.3 Cerámicos a Alta Temperatura | 75 |
| 3.8.4 Porosidad y Efecto de Tamaño de Grano en Cerámicos | 78 |
| BIBLIOGRAFÍA | 81 |

CAPÍTULO 4. REFRACTARIOS PARA LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO 82

| | |
|--|----|
| 4.1 Clasificación de los Refractarios | 82 |
| 4.1.1 Grupo de Sílice | 84 |
| 4.1.2 Grupo de Arcillas (Fireclay Group) | 85 |
| 4.1.3 Grupo de Alta Alúmina. | 86 |
| 4.1.4 Grupo Magnesio-Silicatos | 88 |
| 4.1.5 Grupo Cal-Magnesia | 88 |
| 4.1.6 Grupo de Cromita | 90 |
| 4.1.7 Grupo de Carbonos | 90 |
| BIBLIOGRAFÍA | 95 |

CAPÍTULO 5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS REFRACTARIOS Y SU APLICACIÓN PARA ALCANZAR LAS CONDICIONES DE SERVICIO. 96

| | |
|---|-----|
| 5.1.1 Fusión o Temperatura de Ablandado | 99 |
| 5.1.2 Porosidad y Permeabilidad | 100 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

| | |
|---|-----|
| 5.1.3 Densidad total y Peso Específico | 102 |
| 5.1.4 Expansión Térmica y Cambios de Volumen | 103 |
| 5.1.5 Resistencia en Frío | 106 |
| 5.1.6 Resistencia y Comportamiento bajo cargas a temperaturas elevadas | 107 |
| 5.1.7 Capacidad Calorífica y Conductividad Térmica | 112 |
| 5.1.8 Resistencia al Choque Térmico | 115 |
| 5.1.9 Resistencia a la Abrasión | 117 |
| 5.2 Variación de las Propiedades de los Refractarios en función de la Temperatura | 117 |
| 5.2.1 Punto de Fusión | 117 |
| 5.2.1.1 Puntos de Fusión de los Óxidos | 119 |
| 5.2.1.2 Puntos de Fusión de los No Óxidos | 121 |
| 5.2.2 Temperatura Máxima de Servicio | 122 |
| 5.2.3 Características de las Curvas Esfuerzo-Deformación a Baja Temperatura. | 126 |
| 5.2.4 Curvas Esfuerzo-deformación a Alta Temperatura en Función del Tiempo | 128 |
| 5.2.5 Dureza a Temperaturas Elevadas | 130 |
| 5.2.6 Fluencia a Temperaturas Elevadas | 131 |
| 5.2.7 Efectos de la Porosidad en la Dureza a Temperatura Ambiente. | 133 |
| 5.2.8 El Módulo de Ruptura en Función de la Temperatura. | 137 |
| 5.2.9 El Módulo de Young en Función de la Temperatura. | 143 |
| BIBLIOGRAFÍA | 146 |

CAPÍTULO 6. REACCIONES A TEMPERATURAS ELEVADAS 147

| | |
|---|-----|
| 6.1 El Sistema $Al_2O_3-SiO_2$. | 148 |
| 6.2 El Sistema $FeO- Al_2O_3-SiO_2$. | 149 |
| 6.3 El Sistema $CaO- Al_2O_3-SiO_2$. | 151 |
| 6.4 Sistemas de Alcalis con Refractarios de Alúmina-Sílice. | 152 |
| 6.5 El Sistema $MnO- Al_2O_3-SiO_2$. | 155 |
| 6.6 El Sistema $CaO-SiO_2$. | 156 |
| 6.7 El Sistema $FeO-SiO_2$. | 157 |
| 6.8 El Sistema $FeO-Fe_2O_3-SiO_2$. | 158 |
| 6.9 El Sistema $MgO-FeO$. | 159 |
| 6.10 El Sistema $CaO-MgO-SiO_2$. | 161 |
| BIBLIOGRAFÍA | 167 |

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 7. ANÁLISIS EN EL ALTO HORNO | 168 |
| 7.1 Producción de Hierro en el Alto Horno | 168 |
| 7.2 Temperaturas en el Alto Horno | 170 |
| 7.3 Refractarios Usados en el Alto Horno | 172 |
| 7.4 Análisis en la Zona Alta del Alto Horno | 178 |
| 7.4.1 El Tercio Superior de la Cuba. | 178 |
| 7.4.2 El Tercio Medio de la Cuba. | 185 |
| 7.4.3 El Tercio Inferior de la Cuba. | 189 |
| 7.5 Análisis en la Zona Baja del Alto Horno | 193 |
| 7.6 Desgaste de los Materiales Refractarios en el Alto Horno | 199 |
| 7.6.1 Desgaste Abrasivo de los Cerámicos | 199 |
| 7.6.2 Mecanismos de Desprendimiento de Material en el Desgaste Abrasivo. | 202 |
| 7.6.3 Proposición del Modelo Tribológico del Alto Horno. | 205 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 209 |

| | |
|------------------------------|------------|
| CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN | 211 |
|------------------------------|------------|

| | |
|---------------------|------------|
| CONCLUSIONES | 219 |
|---------------------|------------|

INTRODUCCIÓN.

El acero se encuentra día a día en nuestras vidas, de hecho si un país se considera industrializado (o quiere llegar a ser) tiene que contar con producción de acero; y para producir acero se necesita como primer elemento contar con altos hornos para convertir el mineral de hierro en hierro para después procesarlo y conseguir aceros de diversas características.

Estos altos hornos deben ser construidos para soportar las altas temperaturas requeridas para fundir el mineral de hierro; los materiales utilizados para la construcción de los hornos son los cerámicos, que deben soportar entre otras cosas las presiones que se generan en el interior del horno, las altas temperaturas y la abrasión ocasionada por los elementos reductores y las diversas impurezas del mineral de hierro.

El objetivo de esta tesis es el análisis de los materiales utilizados para la construcción del Alto Horno, un análisis que aún en nuestros días continúa pues los estudios y experimentos de estos cerámicos refractarios son costosos y

difíciles de realizar. Los investigadores siguen buscando la forma de hacer más eficientes los materiales refractarios, bajando costos y haciéndolos más duraderos.

Para el estudio de los refractarios se necesita conocer sus características físicas, químicas y térmicas, su comportamiento a diversas temperaturas y la diferencia en las composiciones entre otros; todos estos factores nos pueden dar una aproximación de las condiciones necesarias para hacerlos más duraderos y por lo tanto disminuir costos de operación, costos de manufactura y costos de mantenimiento.

Esta tesis se divide en siete capítulos, el primer capítulo describe el desarrollo y las características del Alto Horno, los capítulos 2 y 3 tratan de las características térmicas y físicas de los cerámicos en general. El capítulo cuarto da una clasificación de los refractarios empleados en la industria del hierro y el acero. La aplicación de los refractarios para alcanzar las condiciones de servicio de un alto horno se tratan en el capítulo 5; el capítulo 6 da una descripción de las reacciones a temperaturas elevadas de los sistemas comunes encontrados en el alto horno. Por último, el capítulo 7 combina los capítulos precedentes para realizar el análisis de las propiedades principales de los refractarios en el alto horno y el desgaste ocasionado en el alto horno.

1. EL ALTO HORNO.

1.1 Desarrollo del Alto Horno.

El alto horno se desarrolló a partir de los primeros corazones en donde el hierro era producido. Este desarrollo consistió en incrementar gradualmente la altura del horno, introduciendo la carga a intervalos y suministrando el aire necesario. Originalmente se desarrollaron por los productores de hierro de Europa Central, estos hornos fueron construidos de piedras que rodeaban una cámara vertical en forma de dos conos truncados colocados base con base. El hierro crudo y el carbón eran cargados por arriba, mientras que el aire era soplado a través de pequeños canales debajo de la estructura.

Los primeros sitios con este tipo de hornos se encuentran en la actual Alemania (en Nasau, Siegen y Sajonia) y en partes de Austria, Bélgica y

Holanda. Estos hornos tenían de 3 a 5 metros de altura. Por uno de dos canales soplaba el aire que entraba a una altura de 30 cm arriba del corazón. Carbón y hierro se cargaban en la parte superior del horno, siendo cargados de vez en vez conforme se iba consumiendo. Un canal de salida era colocado en el fondo del corazón para extraer los productos. Este canal era tapado por ladrillos o piedras que eran desechadas cada vez que los productos eran extraídos, después de esto el canal se volvía a cerrar. El único combustible usado era el carbón.

El alto horno fue introducido a Inglaterra aproximadamente en el año 1500 D.C. El combustible usado en Inglaterra era el “coque”¹. El principio de calentar el aire antes de que fuera soplado en el horno fue introducido en Inglaterra en los primeros años del siglo XIX.

Los hornos americanos de mediados del siglo XIX tenían la forma de un cono truncado o pirámide, de 6 a 9 metros de altura. El corazón podía ser redondo o cuadrado. La capacidad de estos hornos iba de 1 a 6 toneladas diarias.

La parte superior de los primeros hornos estaba abierta y los gases que se escapaban eran quemados en el aire por encima del horno. Eventualmente se hicieron intentos para usar el calor de los gases quemados para calentar el aire de entrada. Este aire fue entubado para ser llevado a estufas donde el aire que iba a ser soplado al interior del horno era calentado.

¹ Coque.- Carbón que prende con un calor intenso y escasez de humo, es utilizado como combustible industrial.

También se desarrolló la maquinaria para comprimir el aire que debía ser soplado en el alto horno: la rueda de agua que alimentaba tubos de madera fue reemplazada por el motor de vapor, éstos se volvieron estándar alrededor de 1880. En los Estados Unidos, los primeros motores de combustible fueron instalados en 1903.

El hierro y carbón para los hornos eran traídos a la parte superior en barriles o carros con ruedas que pasaban por un puente inclinado hacia la parte superior. Conforme los hornos se hacían más grandes, se utilizaron grúas verticales similares a elevadores para elevar los barriles cargados de nivel del suelo a la parte alta del horno.

Conforme la capacidad de los hornos se incrementaba, era difícil manejar las grandes cantidades de materiales por métodos manuales. En 1883, la primera grúa "skip"² fue instalada en un horno americano para elevar los materiales a la parte superior del alto horno. El hecho de que el carro siempre desalojaba su carga en la misma zona interfería con la adecuada distribución de materiales que era esencial para la operación normal del horno, por lo que varios métodos fueron desarrollados para distribuir las cargas en la parte superior; uno de estos métodos consistía en una banda rotatoria en la parte superior del horno, que con modificaciones es usada en los hornos modernos.

² Skips.- Palabra inglesa que denota salto. Vagonetas que ascienden por un plano inclinado y desalojan su contenido en el alto horno una vez que llegan al final de este plano (Parte Superior del Alto Horno).

1.2 Procesos de Reducción del Acero.

La primera de las técnicas modernas de reducción de acero fue el proceso neumático de Bessemer (1856). Después de la invención del proceso neumático vino el desarrollo del horno de tipo regenerativo que, conocido ahora como horno de corazón abierto, se adaptó para la fabricación de acero y evolucionó hasta ser el principal medio de producción de acero en todo el mundo. El horno eléctrico es relativamente nuevo en el campo de la fabricación de acero y está encontrando más y más aplicaciones para la producción de aceros de calidad.

El más reciente proceso de fabricación de acero es un proceso neumático que se basa en el soplado de oxígeno puro sobre una superficie de hierro fundido; este método es conocido como "BOP"³.

1.2.1 Procesos Neumáticos.

Proceso Ácido de Soplado Inferior (Bessemer).- Este proceso fue desarrollado independientemente por William Kelly de Eddyville, KY y por Henry Bessemer de Inglaterra. Consistía en soplar aire por la parte inferior de un contenedor cargado con hierro fundido, este contenedor estaba construido a base

³ BOP.- Por sus siglas en inglés Basic Oxygen Steelmaking Process., y el horno en donde se realiza este proceso se conoce como BOF.

de refractarios ácidos (siliciosos). Este proceso fue el primero en producir a gran escala acero líquido.

Este principio se basa en el hecho de que la oxidación de las impurezas que se encuentran en el hierro líquido (silicio, manganeso y carbono) ocurre antes que la oxidación del hierro. Además descubrieron que al realizarse la oxidación de estas impurezas se generaba un gran calor en el contenedor por lo que se podía soplar aire frío a través del hierro fundido para producir acero líquido sin la necesidad de una fuente externa de calor. El contenedor es conocido como *convertidor* pues “convierte” el hierro fundido en acero. El principio del convertidor con soplado inferior de aire se muestra en la figura 1.1.

El principio Bessemer producía satisfactoriamente acero con un convertidor hecho a base de refractarios siliciosos (ácidos), esto era porque refinaba hierro con contenidos bajos de fósforo y altos en manganeso, además contenía suficiente silicio para que el proceso alcanzara sus necesidades térmicas.

Pero cuando se aplicaba a hierros con contenidos grandes de fósforo y bajos en silicio y manganeso, el proceso no producía acero de buena calidad.

Aun cuando se utilizaba hierro con bajo contenido en fósforo, los primeros aceros contenían cantidades de oxígeno mayores a las admisibles, por lo que el acero no se comportaba bien en los moldes.

También el azufre que venía en el coque se utilizaba como combustible, pero contribuía a la baja resistencia al calor del acero.



Fig 1.1.- Principio del Convertidor con soplado inferior de aire. El aire entra en la caja de aire por debajo del contenedor a través del tubo indicado por la flecha y pasa al contenedor a través de agujeros por canales puestos por debajo del convertidor.

Finalmente se optó por agregar manganeso en la forma de "spiegeleisen"⁴ después del soplado. El carbono y el manganeso en el spiegeleisen tenían el propósito de remover oxígeno del acero, además parte del manganeso se combinaba con el azufre formando compuestos que flotaban en el metal en forma de escorias.

En 1871, la producción anual de acero Bessemer en Estados Unidos se había incrementado a 45000 toneladas (55% de la producción total de E.U.).

⁴ Spiegeleisen.- Hierro blanco duro que contiene de 15 a 32% de manganeso.

Proceso Ácido de Soplado Lateral.- Este convertidor de soplado lateral es a veces referido como convertidor de soplado en la superficie. Se caracteriza por tener todos los canales por encima del nivel del líquido y entrando por un lado del contenedor. La mayoría de los convertidores de soplado laterales son de media a dos toneladas de capacidad, aunque se han construido contenedores de mayor capacidad.

Proceso de Fabricación de Acero por Oxígeno (BOP).- En este proceso se sopla a alta velocidad oxígeno de alta pureza en la superficie de la fundición. Esto se hace en un contenedor con refractarios básicos y a través de un tubo vertical que se inserta en la boca del convertidor.

Este método de soplar oxígeno fue investigado por R. Durrer y C.V. Schwarz en Alemania, y por Durrer y H. Hellbrugge en Suiza. Los contenedores con soplado inferior no son adecuados pues la alta temperatura que se alcanza causa un rápido desgaste de los refractarios del tubo. Por otro lado, el soplar oxígeno a alta presión de arriba para abajo contra la superficie superior de la fundición produce el cambio de la carga a acero con una alta eficiencia química y térmica.

fundición produce el cambio de la carga a acero con una alta eficiencia química y térmica.

El proceso de fabricación de acero con oxígeno ha sido adaptado al proceso de producción del alto horno para metales con medio a altos contenidos de fósforo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 1.2.- Principio del convertidor de soplado superior. Se sopla oxígeno puro a alta presión, verticalmente hacia abajo a través de un tubo enfriado por agua.

1.2.2 Procesos de Corazón Abierto.

Historia del Proceso.

Este proceso fue desarrollado por Karl Wilhelm Siemens a través de la invención del "proceso regenerativo"⁵.

⁵ Proceso Regenerativo.- Siemens empezó a aplicar este principio con los motores de vapor, donde se observaba un ahorro de combustible y se alcanzaban elevadas temperaturas. De aquí enfocó su atención a producir elevadas temperaturas en los hornos.

El primer horno experimental fue construido en 1838, donde se descubrió que especialmente en los hornos altos que utilizaban combustible sólido se presentaban problemas para lograr la máxima eficiencia de este principio.

Después de dos años de experimentación, Siemens llegó a la conclusión de que gasificando el combustible antes de ser quemado en el horno se incrementaba la eficiencia del horno.

En la industria del hierro, los primeros usos que Siemens dio a su horno fue para ablandado, recalentando hierro y acero para ser forjados. Mientras tanto Siemens empezó a desarrollar la idea de que el acero podía ser fabricado partiendo de arrabio, oxidando el contenido de carbón con mineral de hierro. En 1868 probó que este método podía ser utilizado; este proceso es conocido como "Pig and Ore Process"⁶.

Después se enfocó a desarrollar un método para fabricar acero directamente del mineral de hierro, para de esta forma no utilizar el alto horno. En realidad lo consiguió, pero el costo de producción era mucho más alto que producir acero a partir de arrabio. Se ha demostrado que es más práctico y económico utilizar el alto horno para la reducción de Mineral de Hierro a Arrabio, y de Arrabio a Acero.

⁶ Pig and Ore Process.- Por su significado en inglés; Pig Iron – Arrabio, Iron Ore – Mineral de Hierro.

Principios del Proceso Siemens (Pig and Ore Process).- Este proceso se describe a continuación: Un corazón rectangular cubierto contenía la carga de arrabio y chatarra (ver la figura 1.3). La mayor parte del calor requerido para realizar las reacciones químicas era obtenido pasando combustible (gasificado) por encima de los materiales. El combustible, con una cantidad de aire más que suficiente para quemarlo, era introducido a través de puertos a cada lado del horno, alternándose un lado y luego el otro.

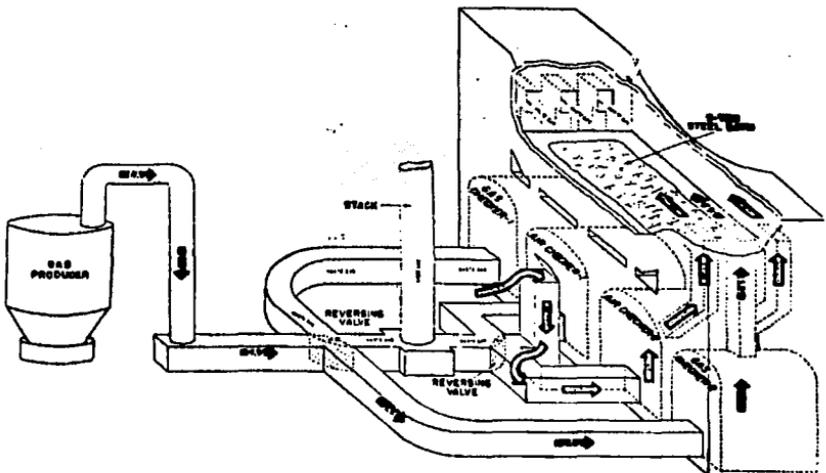


Fig. 1.3.- Arreglo esquemático de los primeros hornos tipo Siemens con 5 toneladas de capacidad. El techo de este diseño (que luego fue abandonado) se hundía de los lados hacia el centro del horno para forzar la flama a entrar en el baño. Varios arreglos de puertos de aire y gas se fueron desarrollando en los siguientes hornos. El flujo de gas, aire y gases de desperdicio era cambiado volteando las válvulas de flujo.

Los productos de la combustión pasaban por el puerto que no se usaba para la entrada de gas y entraban a cámaras con una serie de pasajes que llevaban a la chimenea. En su paso por estas cámaras los gases transferían gran parte de su calor a los ladrillos. Después de un tiempo, el aire y el gas eran cortados en un lado del horno y eran introducidos en el horno pasando a través de los ladrillos precalentados. Por lo tanto el gas y el aire eran calentados, y por consiguiente alcanzaban temperaturas mucho mayores en la combustión de las que podían ser alcanzadas sin el precalentamiento. Después de veinte minutos, el flujo de aire y gas era invertido de manera que entraran en el horno a través del puerto y las cámaras que se usaron al principio; y así se sucedían series de cambios del flujo cada quince o veinte minutos hasta que el calor se agotaba.

Los elementos que se encontraban en el mineral de hierro y que eran oxidados por el oxígeno contenido en el aire del horno eran Carbono, Silicio y Manganeso, los cuales podían ser reducidos a un nivel tan bajo como el que se alcanzaba en el proceso Bessemer.

Por tanto como en los otros procesos para purificar el arrabio, el proceso Siemens se basa en el principio de la oxidación. Sin embargo en el proceso Siemens se alcanzan temperaturas lo suficientemente altas para permitir mantener el producto final fundido y libre de escorias atrapadas.

Cambios mecánicos y mejoras en el Proceso Siemens.- Los primeros hornos tenían capacidades de sólo cuatro o cinco toneladas, mientras que los hornos actuales están en el rango de 40 a 600 toneladas de capacidad, la mayoría de los altos hornos cuentan con capacidades entre 200 y 300 toneladas. Las mejoras en estos hornos han sido retrasadas por la falta de materiales refractarios capaces de soportar las altas temperaturas y las reacciones químicas del proceso. Para mejorar la calidad del acero se necesitan desarrollar o mejorar los refractarios de tal manera que resistan operaciones continuas a elevadas temperaturas.

El proceso Siemens se conoce como "Proceso de Corazón Abierto"⁷.

Mejoras metalúrgicas.- El corazón de los hornos Siemens era construido con ladrillos ácidos; arriba de estos ladrillos la base era hecha de arena (básicamente como en el proceso ácido de ahora). Después, para permitir la carga de piedras de Carbonato de Calcio y el uso de escoria básica para remover el fósforo, el corazón fue construido de ladrillos de magnesita, cubiertos con una capa de dolomía quemada, reemplazando la base siliciosa del horno ácido. Estos hornos, por tanto fueron designados como hornos básicos, y el proceso que se realizaba en ellos se llamó Proceso Básico.

⁷ Proceso de Corazón Abierto.- El nombre "Corazón Abierto" se deriva del hecho de que el acero era fundido en un corazón bajo un techo que era accesado a través de puertas en el horno para inspección y pruebas.

Ventajas del Proceso Siemens.- (1) Al usar mineral de hierro como agente oxidante y por la aplicación externa de calor, la temperatura de la fundición es independiente de las reacciones de purificación, y la eliminación de impurezas se puede realizar gradualmente, por lo que la temperatura y la composición se pueden controlar mucho más fácilmente que en el proceso Bessemer. (2) Por la misma razón, se puede usar una gran variedad de materiales (particularmente chatarra, que no es consumida en el convertidor Bessemer) y una gran variedad de productos son fabricados por el proceso de Corazón Abierto. (3) Una ventaja importante es que el acero producido por una cantidad dada de arrabio es mucho mayor que en el proceso Bessemer, esto se debe a la recuperación del contenido de hierro del mineral de hierro usado para la oxidación en el corazón abierto. (4) Por último, con el desarrollo del Proceso Básico de Corazón Abierto, la gran ventaja de los hornos Siemens sobre el Proceso Acido de Bessemer es que el proceso básico de corazón abierto es capaz de eliminar fósforo en la fundición.

El fósforo también puede ser eliminado en el proceso básico Bessemer, pero debido a diferentes condiciones de temperatura, el fósforo es eliminado antes que el carbono en el Proceso Básico de Corazón Abierto, mientras que la mayor parte del fósforo no se reduce en el proceso básico Bessemer hasta después que el carbono, en el periodo que viene después del soplado. Por lo tanto el Proceso básico Bessemer requiere mineral de hierro con un contenido de

fósforo del 2 por ciento o más para mantener la temperatura lo suficientemente alta para el periodo que viene después del soplado, el proceso básico de corazón abierto permite el uso de hierro de cualquier contenido de fósforo de hasta el 1 por ciento (más económico).

1.2.3 Fabricación de Acero por Horno Eléctrico.

Se ha dicho que los hornos de arco eléctrico empezaron con el descubrimiento del arco eléctrico del carbono por Humprey Davy en 1800, pero su aplicación práctica empezó con el trabajo de William Siemens, que en 1878 construyó y patentó hornos que operaban con los principios de arco directo e indirecto.

En esta época, escaseaba la corriente eléctrica y no se habían desarrollado electrodos de carbono capaces de soportar la temperatura para derretir el acero.

Hornos de Arco Directo.- El primer horno de arco directo fue puesto en operación por Heroult en 1899. La patente de Heroult cubría hornos de una fase o varias fases con los arcos eléctricos en serie a través de la fundición. Estos tipos de hornos, utilizando energía trifásica han sido los más exitosos de todos los hornos eléctricos.

Los hornos que se siguieron desarrollando fueron para hacer lingotes de acero. El primer horno eléctrico para coladas comerciales el de Treadwell Engineering Company en Pennsylvania. Este era un horno de una fase, de dos electrodos con una capacidad de dos toneladas, fue operado en agosto de 1911.

Por esta época la compañía General Electric empezó a experimentar con el diseño de hornos de arco directo, con vistas a desarrollar un mercado para equipo eléctrico requerido para operarlos.

Hornos de Arco Indirecto.- El primer trabajo en hornos de arco indirecto fue hecho por Stassano en Italia. Su diseño consistía de una coraza cilíndrica vertical con tres electrodos espaciados 120 grados entre cada uno y colocados en el horno por encima de la fundición. Este horno fue instalado en una compañía en Michigan en 1911.

Al principio de la primera guerra mundial, el sueco Rennerfelt desarrolló un horno de arco indirecto con dos electrodos horizontales y un electrodo vertical, de esta manera el arco era dirigido hacia la fundición.

Ninguno de los hornos eléctricos de arco indirecto fue usado grandemente debido a que su mantenimiento era difícil y el consumo de energía era alto.

El horno de Inducción.- Otro tipo de horno eléctrico usado para derretir aleaciones de alto grado es el horno de inducción de alta frecuencia. Este horno es usado para derretir la chatarra de los aceros finos producidos en hornos de arco eléctrico, derritiendo aleaciones de cromo-niquel, y chatarra de alto manganesio.

1.3. Características del Alto Horno.

El alto horno propiamente dicho está constituido por las siguientes cinco partes principales:

1. Los aparatos de carga
2. El cuerpo del horno
3. Las campanas de cierre de la boca o tragante del horno y las tuberías de salida de los gases
4. Los dispositivos refrigerantes
5. El anillo de aire y las toberas

Los altos hornos tienen de 6 a 14m. de diámetro en el crisol, 20 a 36 m de altura útil y de 50 a 100 m. de altura total. Su volumen varía de 500 a 5000 m³. Sus capacidades de producción oscilan, generalmente, de 200 a 13000 toneladas por día.

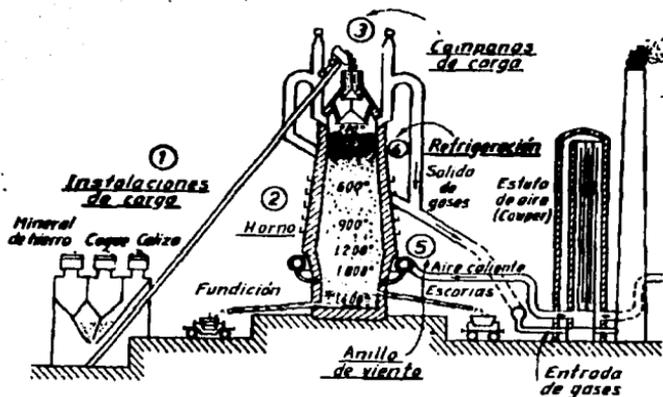


Fig. 1.4.- Horno Alto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.3.1. Aparatos de Carga.

En la parte superior del horno, alrededor de la boca de la carga, hay una plataforma que algunas veces se apoya en el mismo cuerpo del horno y otras veces descansa en una fuerte estructura metálica, en cuyo interior está encajado el horno. Esa plataforma soporta el tragante, los aparatos de carga y los tubos verticales de salida de gases, que en su final superior tienen una válvula de

escape. Para elevar las materias primas hasta la boca del horno, se emplean ascensores, *skips* o cintas transportadoras.

Se pueden distinguir dos tipos de altos hornos:

1. Hornos que son muy utilizados en Estados Unidos, en los cuales la cuba o parte superior del horno está apoyada sobre una fuerte viga circular metálica llamada "madrastra", que se apoya sobre sólidas columnas también metálicas. De la madrastra suelen ir colgadas las tuberías de viento, tuberías de agua de refrigeración y otras instalaciones auxiliares.

2. Hornos que preferentemente se utilizan en Europa, en los que no existen columnas metálicas para soportar el horno. El refractario y el cuerpo metálico del horno forman un conjunto resistente. Alrededor de estos hornos se construye siempre una alta estructura metálica, que soporta los elementos que se encuentran sobre la boca de carga y dan rigidez y resistencia al conjunto.

En ocasiones se construyen también hornos altos con disposiciones intermedias entre los dos tipos de hornos que se acaban de mencionar.

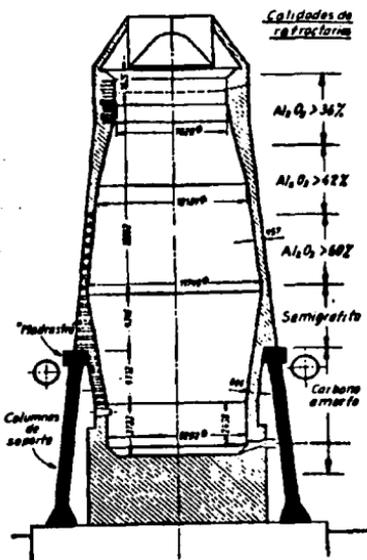


Fig. 1.5.- Horno alto de tipo americano.

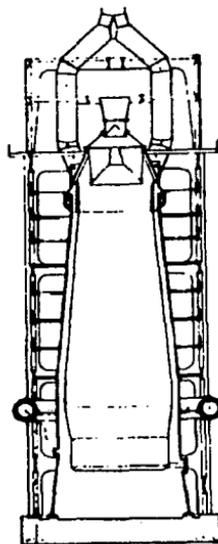


Fig. 1.6.- Horno alto de tipo europeo.

En ocasiones se construyen también hornos altos con disposiciones intermedias entre los dos tipos de hornos que se acaban de mencionar.

1.3.2. Cuerpo del Horno.

El cuerpo de los altos hornos más modernos tiene la forma de una botella de boca ancha, con una parte inferior casi cilíndrica.

Están constituidos por un revestimiento refractario de 600 a 900 mm de espesor, revestido exteriormente por chapa de acero. En el horno se distinguen cinco zonas principales (fig. 1.7):

Tragante

Cuba

Vientre

Etalaje

Crisol

Se llama *tragante*, a la parte superior del horno por donde se cargan las materias primas.

El nombre de *cuba* se da al tronco de cono superior, que tiene su mayor diámetro en la parte inferior.

Vientre se suele denominar a la parte del horno de mayor diámetro, que es la zona de unión de los dos troncos de cono. Se denomina *etalaje* al tronco de cono situado en la parte inferior, justo debajo del vientre, que tiene su mayor diámetro en la parte superior.

Crisol es la parte inferior cilíndrica, donde se reúnen en estado líquido la fundición y la escoria antes de su salida del horno.

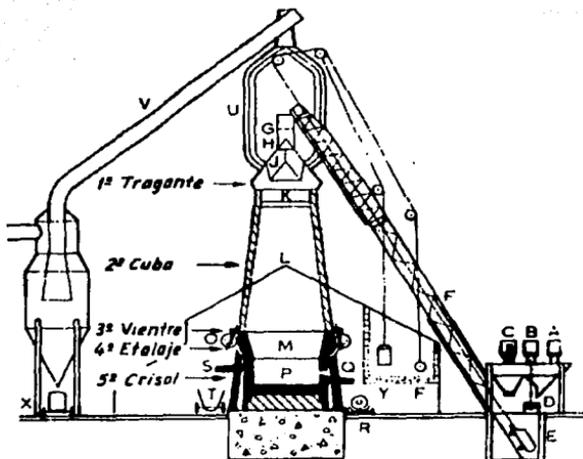


Fig. 1.7.- Alto Horno.

Hasta mediados del siglo XX, prácticamente todos los hornos se construían con refractario silico-aluminoso, revestido exteriormente por chapa de hierro. Últimamente se ha dedicado gran atención a los refractarios de los hornos altos, y en su revestimiento se emplean ahora varios tipos de refractarios:

- en el tercio superior de la cuba, se emplean generalmente ladrillos silico-aluminosos de 33 a 38% de alúmina;

- en el tercio medio, se emplean ladrillos silico-aluminosos de 38 a 42% de alúmina;

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

-en el tercio bajo se emplean ladrillos silico-aluminosos de 42% de alúmina y, también, ladrillos de silimanita con más de 60% de alúmina.

En los etalajes se emplean ladrillos silico-aluminosos de silimanita y de semigrafito (estos últimos por su buena conductibilidad térmica).

En el crisol, en los años comprendidos entre 1940 y 1965, se han empleado bloques de carbón amorfo, y luego parte han sido sustituidos por bloques de grafito y semigrafito, que tienen muy buena conductibilidad térmica y se refrigeran por la parte inferior por corriente de aire o tuberías de agua.

| Fábrica | Schvelgen | Ruhrort | Hamborn | Dortmund Westf. | Dortmund Norde | Solzgitter | Rheinhausen | Grärne | J.Muiden |
|-----------------------|--|--|---|--|--|--|--|--|--|
| Alto horno n° | 1 | 6 | 9 | 4 | 6 | 7 | 8 | 3 | 7 |
| Dimetro del crisol | 14,0m | 11,0m | 9,4m | 9,7m | 9,5m | 9,5m | 8,5m | 9,2m | 13,0m |
| Fecha de inauguración | 6-72 | 7-70 | 7-69 | 12-71 | 5-69 | 3-70 | 6-69 | 7-66 | -72 |
| Cuba | 42a46% Al ₂ O ₃ | 37a40% Al ₂ O ₃ | | 30a33% Al ₂ O ₃ | 30a33% Al ₂ O ₃ | 30a33% Al ₂ O ₃ | 30a33% Al ₂ O ₃ | 33a37% Al ₂ O ₃ | 42a46% Al ₂ O ₃ |
| | | | 42a46% Al ₂ O ₃ | 37a40% Al ₂ O ₃ | | 33a37% Al ₂ O ₃ | 33a37% Al ₂ O ₃ | | |
| | | 42a46% Al ₂ O ₃ | | 40a42% Al ₂ O ₃ | 60a62% Al ₂ O ₃ | 33a37% Al ₂ O ₃ | 60a62% Al ₂ O ₃ | 40a42% Al ₂ O ₃ | |
| | | | 2,5m 30%Al ₂ O ₃ | | 4,6m 70a75% Al ₂ O ₃ | 37a40% Al ₂ O ₃ | 60a62% Al ₂ O ₃ | | |
| Vientre | 13,4m Semi-grafito | 5,2m Semi-grafito | 5,0m Semi-grafito | 8,7m Semi-grafito | | | | 11,0m Grafito | |
| Etalaje | | | | | 3,4m Carbón | 5,2m Carbón | 42a46% Al ₂ O ₃ | 3,5m Carbón | 4 semi-grafito |
| Crisol | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón | Carbón |

Tabla 1.1 Refractarios empleados en los Altos Hornos.

El espesor de las paredes de refractario varía aproximadamente desde 1 m en la parte superior a 1.5 m en la inferior.

La vida de los hornos altos suele variar de 5 a 10 años (aunque se han reportado duraciones de hasta 15 años) y termina por el desgaste de la parte interior de las paredes de refractario, que en la zona inferior de la cuba sufren un mayor deterioro.

1.3.3. Campanas para evitar la salida de gases.

En la parte superior de los hornos y cerrando la boca o tragante, se encuentra el dispositivo de carga y cierre con doble campana que sirve para evitar el escape de gases.

Al nivel aproximado de descarga de las materias primas, están las salidas de gases, formadas por cuatro grandes tubos verticales, con válvulas para el escape de gases, por donde va el gas del horno alto a las cámaras de expansión y a las instalaciones de refrigeración y depuración.

Las materias sólidas transportadas a la parte superior del horno por vagonetas, que suben por *skips* o en ascensores o llegan por cintas transportadoras, suelen descargarse en una tolva o compartimento situado encima del horno, cuyo fondo está constituido por una pequeña campana.

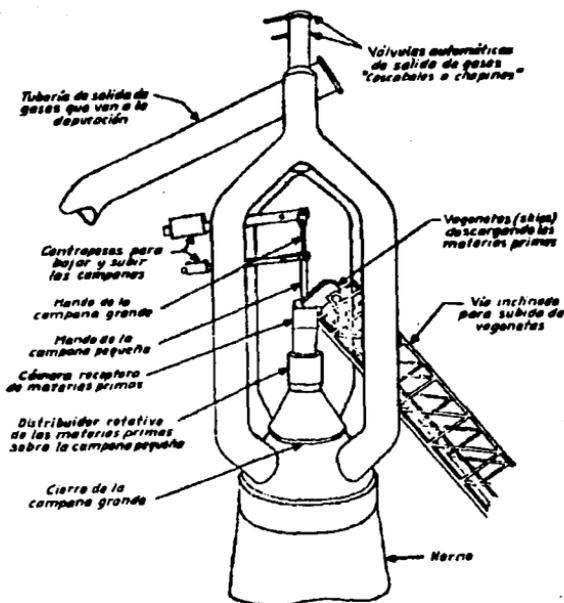


Fig. 1.8.- Parte Superior de un Alto Horno. Carga de materias primas y salida de gases.

Al encontrarse reunidos allí el mineral en trozos, el "sinter"⁸, los "pellets"⁹, la caliza (formando el lecho de fusión) y el coque se hace descender un poco esa pequeña campana superior, quedando abierto un espacio a través del cual las materias primas caen a una cámara comprendida entre las dos campanas.

⁸ Sinter.- Partículas de metal unidas y formadas a presión, calentadas por debajo del punto de fusión.

⁹ Pellets.- Masas redondas formadas de partículas de hierro recuperadas de mineral de hierro pulverizado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuando se han reunido 5 ó 6 cargas, se baja y cierra la campana superior y se baja la campana inferior para dejar abierto el paso para que desciendan las materias al interior del horno. En el momento de abrirse la campana inferior, se llena el espacio comprendido entre las dos campanas de una pequeña cantidad de gas que luego escapa al cerrar la campana inferior y abrir la superior para dejar caer una nueva carga. Empleando ese dispositivo de doble campana, la pérdida de gas a la atmósfera es muy pequeña.

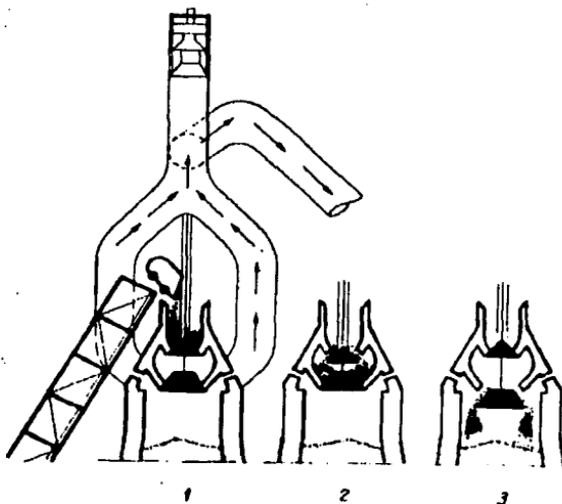


Fig. 1.9.-Mecanismo de la campana para las dos cargas de materias primas.

Antiguamente, los hornos altos eran abiertos por la parte superior y el gas producido escapaba al exterior y se perdía. En la actualidad, gracias al dispositivo de doble campana, es posible aprovechar el gas que se produce, que es combustible y se emplea después de depurado para el calentamiento de calderas, baterías de coque, etc. El poder calorífico del gas de horno alto es 800cal/m^3 aproximadamente.

Hornos sin campana. Tragante con canaleta tipo Wurth.

En los años 1970 a 1977, se han instalado en muchos hornos altos tragantes sin campana construidos por Paul Wurth, de Luxemburgo, de funcionamiento muy diferente a los utilizados anteriormente. Con su empleo, se ha mejorado la distribución de las cargas en el interior de los hornos y se han elevado sus rendimientos.

Tienen la ventaja de resistir mejor la erosión de las cargas que los tragantes de campana que se han utilizado durante mas de 100 años y, además, tienen menos averías y, por tanto, precisan de menos reparaciones que aquéllos, en especial cuando se trabaja con fuerte sobrepresión.

Las cargas llegan a la parte superior del horno generalmente por cinta transportadora (4) (ver figura 1.10) y, de allí, caen a un embudo con válvula de cierre (6), que las conduce a una de las tres tolvas o depósitos que hay sobre el

tragante de este tipo de instalación.

En la figura, una de las tolvas (7) se está llenando y otra está vaciando su carga en el horno. La tercera (9) está en reparación.

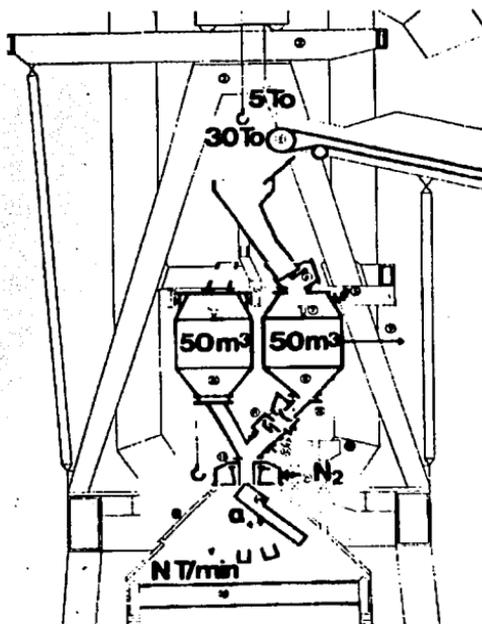


Fig.1.10.- Horno sin campana con tragante tipo Wurth (de canaleta)

Por unos conductos inclinados (11), que tienen llaves de regulación y mecanismos de cierre, son conducidas las cargas al distribuidor (13), cayendo de allí a una canaleta (16), que es una de las partes más importantes de la instalación. La canaleta tiene un movimiento de giro de alrededor de 360 grados alrededor del eje del horno y, además, es posible regular su inclinación de forma que las cargas se pueden dirigir, según convenga, al punto deseado, lo que permite una perfecta distribución del material.

El mecanismo de distribución, a través del cual caen las cargas a la canaleta, se refrigera por inyección de nitrógeno o por gas de horno alto depurado y frío, que se hace llegar a través de la columna (15).

Las principales ventajas de este sistema, con respecto a los tragantes con campana, son:

1. Menor altura total del horno y, por consiguiente, menor peso de la estructura.
2. La capacidad de carga de la grúa de trabajo se reduce de 130 a 30 t.
3. Se consigue un reparto más uniforme de las cargas.
4. Las reparaciones de la instalación son menos frecuentes y costosas.

1.3.4. Dispositivos refrigerantes empleados en los hornos altos.

Las elevadas temperaturas que se desarrollan en el interior de los hornos altos, la acción de la columna gaseosa ascendente caliente y el rozamiento que producen las materias calientes que descienden a través del horno, ocasionan un gran desgaste en la cara interna de las paredes de los hornos. Esa acción destructora se ha podido contrarrestar, en gran parte, con el enfriamiento de las paredes de formas muy diversas. Se emplean duchas de agua que se proyectan sobre las chapas metálicas que recubren el revestimiento de refractario de las paredes de la cuba del horno.

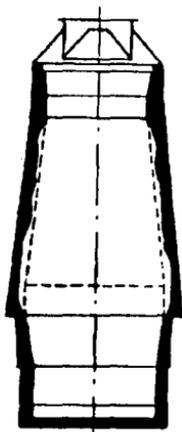


Fig. 1.11.- Desgaste de la pared refractaria del alto horno por el roce de las cargas descendentes.

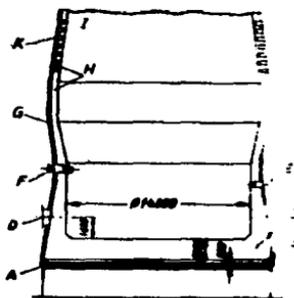


Fig. 1.12.- Detalles de la zona inferior del Alto Horno. A, Tuberías de agua y refrigeración; B y C, bloques de carbono amorfo; D, agujero de colada de la fundición; E, agujero de colada de la escoria; F, tobera; G, placa de fundición refrigerada con agua; H, bloques de semigrafito; L, refractario silico-aluminoso; K, cajas refrigeradas de agua.

También se emplean cajas de cobre o de acero refrigeradas con agua, que en gran cantidad (en ocasiones de 200 a 800 cajas) se incrustan exteriormente en las paredes refractarias del etalaje y de la parte baja de la cuba.

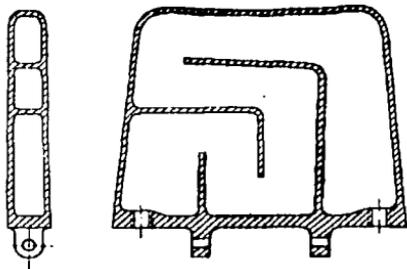


Fig. 1.13.- Caja refrigerante.

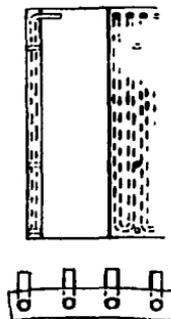


Fig. 1.14.- Placa refrigerante.

Recientemente han comenzado a emplearse, en la zona del etalaje, placas metálicas refrigeradas interiormente con agua, que se aplican exteriormente a las paredes refractarias de los etalajes y parte baja de las cubas. Son de 2 a 5 m de altura y tienen 250 mm de espesor.

La parte inferior de los bloques de carbono amorfo del fondo del crisol se refrigeran por medio de tuberías de agua o con corriente de aire a través de conductos situados debajo del crisol.

La refrigeración que se emplea para enfriar las paredes del horno, y que tiene por objeto fundamental prolongar la vida de los refractarios, perjudica el balance térmico del horno. Deberá, por lo tanto, estudiarse con atención su empleo y buscar un equilibrio entre las ventajas e inconvenientes de su utilización.

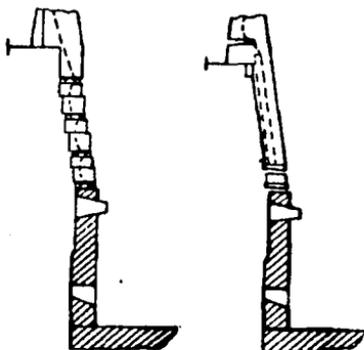


Fig. 1.15.-Etalajes refrigerados con cajas y con placas refrigerantes.

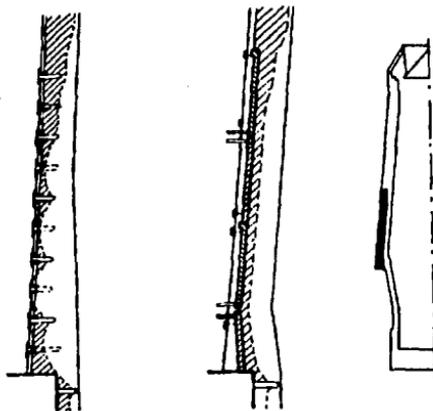


Fig. 1.16.-Zona inferior de la cuba con cajas y placas refrigerantes.

En el interior del horno, junto a los refractarios, debido en parte a la refrigeración exterior, se va formando una costra que está constituida principalmente por carbono, cal y alúmina. En ella, también se observa la presencia de óxidos alcalinos y compuestos de zinc y plomo, habiéndose comprobado que los compuestos alcalinos, en especial los de potasio, tienen una fuerte acción destructora sobre los refractarios silico-aluminosos del revestimiento. En los grandes hornos altos se emplean circuitos de refrigeración

cerrados. En ellos el agua se llega a calentar a temperaturas superiores a los 100 grados y se evapora. Luego, en ciertas zonas del circuito, se condensa y se enfría, recorriendo un circuito cerrado. El consumo de agua en los hornos altos en metros cúbicos por hora es aproximadamente igual al volumen del horno en metros cúbicos. Un horno de 2000 metros cúbicos de capacidad consume del orden de 2000 metros cúbicos de agua por hora.

1.3.5. Anillo de aire y toberas.

Para conseguir que el aire llegue al horno de una forma uniforme a través de las toberas, se dispone exteriormente, alrededor del horno a un nivel ligeramente inferior al vientre, un gran tubo de aire en forma de anillo metálico. Está revestido interiormente con material refractario y aislante para evitar pérdidas de calor. De este anillo de aire que está ligeramente separado del horno, salen varias tuberías que van una a cada una de las toberas que en número de seis, diez, veinte y hasta cuarenta, según sea el tamaño del horno, sirven para dar entrada al aire de combustión. Las toberas suelen ser de cobre y van refrigeradas con circulación de agua.

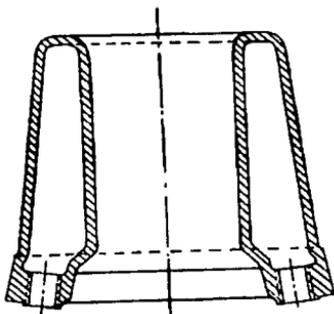


Fig. 1.17.-Tobera de cobre electrolítico refrigerada interiormente con agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Bibliografía.

Dilley, D.R. and McBride, D.L., Oxigen Steelmaking – fact versus folklore, Iron and Steel Engineer 44, October 1967, 131-152.

Lightner, M.W., Developments in ironmaking and steelmaking. Blast Furnace and Steel Plant 54, November 1966, 109-112.

Speer, Edgar B., The changing open-heart. Iron and Steel Engineer 39, March 1964, 71-79.

Apraiz, José, Fabricación de Hierro, Acero y Fundiciones, URMO S.A. Ediciones, Primera Edición en español, Bilbao España, 226-298.

2. CONDUCCIÓN DEL CALOR.

Cualquier fenómeno físico implica, en general, un cambio de las propiedades físicas del sistema, afectado por dicho fenómeno en el espacio y en el tiempo. El proceso de la conducción del calor sólo puede aparecer cuando puntos distintos de un sólido están a diferentes temperaturas. La conducción va acompañada generalmente, de variaciones de temperatura en el espacio y el tiempo. El tratamiento de la conducción es el estudio de las variaciones de la temperatura en el espacio y en el tiempo, o sea, consiste en establecer la ecuación:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2-1)$$

La ecuación anterior es la expresión matemática del campo de temperaturas, que es el conjunto de temperaturas en todos los puntos del espacio estudiado, en cualquier instante.

El campo de temperaturas puede ser de dos clases: *estacionario* o *transitorio*. La ecuación (2-1) describe el tipo más frecuente de campo, aquel en

que las temperaturas varían con el tiempo y de un punto a otro. Este tipo es característico de la conducción en régimen transitorio y se llama *campo de temperatura transitorio*.

Si se establece un flujo de calor de forma que la temperatura de cada punto sea constante en el tiempo, se tiene un campo de temperaturas *estacionario*.

2.1. Gradiente de Temperatura.

Si se unen todos los puntos de un cuerpo que estén a la misma temperatura, se obtiene una superficie de igual temperatura llamada *isoterma*.

Como un mismo punto de un cuerpo no puede tener dos temperaturas simultáneamente, las superficies isotermas no se cortan.

Las isotermas, o terminan en la superficie del cuerpo, o están completamente contenidas en él.

La intersección de las superficies isotermas por un plano da una familia de isotermas sobre él, que tienen las mismas propiedades que aquéllas, o sea, que no se cortan, son continuas dentro del cuerpo, y terminan en la superficie o están completamente contenidas en él.

La figura 2.1 representa isotermas cuya temperatura difiere en Δt .

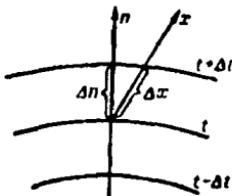


Fig. 2.1.- Isotermas

Fig. 2.1.- Isotermas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La temperatura de un cuerpo varía solamente en las direcciones que cortan a las superficies isotermas; la mayor variación de temperaturas por unidad de longitud se obtiene en la dirección normal a la superficie isoterma.

Un incremento de temperatura en esa dirección está determinado por el *gradiente de temperatura*. Este gradiente es un vector normal a la superficie isoterma y positivo en la dirección de las temperaturas crecientes. Numéricamente es igual a la derivada de la temperatura en esa dirección, o sea:

$$\text{Grad } T = n_o (\delta T / \delta n) \quad (2-2)$$

En donde: n_o es un vector unitario normal a la superficie isoterma y en el sentido de las temperaturas crecientes, y $\delta T / \delta n$ es la derivada de la temperatura en la dirección de la normal (n).

El módulo del gradiente de la temperatura no es el mismo en puntos distintos de una superficie isoterma; es tanto mayor cuanto menor sea la distancia Δn entre las superficies. Cuando se habla de la magnitud gradiente de temperatura se hace referencia al valor de su módulo $\delta T/\delta n$.

El escalar $\delta T/\delta n$ es negativo en la dirección de las temperaturas decrecientes.

2.2. Transferencia de calor por conducción.

La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$Q/A \sim \delta T/\delta x \quad (2-3)$$

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad:

$$Q = - \kappa A \delta T/\delta x \quad (2-4)$$

En donde Q es la rapidez de transferencia de calor y $\delta T/\delta x$ es el gradiente de temperaturas en la dirección del flujo de calor. A la constante positiva κ se le llama conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta para que se

satisfaga el segundo principio de la termodinámica¹, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura, como se indica en la figura 2.2.

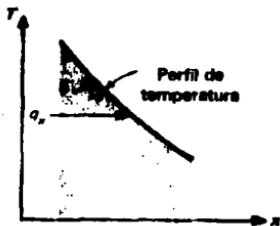


Fig. 2.2.- Esquema que muestra la dirección del flujo de calor.

La ecuación (2-4) se conoce como la ley de conducción de Calor de Fourier.

2.3. Conductividad Térmica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La conductividad térmica depende de la temperatura, la presión, y de la naturaleza de la misma. La conductividad térmica de los diversos materiales se determina en general experimentalmente, y con este objeto se conocen distintos métodos, la mayoría de los cuales se basan en la medida de la densidad de flujo

¹ Segunda Ley de la Termodinámica.- Un proceso natural que empieza en un estado de equilibrio y termina en otro, seguirá la dirección que cause un incremento en la entropía del sistema. ($\Delta s \geq \int dq/T$). La entropía absoluta de un sistema es la medida de la energía que deja de estar disponible para realizar algún trabajo en el sistema.

de calor y en el gradiente de temperatura. La conductividad térmica se calcula entonces mediante la relación:

$$\kappa = |q| / |\text{grad } T|, (\text{W/m}^\circ\text{C}) \quad (2-5)$$

Se deduce de la ecuación anterior, que la conductividad térmica es numéricamente igual a la cantidad de calor que atraviesa la unidad de área de superficie isoterma en la unidad de tiempo cuando el gradiente de temperatura es la unidad.

Como los cuerpos pueden estar a distintas temperaturas y la distribución de temperaturas dentro de un cuerpo durante la transmisión de calor no es uniforme, resulta necesario conocer la dependencia de la conductividad térmica respecto a la temperatura. Se ha demostrado experimentalmente que en las aplicaciones prácticas es suficientemente exacto suponer que la conductividad térmica varía linealmente con la temperatura en la mayoría de los materiales:

$$\kappa = \kappa_0 [1 + b (t - t_0)], \text{W/m}^\circ\text{C} \quad (2-6)$$

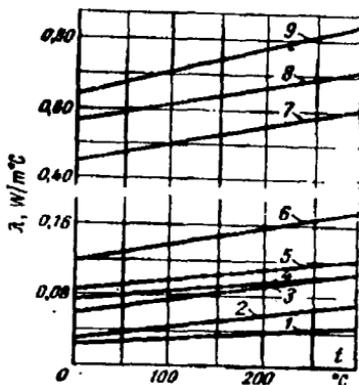
En donde κ_0 es la conductividad térmica a la temperatura t_0 y b , una constante determinada experimentalmente.

2.3.1 Conductividad térmica de sólidos.

Generalmente la temperatura de los sólidos dieléctricos crece con la temperatura tal como se muestra en la figura 2.3. Por regla general, los

materiales de densidad alta tienen conductividad térmica elevada, pero también depende de la estructura del material, de su porosidad y del contenido de humedad.

Muchos materiales de construcción y aislantes térmicos (ladrillos, cemento, escorias, etc.) tienen una estructura porosa y la aplicación de la Ley de Fourier queda muy limitada, pues su porosidad impide considerarlos como medios continuos.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Fig.2.3.- Conductividad $k(t)$ de materiales de construcción y de aislantes térmicos. 1. Aire; 2. Lana mineral; 3. Lana de escoria; 4. Magnesita al 85%; 5. Sovelite; 6. Ladrillo de tierra de diatomeas; 7. Ladrillo rojo; 8. Ladrillo de cemento de escoria; 9. Ladrillo de arcilla refractaria (chamota).

La conductividad térmica de un material poroso no está determinada. Sin embargo, puede decirse que su conductividad es la de un sólido de la misma forma y tamaño, a través del cual se transmite la misma cantidad de calor con las mismas condiciones de temperatura en las superficies.

2.3.1.1 Parámetros del choque térmico para la iniciación de fracturas.

Al escoger materiales para ingeniería donde están involucrados esfuerzos térmicos, es de gran valor considerar los parámetros de choque térmico para dar una indicación del inicio de fractura.

Es claro que una buena resistencia al choque térmico se asocia con altos valores de dureza y de conductividad térmica, además de valores bajos del módulo de Young y del coeficiente de expansión térmica. El valor más simple a considerar es el más relevante a los cambios bruscos de temperatura. Sea este el parámetro R que expresa la caída máxima de temperatura que un cuerpo puede soportar en términos de las otras variables de la ecuación (2-7):

$$\sigma = E\Delta T\alpha/(1-\nu) \quad (2-7)$$

donde: E = Módulo de Young;

ΔT = Variación de la Temperatura;

α = Coeficiente de Expansión Térmica;

ν = Coeficiente de Poisson²

² Coeficiente de Poisson.- El valor absoluto de la relación entre la deformación lateral y la axial.

La tabla 2.1 muestra los valores para algunos cerámicos en ingeniería e incluye valores de R .

| Material | Esfuerzo de Cedencia σ (Mpa) | Modulo de Young E (Gpa) | Coefficiente de Poisson ν | Coef. De Expansión Térmica α , 0-1000°C ($10^{-6} K^{-1}$) | Conductividad Térmica K a 500°C ($W m^{-1} K^{-1}$) | $R = \frac{\sigma(1-\nu)}{E\alpha}$ (K) | $R' = \frac{\sigma k(1-\nu)}{E\alpha}$ (kWm^{-1}) |
|---|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---|---|---|---|
| Si ₃ N ₄ prensado en caliente | 850 | 310 | 0.27 | 3.2 | 17 | 625 | 11 |
| Si ₃ N ₄ unido por reacción | 240 | 220 | 0.27 | 3.2 | 15 | 250 | 3.7 |
| SiC unido por reacción | 500 | 410 | 0.24 | 4.3 | 84 | 215 | 18 |
| Al ₂ O ₃ prensado en caliente | 500 | 400 | 0.27 | 9.0 | 8 | 100 | 0.8 |
| BcO prensado en caliente | 200 | 400 | 0.34 | 8.5 | 63 | 40 | 2.4 |
| WC (6%Co) Sinterizado | 1400 | 600 | 0.26 | 4.9 | 86 | 350 | 30 |

Tabla 2.1 Propiedades Mecánicas y Físicas de algunos cerámicos en ingeniería y parámetros de choque térmico.

El segundo parámetro de choque térmico R' en la tabla 2.1 es simplemente el producto del primer parámetro R y la conductividad térmica del material. Este segundo parámetro es el más adecuado de los dos pues relaciona un rango mucho más grande de condiciones prácticas y además da una buena indicación del desempeño del material. El valor de la conductividad térmica en la tabla 2.1 se da a 500°C, pero este parámetro varía apreciablemente con la temperatura como se muestra en la figura 2.4.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

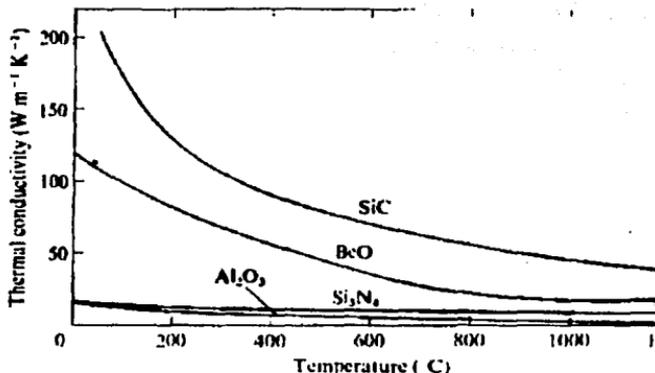


Fig. 2.4.- Conductividad térmica en función de la Temperatura de algunos cerámicos de ingeniería.

El parámetro R' por tanto disminuye, por un factor de 4 aproximadamente, de 0 a 1000°C.

2.3.2 Ecuación diferencial de la conducción.

Al estudiar cualquier fenómeno físico se busca establecer una relación existente entre las propiedades características del mismo. En fenómenos físicos complejos es muy difícil determinar estas relaciones cuando las propiedades varían en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto se hace uso de los métodos de la física y la matemática, en la que se supone que el fenómeno se estudia en un intervalo pequeño de tiempo y en un volumen elemental del espacio.

De esta forma, el elemento de volumen dv y el elemento de tiempo dt , elegidos para el estudio de este proceso, son matemáticamente cantidades infinitesimales, mientras que desde el punto de vista físico son lo

suficientemente grandes como para poder ignorar la estructura discreta de la materia y poder considerar a ésta como un medio continuo. La relación obtenida por este método es la ecuación diferencial general del proceso en cuestión. Integrando esta ecuación se obtiene la relación analítica entre las magnitudes características en el campo de integración y en cualquier intervalo de tiempo considerado.

Para encontrar el campo de temperatura necesitamos una ecuación diferencial de conducción. Para facilitar su deducción se supone:

- a) el sólido es homogéneo e isótropo
- b) sus parámetros físicos son constantes
- c) las variaciones de volumen debido a los cambios de temperatura son muy pequeñas frente al propio volumen del cuerpo
- d) no existe movimiento relativo entre las macropartículas del sólido
- e) las fuentes internas de calor están distribuidas uniformemente

La deducción de la ecuación diferencial de la conducción se basa en la ley de la conservación de la energía, que en este caso se puede formular como: la cantidad de calor dQ introducida en el elemento de volumen, desde el exterior, por conducción y por las fuentes de calor internas en el intervalo de tiempo dt es igual a la variación de energía interna de la sustancia contenida en tal volumen:

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ, [J] \quad (2-8)$$

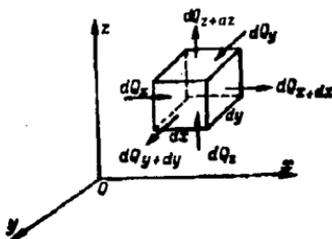
en donde :

dQ_1 = Cantidad de calor introducido en el elemento de volumen dv por conducción en el intervalo de tiempo dt ;

dQ_2 = Cantidad de calor liberada por las fuentes de calor internas en el tiempo dt ;

dQ = Cambio de energía interna de la sustancia contenida en dv en el tiempo dt .

Con objeto de calcular los términos de la ecuación (2-8), consideremos un paralelepípedo elemental de aristas dx , dy y dz (fig. 2.5) dispuesto con sus caras paralelas a los planos coordenados.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.5

Las cantidades de calor que se introducen en el elemento de volumen en el intervalo de tiempo dt y en las direcciones de los ejes ox , oy y oz se representan por dQ_x , dQ_y y dQ_z respectivamente.

Las cantidades de calor extraídas a través de las caras opuestas a las anteriores y en las mismas direcciones se representan por dQ_{x+dx} , dQ_{y+dy} , dQ_{z+dz} respectivamente. La cantidad de calor introducida por la cara $dy \cdot dz$ en la dirección del eje ox en el tiempo dt vale:

$$dQ_x = q_x dy dz dt$$

en donde q_x es la proyección de la densidad de flujo de calor sobre la dirección perpendicular a la cara indicada. La cantidad de calor extraída por la cara opuesta a aquella en la dirección del eje ox vale:

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dy dz dt$$

La diferencia entre las cantidades de calor introducidas y extraídas del paralelepípedo en la dirección del eje ox en el intervalo dt es la cantidad dQ_{x1} :

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx}$$

o sea

$$dQ_{x1} = q_x dy dz dt - q_{x+dx} dy dz dt \quad (2-9)$$

La función q_{x+dx} es continua y convenientemente diferenciable en el intervalo dx , y se puede desarrollar en serie de Taylor³.

$$q_{x+dx} = q_x + (dq_x/dx)(x+dx-x)/1! + (d^2q_x/dx^2)(x+dx-x)^2/2! + \dots$$

simplificando:

$$q_{x+dx} = q_x + (dq_x/dx) dx + (d^2q_x/dx^2) dx^2 / 2 + \dots$$

Tomando los dos primeros términos de la serie anterior, la ecuación (2-9) se puede escribir de la forma siguiente:

$$dQ_{x1} = - (dq_x/dx) dx dy dz dt \quad (2-10)$$

De forma similar se calculan las cantidades de calor introducidas en el volumen elemental en la dirección de los otros dos ejes coordenados, oy y oz .

Así pues, la cantidad de calor dQ_1 , absorbido por el volumen considerado por conducción, vale:

$$dQ_1 = -(dq_x/dx + dq_y/dy + dq_z/dz) dx dy dz dt \quad (2-11)$$

Para hallar el segundo término del primer miembro de la ecuación (2-8) dQ_2 , representaremos la capacidad de las fuentes internas de calor con el símbolo q_v [W/m^3]. A este valor se le llama también densidad volumétrica de liberación de calor y es igual a la cantidad de calor liberado en la unidad de volumen en la unidad de tiempo.

³ Las series de Taylor pueden ser usadas para expandir una función alrededor de un punto (i.e. aproximar la función en un punto basado en el valor de la función en otro punto). $f(b) = f(a) + f'(a)(b-a)/1! + \dots + f^n(a)(b-a)^n/n!$

De aquí:

$$dQ_2 = q_v dv dt \quad (2-12)$$

El tercer término de la ecuación (2-8), que define el cambio de energía interna, se calcula a partir de la ecuación:

$$Q = mc_p \Delta T$$

Donde m = masa del sólido,

C_p = calor específico a volumen constante,

ΔT = incremento de temperatura,

expresando la masa del sólido en función de la densidad ρ y el volumen v , la ecuación queda:

$$dQ = c_p \rho (dT/dt) dt dv \quad (2-13)$$

Sustituyendo las expresiones (2-11), (2-12) y (2-13) en la ecuación (2-8), obtenemos:

$$dT/dt = -1/c_p \rho [dq_x/dx + dq_y/dy + dq_z/dz] + q_v / c_p \rho \quad (2-14)$$

Las proyecciones del vector densidad de flujo de calor sobre los ejes coordenados ox , oy y oz se calculan mediante la expresión:

$$q_x = -k dT/dx; \quad q_y = -k dT/dy; \quad q_z = -k dT/dz$$

Sustituyendo en la ecuación (2-14) las expresiones anteriores:

$$dT/dt = (k/c_p \rho) [d^2 T/dx^2 + d^2 T/dy^2 + d^2 T/dz^2] + q_v / c_p \rho \quad (2-15)$$

Si designamos por

$$d^2T/dx^2 + d^2T/dy^2 + d^2T/dz^2 = \nabla^2 T, \text{ el operador Laplaciano}$$

y

$$k/c_p \rho = \alpha, [\text{m}^2/\text{s}]$$

la ecuación (2-15) puede presentarse de la siguiente forma:

$$dT/dt = \alpha \nabla^2 T + q/c_p \rho \quad (2-15a)$$

La ecuación (2-15) se llama ecuación diferencial de la conducción.

Establece la relación entre las variaciones de temperatura en el tiempo y en cada punto del espacio en el que tiene lugar el proceso de conducción.

El factor de proporcionalidad de la ecuación (2-15a) representa una propiedad física de la sustancia y se llama *difusividad térmica*. Es esencial en el proceso de transmisión del calor en régimen transitorio y está relacionada con la velocidad de variación de la temperatura. Así como la conductividad térmica nos indica la capacidad del sólido para conducir el calor, la difusividad es la medida de su inercia térmica. De la ecuación (2-15) se deduce que en cada punto del espacio la variación de la temperatura con el tiempo es proporcional a α . En otras palabras, la velocidad de variación de la temperatura dT/dt en cada punto del sólido, es tanto mayor cuanto mayor sea la difusividad térmica α . De ahí se sigue que, a igualdad de todos los demás parámetros, la estabilización de la temperatura en todos los puntos del espacio es tanto más rápida cuanto mayor es la difusividad térmica, α , del sólido.

2.4. Transferencia de calor por convección.

Una placa de metal caliente se enfría con mayor rapidez cuando se coloca frente a un ventilador, que cuando se expone al aire en reposo. Decimos que el calor se disipó por convección y llamamos al proceso transferencia de calor por convección.

Considérese la placa caliente que se muestra en la figura 2.6.

La temperatura de la placa es T_w , y la temperatura del fluido es T_∞ . La velocidad de flujo aparecerá como se muestra, siendo reducida a cero en la placa como resultado de la acción de viscosidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

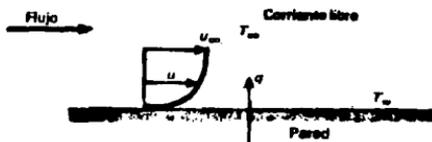


Fig. 2.6.- Transferencia de calor por convección en una placa.

Ya que la velocidad de la capa de fluido sobre la pared será cero, el calor deberá transferirse en aquel punto sólo por conducción. De este modo podríamos calcular la transferencia de calor utilizando la ecuación (2-4) con la conductividad térmica y el gradiente de la temperatura del fluido sobre la pared.

Hablamos de transferencia de calor por convección y necesitamos considerar la velocidad del fluido ya que el gradiente de temperaturas depende de la rapidez a la que el fluido conduce el calor; una velocidad alta produce un gradiente de temperatura más grande, y así sucesivamente. Por tanto el gradiente de temperatura sobre la pared depende del campo de flujo.

Para expresar el efecto total de la convección, utilizamos la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = hA (T_w - T_\infty) \quad (2-16)$$

La rapidez de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área de la superficie A. A la cantidad h se le llama coeficiente de transferencia de calor por convección.

Podemos anticipar que la transferencia de calor por convección, además de su dependencia de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad), tendrá cierta dependencia de la viscosidad del fluido. La viscosidad influye en el perfil de velocidad y, de manera

correspondiente, la rapidez de transferencia de energía en la región cercana a la pared.

2.5. Transferencia de calor por radiación.

En contraste con los mecanismos de conducción y convección, en donde está involucrada la transferencia de energía a través de un medio material, el calor también se puede transferir a regiones donde existe el vacío perfecto. En este caso, el mecanismo es la radiación electromagnética. A la radiación electromagnética que es propagada como resultado de una diferencia de temperaturas se le llama radiación térmica.

Consideraciones termodinámicas muestran que un radiador ideal, o cuerpo negro, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias en T^4 . Así,

$$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-17)$$

Donde σ es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan-Boltzman con el valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

Bibliografía.

- J. P. Holman, "Transferencia de Calor". Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México. Sexta Edición, Pp. 18-36.
- V. Isachenko, V. Osipova, A. Sukomel, "Transmisión del Calor". Boixareu Editores Marcombo, Barcelona, España. Pp. 19-35.
- Michael R. Lindeburg, "Mechanical Engineering Reference Manual". Professional Publications, Inc., Belmont, CA. Tenth Edition.
- R.W. Davidge, "Mechanical behaviour of ceramics". Cambridge University Press, July 1997. Pp. 118-124

3. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN.

III.1. Deformación Normal bajo Carga Axial.

Sea una barra BC , de longitud L y sección transversal A , que es suspendida del punto B .

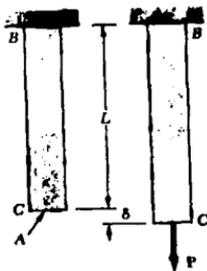


Fig. 3.1.- Barra BC de longitud L .

Si se aplica una fuerza P en el extremo C , la barra se alarga. Elaborando una gráfica de la magnitud de P contra la deformación δ (delta), se obtiene un determinado diagrama carga deformación.



Fig. 3.2.- Diagrama carga-deformación

Aunque este diagrama contiene información útil para el análisis de la barra estudiada, no puede utilizarse directamente para predecir la deformación de una barra del mismo material pero de dimensiones diferentes. En este caso vemos que hay una relación entre el alargamiento y la longitud de la barra δ / L . Esta relación introduce el concepto de *deformación*: Se define *deformación normal* en una barra bajo carga axial como el *alargamiento por unidad de longitud* de dicha barra. Representándola por ϵ (epsilon) se tiene:

$$\epsilon = \delta / L \quad (3-1)$$

Construyendo la gráfica del esfuerzo $\sigma = P/A$ en contraste con la deformación $\epsilon = \delta/L$ obtenemos una curva que es característica de las propiedades del material y no depende de las dimensiones de la probeta utilizada. Esta curva se denomina *diagrama esfuerzo-deformación*.

3.2 Diagrama Esfuerzo-Deformación.

El diagrama esfuerzo-deformación muestra una característica importante de los materiales. Para obtener este diagrama se realiza usualmente una *prueba de tensión* a una probeta del material. La probeta se coloca en una máquina de prueba que se usa para aplicar una carga **P**. Al aumentar **P**, se mide la distancia que hay entre dos marcas de la probeta que al incrementarse se registra una elongación del material $\delta = L - L_0$, que se registra para cada valor de **P**. Un segundo medidor se usa para medir y registrar el cambio en el diámetro de la probeta. De cada par de lecturas **P** y δ , se calcula el esfuerzo dividiendo a **P** por el área de la sección transversal inicial A_0 de la muestra; y la deformación ϵ dividiendo el alargamiento δ por la distancia original L_0 entre las dos marcas mencionadas. El diagrama esfuerzo-deformación se obtiene tomando ϵ como abscisa y σ como ordenada.

Es posible distinguir algunas características comunes entre los diagramas esfuerzo-deformación de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías sobre la base de estas características. Materiales *dúctiles* y materiales *frágiles*.

Los materiales dúctiles, que componen el acero estructural y muchas aleaciones de otros materiales, se caracterizan por su capacidad para *fluir* a temperaturas normales. Cuando se somete la probeta a carga creciente, su longitud aumenta primero linealmente con la carga y a una tasa muy lenta. Así la porción inicial del diagrama esfuerzo-deformación es una línea recta con una pendiente pronunciada.

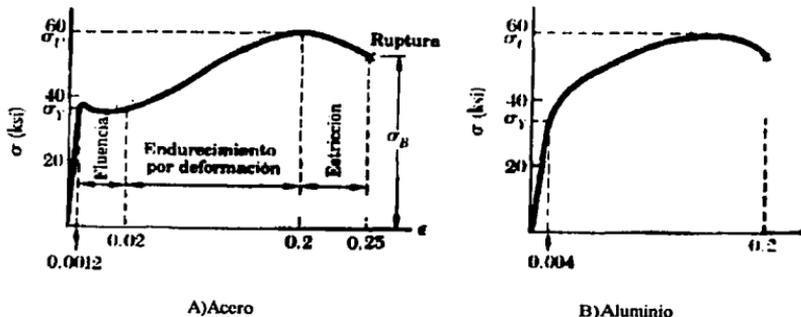


Fig. 3.3.- Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos

Sin embargo, después que se alcanza un valor crítico del esfuerzo, la probeta sufre grandes deformaciones con un pequeño aumento de la carga aplicada. Esta deformación ocurre por deslizamiento del material en superficies oblicuas y se debe principalmente a esfuerzos cortantes. El esfuerzo σ_y al cual se inicia la *fluencia* es llamado resistencia a la fluencia del material, el esfuerzo σ_U que corresponde a la carga máxima aplicada a la probeta es la *resistencia última* y el esfuerzo σ_B , correspondiente a la ruptura, es la *resistencia a la ruptura*.

Los materiales frágiles como fundición, cristal y la piedra se caracterizan porque la ruptura ocurre sin que se presente antes un cambio importante en la tasa de alargamiento.

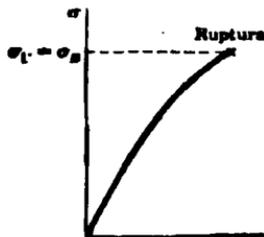


Fig. 3.4.- Diagrama esfuerzo-deformación para un material frágil típico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Así, para materiales frágiles no hay diferencia entre resistencia última y resistencia a la ruptura. También, la deformación en el momento de la ruptura es mucho más pequeña para materiales frágiles que para materiales dúctiles. Los esfuerzos normales son los principales causantes de la falla de los materiales frágiles.

3.3 Ley de Hooke. Módulo de Elasticidad.

La mayor parte de las estructuras se diseñan para sufrir pequeñas deformaciones que involucran sólo la parte lineal del diagrama esfuerzo-deformación. Para la parte inicial del diagrama, el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación ϵ y puede escribirse:

$$\sigma = E / \epsilon \quad (3-2)$$

Esta relación es la *ley de Hooke*, el coeficiente E se llama módulo de elasticidad del material o también *módulo de Young*. Como la deformación ϵ no tiene dimensiones, el módulo E se expresa en las mismas unidades del esfuerzo σ , o sea, en pascales, y en psi en el sistema inglés.

3.4 Comportamiento Elástico contra Comportamiento Plástico de un Material.

Si las deformaciones causadas en una probeta, por la aplicación de cierta carga, desaparecen al quitar la carga, se dice que el material se comporta *elásticamente*. El máximo valor del esfuerzo para el cual se obtiene un comportamiento elástico es el *límite elástico* del material. El material se

comporta elásticamente y linealmente siempre que se le mantenga por debajo del punto de fluencia (fig. 3.5).

Si se alcanza el punto de fluencia, sin embargo, al retirar la carga, el esfuerzo y la deformación decrecen linealmente a lo largo de una línea CD paralela a la parte recta AB de la curva de carga.

Si ϵ no vuelve a cero después de retirar la carga, entonces se ha producido una *deformación permanente o plástica* del material. Para la mayor parte de los materiales, la deformación plástica depende no sólo del valor máximo alcanzado por el esfuerzo sino también del tiempo transcurrido antes de retirar la carga. La parte de la deformación plástica que depende del esfuerzo se conoce como *deslizamiento* y la parte dependiente del tiempo, que también depende de la temperatura, se conoce como *flujo plástico (creep)*.

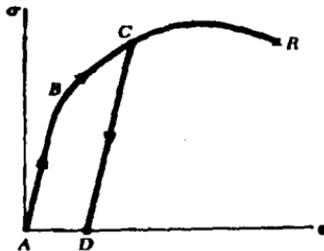


Fig. 3.5

III.5. Deformación Térmica.

Considérese una barra homogénea AB de sección constante, sobre una superficie lisa. (Fig. 3.6 a)

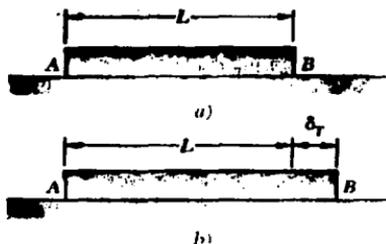


Fig. 3.6.

Si la temperatura de la barra se eleva en ΔT , se observa que la barra se alarga una cantidad δ_T que es proporcional al cambio de temperatura ΔT y a la longitud L de la barra (Fig. 3.6 b). Se tiene:

$$\delta_T = \alpha (\Delta T) L \quad (3-3)$$

Donde α es una constante característica del material, llamada *coeficiente de expansión térmica*. Como δ_T y L están expresados en unidades de longitud, α representa una cantidad *por grado C* o *por grado F* dependiendo de si la temperatura está expresada en grados Celsius o Fahrenheit.

Una deformación $\epsilon_T = \delta_T / L$ se asocia con el alargamiento δ_T . La ecuación anterior conduce a:

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (3-4)$$

La deformación ϵ_T es la *deformación térmica*, puesto que la causa el cambio de temperatura de la barra. En el caso estudiado aquí, *no hay esfuerzo asociado con la deformación ϵ_T* .

Supóngase ahora que la misma barra AB , de longitud L , se coloca entre dos soportes fijos a una distancia L el uno del otro (Fig. 3.7 a).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

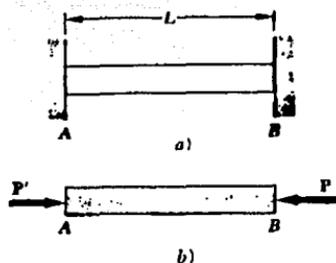


Fig. 3.7

De nuevo no hay esfuerzo ni deformación en esta condición inicial. Si se eleva la temperatura en ΔT , la barra no puede alargarse debido a las restricciones impuestas en los extremos; el alargamiento δ_T no se produce. Como la barra es homogénea y de sección constante, la deformación ϵ_T en cualquier punto es $\epsilon_T = \delta_T / L$, por tanto, nula. Sin embargo, los extremos ejercerán sobre la barra fuerzas iguales y opuestas P y P' después de que la temperatura se eleva, para evitar que se alargue (Fig. 3.7 b). Se sigue así que se ha creado en la barra un estado de esfuerzo (sin deformación correspondiente).

Este esfuerzo σ creado por el cambio de temperatura ΔT es conocido como *esfuerzo térmico*, y se presenta en los materiales refractarios del alto horno y se define como:

$$\sigma = -E \alpha (\Delta T) \quad (3-5)$$

3.6 Esfuerzos residuales.

Como se mencionó en la sección 3.4, al estirar una barra más allá del límite de fluencia, al momento de retirar la carga esta barra no recuperaba su longitud original pues había sido deformada permanentemente. Sin embargo,

todos los esfuerzos desaparecerían al retirar la carga. No se debe suponer que éste será siempre el caso. En realidad, cuando sólo algunas partes de una estructura sufren deformación plástica, o cuando diferentes partes de una estructura sufren diferentes deformaciones plásticas, los esfuerzos en varias partes de la estructura, en general, no regresarán a cero después de remover la carga. Esfuerzos, llamados *esfuerzos residuales*, permanecerán en las diferentes partes de la estructura.

Las deformaciones plásticas debidas a cambios de temperatura también pueden generar esfuerzos residuales. Por ejemplo, un pequeño tapón que debe soldarse a una placa grande. Se considerará el tapón como una barra AB que debe ser soldada a través de un pequeño agujero en la placa (fig. 3.8). Durante el proceso de soldadura, la temperatura de la barra se eleva a 1000°C . A esta temperatura el módulo de elasticidad, su rigidez y los esfuerzos serán casi nulos. Como la placa es grande su temperatura no subirá mucho con respecto a la temperatura ambiente de 20°C . Al completar la soldadura, la barra AB está a 1000°C , con esfuerzo cero y unida a la platina cuya temperatura es 20°C .

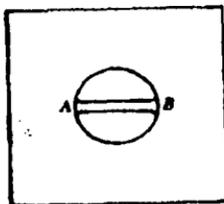


Fig. 3.8

Al enfriarse la barra, su módulo de elasticidad crece y a 500°C tendrá su valor normal de 200GPa. Resolviendo la ecuación (3-5) para ΔT y haciendo σ igual al esfuerzo de fluencia $\sigma = 300\text{Mpa}$ de un acero promedio, y $\alpha = 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ se tiene que el cambio de temperatura que ocasiona fluencia en la barra es:

$$\Delta T = -\sigma / E\alpha = -300\text{Mpa} / (200\text{Gpa})(12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = -125^{\circ}\text{C}.$$

Esto significa que la barra empezará a fluir a 375°C aproximadamente y seguirá fluyendo a un nivel de esfuerzo casi constante a medida que se enfría hasta la temperatura ambiente. Como resultado de esta acción de soldadura se ha generado un esfuerzo residual, próximo al límite de fluencia, en el tapón y en la soldadura.

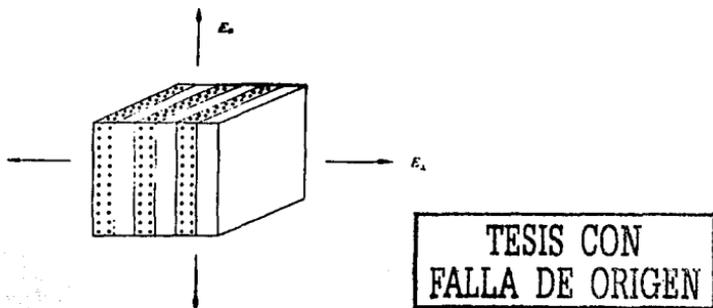
También ocurren esfuerzos residuales al enfriar metales previamente fundidos o laminados en caliente. En estos casos, las capas externas se enfrían más rápido que el núcleo central. Esto hace que las capas exteriores adquieran de nuevo su rigidez (E retorna a su valor normal) más rápido que el núcleo central. Cuando todo el elemento ha retornado a la temperatura ambiente, el núcleo central se habrá contraído más que sus capas externas. El resultado es que se crean esfuerzos residuales longitudinales de tensión, en el núcleo central, y de compresión en las capas exteriores.

Los esfuerzos residuales que dejan la soldadura, la fundición y el laminado en caliente pueden ser bastante grandes (del orden de magnitud del límite de fluencia). Estos esfuerzos se pueden remover, cuando es necesario, recalentando toda la pieza hasta 600°C y permitiéndole después enfriarse lentamente en un periodo de 12 a 24 horas.

3.7 Deformación y esfuerzos en materiales compuestos.

Considérese un material compuesto de dos fases con módulos de Young $E_{1,2}$ y fracciones de volumen $V_{1,2}$. Si se considera que este material tiene una construcción tipo *sandwich* como se muestra en la figura 3.9, al que se le aplica una fuerza ya sea normal o paralela a los bloques del material.

Fig.



3.9.- Material de estructura tipo *sandwich*, mostrando orientaciones paralelas y perpendiculares a los bloques del material.

Cuando la *fuerza* es aplicada *paralela* a los bloques la *deformación* en cada bloque es *constante*. El módulo de Young para el composite E_{\parallel} está dado por la siguiente fórmula:

$$E_{\parallel} = E_1 V_1 + E_2 V_2 \quad (3-6)$$

Cuando la *fuerza* es aplicada *normal* a los bloques la *fuerza* en cada bloque es *constante*, y el módulo de Young E_{\perp} está dado por:

$$E_{\perp} = E_1 E_2 / (E_2 V_1 + E_1 V_2) \quad (3-7)$$

El módulo de Young de los materiales prácticos cae dentro de estos límites. La figura 3.10 muestra algunos datos de Binns (1962) para un vidrio que contiene partículas de alúmina. El módulo de Young es para las fases de 70 y 400Gpa respectivamente. Por lo tanto sustituyendo en las ecuaciones (3-6) y (3-7) y considerando X el porcentaje de alúmina:

$$E_{\parallel} = (70\text{Gpa})(1-x) + (400\text{Gpa})(x)$$

$$E_{\parallel} = 330x + 70 \text{ Gpa}$$

$$E_{\perp} = (70)(400) / [(400)(1-x) + (70)(x)]$$

$$E_{\perp} = 28000 / [-330x + 400] \text{ Gpa}$$

El módulo de Young calculado para el modelo en paralelo da el valor más alto y el valor experimental para partículas de alúmina de tres tamaños cae dentro de los límites. Una aproximación a la constante elástica del sistema de dos fases es por tanto tomar el promedio de los dos límites.

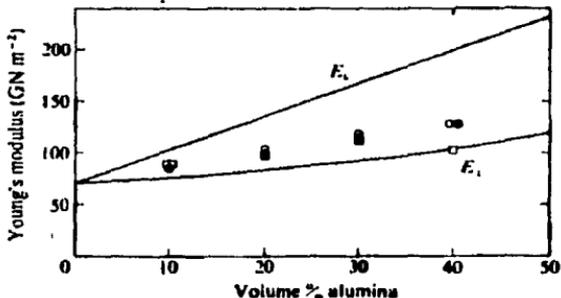


Fig.3.10.- Modulo de Young de composites de alúmina-vidrio en función del volumen de alúmina (%). o, partícula media de alúmina de 180 μ m; •, 45 μ m; □ 10 μ m. Se muestran curvas de acuerdo a las ecuaciones (3-6), (3-7). Binns (1962).

3.7.1 Materiales policristalinos.

El método de sacar un promedio del módulo elástico para estimar el comportamiento elástico de los materiales policristalinos es similar en principio al descrito en la sección anterior. Hay también dos casos posibles dependiendo ya sea de deformación homogénea o de fuerza homogénea; los cálculos originales fueron realizados respectivamente por Voigt (1928) y Reuss (1929). Hill (1952) ha demostrado que los estimados de Voigt y Reuss representan el módulo elástico máximo y el módulo elástico mínimo de un material policristalino. Hill sugirió que el promedio aritmético de los dos valores extremos deberían dar una buena aproximación práctica para materiales policristalinos. Los números que Chung (1963) mostró para magnesia policristalina se dan en la tabla 3.1. Se puede observar que la aproximación de Hill es razonable con los datos experimentales.

Tabla 3.1. Datos teóricos y experimentales para el módulo elástico de MgO a 25°C (Chung, 1963)

| | Voigt | Reuss | Hill | Experimental |
|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|
| Módulo de Young (Gpa) | 310.5 | 299.8 | 305.1 | 305 |
| Módulo de corte (Gpa) | 133.0 | 127.2 | 130.1 | 129 |
| Módulo de Poisson | 0.167 | 0.178 | 0.173 | 0.18 |

3.7.2 Porosidad.

Un cerámico poroso representa el caso límite de un material de dos fases, en el que una fase tiene dureza cero. El módulo Young disminuye cuando aumenta la porosidad pero el grado de disminución va siendo menor conforme la porosidad aumenta. Numerosos autores han propuesto ecuaciones para relacionar las constantes elásticas con la cantidad de porosidad. Muchas ecuaciones son de la forma:

$$E = E_0 (1 - f_1 p + f_2 p^2) \quad (3-8)$$

Donde E_0 es el módulo del material denso, f_1 y f_2 son constantes, y p es la fracción de porosidad. Las constantes dependen de la forma de los poros. Por lo tanto, un arreglo de poros en forma de disco en planos normales a la dirección del esfuerzo tendrán un efecto mayor en el módulo que su volumen equivalente de agujeros esféricos. MacKenzie (1950) ha considerado la situación teórica de agujeros esféricos. Para un módulo de Poisson típico de 0.3 las constantes f_1 y f_2 en la ecuación (3-8) son 1.9 y 0.9, suponiendo que los poros están separados en una matriz continua. Los datos de Coble y Kingery (1956) se dan en la figura 3.11 y los datos experimentales concuerdan con las predicciones teóricas de MacKenzie.

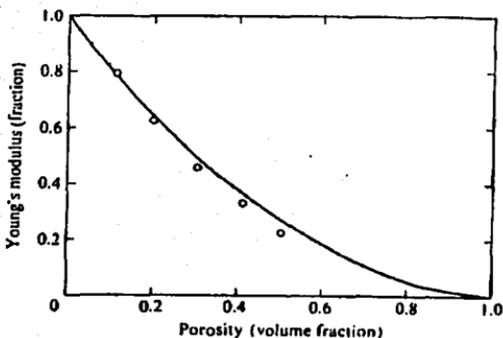


Fig.3.11.- Datos de Coble y Kingery (1956) muestran la variación del Módulo de Young en función de la porosidad en alúmina, comparado con estimados teóricos de la ecuación (3-8).

El significado físico de la ecuación (3-8) a baja porosidad, donde el término p^2 es pequeño, es que cada poro tiene un efecto equivalente al doble de su volumen. El efecto llega a ser menor a altas porosidades debido a que el efecto se reduce por cada poro conforme los poros se empiezan a acercarse uno al otro.

3.8 Comportamiento mecánico de cerámicos y compuestos cerámicos.

3.8.1 Cerámicos a temperatura ambiente.

Las curvas esfuerzo-deformación para materiales cerámicos densos a bajas temperaturas es lineal hasta que alcanzan la fractura. Un óxido policristalino de

alta dureza puede tener un esfuerzo de fractura σ_f con una tensión de 50000 psi o 35 kg/mm² (conocido como módulo de ruptura o MOR por sus siglas en inglés). Su módulo de Young puede estar cerca de 50X10⁶psi o 35000kg/mm². Por tanto muestra fracturas a una deformación ϵ de 0.001, o 0.1% de elongación. No existe deformación plástica visible antes de la fractura.

Esta inhabilidad para deformarse plásticamente hace que cualquier material cerámico por un lado (a) sea susceptible a fractura bajo carga concentrada y por otro lado (b) tienda a fracturarse en el punto más débil de su microestructura, y esto es en un poro, microfractura, uniones débiles, grano faltante, grano grande, inclusión, superficie dañada por maquinado, etc. (todas éstas se conocen como defectos del material).

El Módulo de ruptura a temperatura ambiente de óxidos cerámicos puros, está dado en pascales por la siguiente ecuación:

$$\text{MOR} = K[\Gamma E/c(1-\nu)^2]^{1/2} \cong 1.5 [\text{N/m}]^{1/2} [E/c]^{1/2} \quad (3-9)$$

Donde E es el módulo de Young en Pa, Γ es el “trabajo de fractura” (\geq energía de la superficie) en N/m, ν es el módulo de Poisson, y c es la longitud crítica del defecto en metros. Para granos arriba de $\sim 20\mu\text{m}$ o $2 \times 10^{-5}\text{m}$, $c \cong D$ (diámetro medio del grano).

El módulo de Young se aplica para tensión y para compresión; pero los esfuerzos de compresión en los cerámicos son de 5 a 10 veces el MOR. Esto es porque los defectos son comprimidos en vez de ser expandidos. Pero los cerámicos en compresión uniaxial fallan típicamente al corte ($\tau_{\max} = \sigma/2$).

No hay ductilidad perceptible, aunque la deformación ϵ al momento de la fractura puede ser de 0.005 a 0.01, o del 0.5% al 1%. La curva esfuerzo deformación permanece lineal, pues E permanece constante hasta el final.

3.8.2 Cerámicos a temperaturas moderadas.

Si elevamos la temperatura a incrementos de 100°C. En los cerámicos policristalinos, el módulo de Young disminuirá gradualmente conforme aumenta la temperatura. Permaneciendo por debajo de la *Temperatura Tammann*¹, esta disminución de E está sólo entre el 10-20%, y es casi lineal con la temperatura. De ninguna forma refleja un proceso de deformación activada por la temperatura.

Sólo hay algunas excepciones que se asemejan en los refractarios. Algunos cerámicos de alta temperatura de fusión han mostrado al principio un pequeño incremento en E cuando aumenta T, sobre los primeros 500°C o más, seguidos por una disminución normal. Esta tendencia se atribuye a la

¹ Temperatura Tammann.- Temperatura a la cual el cerámico sufre falla mecánica con cargas bajas. Esta temperatura está arriba de $\frac{1}{4}$ de la Temperatura de fusión.

disminución de esfuerzos internos. Otra excepción se encuentra en SiC; este cerámico no muestra dependencia alguna entre E y T hasta alcanzar al menos 1000°-1500°C, cuando está bien unido.

En cuanto el módulo de rigidez de los óxidos, G disminuye un poco más rápido con la temperatura que E, y por lo tanto el módulo de Poisson aumenta ($\nu=(E/2G)-1$).

Aun estando muy por debajo de la Temperatura Tammann, el Módulo de Ruptura promedio de los óxidos cerámicos de alto punto de fusión disminuye junto con E en términos de porcentaje respecto del valor de la temperatura ambiente. Este comportamiento persiste hasta 1000°-1200°C o más. Los esfuerzos de compresión disminuyen mucho más rápido, perdiendo la mitad o hasta 2/3 del valor a la temperatura ambiente a los 1100°C. De hecho, la curva de Esfuerzo a compresión contra la Temperatura empieza a disminuir a un cierto ángulo de la temperatura ambiente, después disminuye a un ángulo mucho mayor cuando la temperatura se incrementa al orden de los 1500°C.

Desde el punto de vista macroscópico, en este rango de temperatura el comportamiento elástico sigue en efecto. No se observa curvatura en el diagrama esfuerzo-deformación cerca de la fractura.

En óxidos cerámicos al contrario que los metales, aun en el caso químico más puro, hay una disparidad entre la dureza y la firmeza de los cristales y las fronteras intercristalinas. La fractura por corte en las fronteras de grano es la forma más común del inicio de la fractura aun a temperatura ambiente. En el orden de los 1000°C esto es un hecho.

Todavía no existe deformación plástica. Los cristales no se mueven por difusión y mucho menos por dislocaciones. Los más finos granos de óxidos muestran evidencia de un crecimiento de fractura. Además pierden dureza mucho más rápido conforme aumenta la temperatura. Las fracturas son iniciadas por los rompimientos de las fronteras de grano.

3.8.3 Cerámicos a altas temperaturas.

En algunos intervalos de alta temperatura el comportamiento común de los cerámicos policristalinos es mostrar una caída rápida en las curvas E contra T y MOR contra T. Esta caída se produce en un intervalo de 100°-200°C, después de la caída cada una de las propiedades del cerámico retiene sólo una fracción de su valor original. La curva esfuerzo-deformación cambia un poco al principio, después aumenta conforme aumenta T. Los cristales simples no muestran este comportamiento en este intervalo de temperatura.

En policristales la localización de esta caída de temperatura depende de la pureza química del material. Este punto en la temperatura de caída fue aumentado unos 500°C enfocándose en la pureza química de los cerámicos de MgO, BeO y Al₂O₃. Siempre ocurre una caída; aun en óxidos refractarios de 98.9, 99.9 y 99.9+% de pureza, la caída ocurre abajo de la temperatura Tammann; además, no hay evidencia de dislocación de granos a lo largo de las superficies con fractura (excepto para el MgO). En la prueba de MOR, a temperaturas mucho más elevadas de esta temperatura de caída pueden aparecer deformaciones del orden del 10% antes de la fractura, o incluso puede no existir fractura. La fractura en la prueba de MOR, arriba de esta temperatura de caída, es por un rompimiento progresivo enteramente intergranular.

Numerosos estudios de la *fluencia*² de los óxidos policristalinos han sido realizados a temperaturas superiores de la temperatura de caída en el MOR. La fluencia no se puede medir a temperaturas por debajo de esta temperatura de caída porque (a) la única deformación que existe es elástica, antes de la fractura y (b) el esfuerzo que se encuentra es esencialmente un esfuerzo de fractura.

El creep de los óxidos policristalinos ocurre en tres etapas. Primero ocurre un deslizamiento o corte de granos separados por capas de líquido de mayor o

² Creep.- Deformación plástica a una carga constante en función del tiempo.

menor viscosidad y mayor o menor tensión entre las caras. En la segunda etapa las capas de líquido permanecen unidas, el flujo es estable, el volumen permanece constante con aumento de la deformación. En la tercera etapa las capas de líquido son progresivamente rotas o separadas de los granos, se desarrollan huecos y el volumen aumenta ligeramente; aparece inestabilidad conforme los huecos se unen, y la fractura por corte ocurre donde la sección transversal de una capa llega a ser muy pequeña para soportar la carga.

El efecto del aumento de temperatura en la fluencia de los cerámicos es doble: (a) se produce más líquido, y (b) la viscosidad disminuye. El efecto del aumento de la carga a una temperatura fija es también doble: (a) la fluencia o deformación aumenta por $\epsilon = \sigma^a$, con $1 \leq a \leq 4$; y (b) la aparición de la tercera etapa es apresurada³.

El creep es una manifestación del flujo viscoso en un sistema de dos fases (líquido + sólido). La caída de la curva referida indica el inicio de la fundición-licuefacción de las fronteras de grano.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

³ Las capas líquidas son rotas progresivamente, se desarrollan huecos y el volumen aumenta ligeramente. Se crea inestabilidad y la ruptura por fractión ocurre donde la fracción de líquido unido es muy pequeña para soportar la carga.

3.8.4 Porosidad y efecto de tamaño de grano en cerámicos.

El tamaño de los granos afecta la dureza y el creep. El MOR o esfuerzo de fractura en tensión tiende a seguir $\sigma_t = aD^{-1/2}$ en texturas de baja calidad y $\sigma_t = a'D^{-1/2} + b$ cuando $D < 20 \mu\text{m}$. Aquí D es el diámetro de grano y a , a' y b son constantes. Los valores de la fluencia aumentan cuando disminuye el tamaño de grano.

La porosidad afecta todas las propiedades mecánicas. Las fórmulas que se aplican para el Módulo de Young y el módulo de ruptura son:

$$X = X_0(1-bP) \text{ y } X = X_0 \exp(-bP) \quad (3-9)$$

Donde X_0 es la propiedad a porosidad cero, X es la propiedad a la fracción de volumen P , y b es una constante para ajustar los datos. Estas dos formas son idénticas a porcentajes bajos de porosidad, pero la segunda es mejor aplicada sobre rangos amplios. Los valores de b en la ecuación exponencial están agrupados alrededor de 3 ó 4 para el MOR a temperatura ambiente, elevándose lentamente con la temperatura y agrupándose entre 4 ó 5 a 1000°C. Los valores de E están entre 2 ó 3 y 3 ó 4 respectivamente.

La tabla 3.2 ilustra la magnitud del ajuste hecho por esta ecuación exponencial para varias porosidades, dando la relación X/X_0 para $b=2,3,4,5$:

| Porosidad | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $X/X_m, b=2$ | 0.90 | 0.82 | 0.74 | 0.67 | 0.61 | 0.55 | 0.45 | 0.37 |
| $X/X_m, b=3$ | 0.86 | 0.74 | 0.64 | 0.55 | 0.47 | 0.41 | 0.30 | 0.22 |
| $X/X_m, b=4$ | 0.82 | 0.67 | 0.55 | 0.45 | 0.37 | 0.30 | 0.20 | 0.14 |
| $X/X_m, b=5$ | 0.78 | 0.61 | 0.47 | 0.37 | 0.29 | 0.22 | 0.14 | 0.08 |

Tabla 3.2 Relación X/X_0 para varias porosidades y valores b. Ec.(3.9)

Todo lo anterior aplica para comportamiento elástico, o sea sólo debajo de la temperatura de caída en las curvas MOR-T y E-T.

La tabla 3.3 muestra las propiedades mecánicas importantes de algunos cerámicos óxidos de una sola fase a temperatura ambiente. Los efectos característicos de la temperatura en el módulo de Young, en el módulo de ruptura y las curvas esfuerzo-deformación se muestran en la figura 3.11

| Composición | MOR | Fuerza de Compresión | Módulo de Young E | Módulo de Corte G | Módulo de Poisson ν |
|---|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| [tamaño de grano] | Kg/mm ² | Kg/mm ² | Kg/mm ² | Kg/mm ² | |
| Al ₂ O ₃ [1-2µm] | >46 | >280 | 42200 | 16600 | 0.27 |
| BeO [20 µm] | >28 | >210 | 40000 | 15500 | 0.30 |
| MgO [1-3 µm] | 29.5 | 84.5 | 32300 | 13000 | 0.24 |
| ZrO ₂ | >25 | 210 | 25000 | 9500 | 0.31 |
| MgAl ₂ O ₄ [10 µm] | 22.5 | 190 | 29500 | 11200 | 0.31 |
| Al ₆ Si ₂ O ₁₃ | 17.5 | 134 | 17600 | | |
| Mg ₂ SiO ₄ | 14 | 56 | (17600) | (estimado) | |
| ZrSiO ₄ | 14 | 70 | 14000 | | |
| B ₄ C | >35 | 280 | 45700 | 19000 | 0.20 |
| SiC | 42 | 140 | 49200 | 20400 | 0.20 |
| AlN | 28 | 210 | 35200 | | |
| BN | 12.6 | 31.5 | 10500 | | |

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas a Temp. Ambiente de Cerámicos de una Fase.

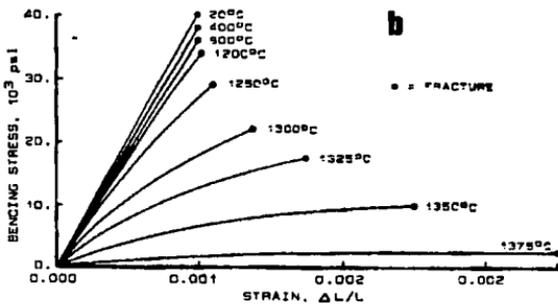
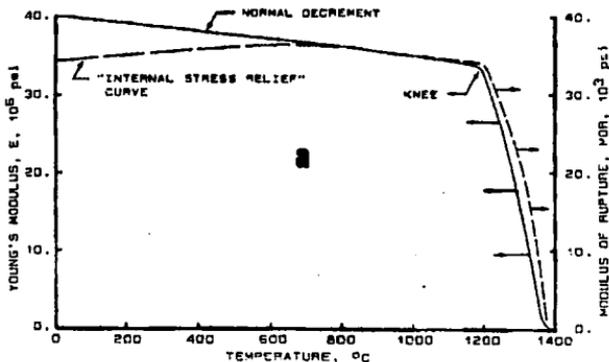


Fig.3.11.- Propiedades mecánicas típicas de un óxido cerámico: a. Módulo de Young y Módulo de Ruptura contra Temperatura. b. Esfuerzo plástico contra deformación contra temperatura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Bibliografía.

- Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston, "Mecánica de Materiales".
Mc Graw Hill, Segunda Edición, Colombia.
- R.W. Davidge, "Mechanical Behaviour of Ceramics". Cambridge
University Press (1979).
- Stephen C. Carniglia, Gordon L. Barna, "Handbook of Industrial
Refractories Technology", NOYES publications, New Jersey, USA,
1992.

4. REFRACTARIOS PARA LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO.

4.1 Clasificación de los refractarios.

Los refractarios son los materiales que se usan en la industria del acero para la construcción de los hornos, mezcladores de metal caliente y contenedores, así como en los tubos por donde los gases calientes son conducidos. Estos materiales son caros, y cualquier falla en los materiales refractarios resulta en una gran pérdida de tiempo, equipo y productos. Por esto los problemas de obtener refractarios adecuados para cada rama de la industria y escoger un refractario adecuado para cada propósito específico son de suprema importancia. Los costos están involucrados en la solución de estos problemas, pues un refractario adecuado para una aplicación no es necesariamente el que dura más tiempo, sino el que provee el mejor balance entre costo de instalación y desempeño. Estos balances nunca son fijos, pues están constantemente cambiando como resultado de la introducción de nuevos procesos o nuevos tipos de refractarios. La historia muestra que el desarrollo de los refractarios ha sido

principalmente como resultado de la presión para mejoras ocasionadas por la búsqueda de mejores procesos metalúrgicos. La velocidad con la que estos problemas de refractarios han sido resueltos es el principal factor en el avance de la industria del hierro y el acero.

Los materiales refractarios pueden ser clasificados de diferentes maneras, ninguna es completamente satisfactoria. Desde el punto de vista químico, las sustancias de los refractarios son de tres clases llamadas: ácidas, básicas y neutras. Teóricamente los refractarios ácidos no deberían estar en contacto con escorias básicas, gases o fumarolas, mientras que los refractarios básicos deberán ser expuestos sólo a estas condiciones. En realidad por varias razones, estas reglas son continuamente violadas. Incluso la existencia de un material totalmente neutro está en duda. Por esto la clasificación química es primariamente académica y de poco valor para todas las posibilidades de servicio. Las clasificaciones por uso como refractarios de horno alto o refractarios de horno de corazón abierto (horno Siemens) son generalmente muy amplias y están constantemente sujetas a revisión. De acuerdo a los minerales que contienen los refractarios pueden ser clasificados de dos formas: (a) con referencia al material en estado natural y (b) con referencia a los materiales predominantes después de procesados para su uso.

Para nuestro propósito la siguiente clasificación de acuerdo al material en estado natural ofrece las mejores posibilidades para un claro entendimiento del origen y naturaleza de los refractarios usados en la industria del acero.

4.1.1 Grupo de Sílice.

Cuarzo.- El cuarzo es el más comúnmente usado y el más puro de los materiales naturales con alto contenido de sílice. Diversas rocas con más del 98 por ciento de SiO_2 han sido utilizadas para la manufactura de ladrillos con alto contenido de sílice. Para el horno de coque, los ladrillos de sílice son hechos principalmente de cuarzo.

Arenisca (*Sandstone*).- La piedra de arena o arenisca es una roca sedimentaria que consiste esencialmente de granos de arena conglomerados, constituida de un 90 a 96 por ciento de SiO_2 , de 3 a 5 por ciento Al_2O_3 , y un poco de óxido de hierro y cal. Es relativamente suave y siempre estriada, permitiendo un fácil corte o separación en bloques o formas para uso en el estado natural para recubrimiento de goteras o paredes para escorias en hornos de corazón abierto (horno Siemens).

Hojas de Mica (*Mica Schist*).- Las hojas de mica son rocas de sílice altamente laminadas de composición similar a la piedra de arena pero

generalmente con un porcentaje menor de sílice. Así como la piedra de arena, la hoja de mica está lista para el corte y es usada en su estado natural aunque aplicaciones de este material en las plantas de acero son ahora insignificantes.

Arcillas con alto contenido de sílice (*Siliceous Fireclays*).- Son aquellas arcillas con un mínimo de 75 por ciento de SiO_2 que son empleadas en la manufactura de ladrillos con sílice y se caracterizan por un bajo porcentaje de impurezas como álcalis, tierras alcalinas y óxidos de hierro. Las arcillas que tienen menos contenido de sílice son usadas para morteros o recubrimientos con contenidos de sílice.

4.1.2 Grupo de Arcilla (*Fireclay Group*).

Químicamente las arcillas son silicatos de alúmina hidratada y están ampliamente distribuidos. Se identifican como (a) plásticos cuando están húmedos y divididos finamente (como si se pulverizaran, se humedecieran y se mezclaran), (b) rígidos cuando están secos y (c) vítreos cuando son calentados a una temperatura suficientemente alta. Ordinariamente estas variedades contienen altos porcentajes de impurezas de agua que hacen que no puedan ser usados como refractarios de alta temperatura. Estas impurezas incluyen álcalis, titanio,

compuestos de hierro, de calcio y magnesio, y materias orgánicas de diversas fuentes.

4.1.3 Grupo de Alta Alúmina.

Este grupo incluye aquellos materiales capaces de servir para la producción de refractarios con un contenido de alúmina mayor que el máximo que puede ser proporcionado por las arcillas, es decir, más del 47.5 por ciento de Al_2O_3 . Naturalmente hay dos clases de minerales, aquellos que son combinaciones de Al_2O_3 y H_2O , tipificados por bauxita y diásporo, y aquellos que son combinaciones de Al_2O_3 y SiO_2 , tipificados por silimanita, andalucita y cianita.

Bauxita y Diásporo.

Diásporo: el compuesto $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ es encontrado en una roca que consiste esencialmente de diásporo sujeta por arcilla. Por muchos años el diásporo fue el principal material natural para ladrillos de alta alúmina conteniendo más del 80 por ciento de Al_2O_3 , pero las reservas han disminuido y ahora el diásporo ha sido reemplazado por bauxita para estos productos.

Bauxita: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Silimanita, Andalucita y Cianita.- Todos estos minerales tienen la fórmula $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, y teóricamente contienen 62.9 por ciento de Al_2O_3 y 37.1 por ciento de SiO_2 . Al calentarse todos forman mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) y un vidrio con alto contenido de sílice, pero difieren en la facilidad con la que esta descomposición toma lugar, siendo la cianita la más fácil en convertirse (aprox. 2413°F , 1323°C) y silimanita la más difícil (aprox. 2785°F , 1529°C).

Alúmina plana (*Tabular Alúmina*): es un producto de un horno de alta temperatura que es casi Al_2O_3 pura, y está siendo ampliamente utilizada en refractarios de alúmina, directamente, o en combinación con arcilla como granos sintéticos de mullita que es producida en horno rotatorio u horno eléctrico. Es ampliamente usada en muchos productos de alta alúmina, particularmente aquellos que contienen más del 80 por ciento de alúmina.

Alúmina fundida (*Fused Alúmina*), producto de horno eléctrico, es usada en algunos productos especiales de alta alúmina que contienen usualmente más del 90 por ciento de Al_2O_3 .

4.1.4 Grupo Magnesio-silicatos.

Este grupo incluye las olivinas y serpentinas. Las olivinas tienen la fórmula general $2RO \cdot SiO_2$, en la que RO puede ser MgO, CaO, FeO, o MnO. El refractario más común de olivinas es una mezcla de fosterita (*forsterite*) ($2MgO \cdot SiO_2$) y fayalita (*fayalite*) ($2FeO \cdot SiO_2$).

Las serpentinas tienen la fórmula general $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. La Fosterita es el silicato de magnesio más deseable para los refractarios y generalmente es el producto final que se busca al emplear estos minerales.

4.1.5 Grupo Cal - Magnesia.

En este grupo han sido clasificadas todas las magnesitas (*magnesites*), brucitas (*brucites*) y dolomías (*dolomites*) naturales y sintéticas. Éstos constituyen el grupo más importante de refractarios para los procesos de fabricación de acero pues todos provienen del óxido de Magnesio, MgO, el mejor refractario básico conocido.

Magnesita natural.- La $MgCO_3$, rara vez es encontrada en estado puro, pero contiene diversos porcentajes de sílice, alúmina, óxidos de hierro y cal. Por esto en la calcinación el contenido de MgO está generalmente entre 80 a 85 por ciento. La sílice es la impureza que más afecta y varía de 4 a 10 por ciento.

La **Magnesia** es derivada sintéticamente de agua de mar, dolomía y brucita, o procesos que combinan agua de mar con dolomías. La producción de magnesia, conocida popularmente como magnesita de agua de mar o conocida técnicamente como periclasa es extensivamente utilizada en la manufactura de ladrillos básicos y refractarios granulares.

Brucita.- Es un hidrato de magnesio que es procesado en granos de magnesia contando con una pureza superior al 95 por ciento de MgO.

Dolomía.- Es un carbonato doble, $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_2$ que al calcinarse produce un 47.8 por ciento como CO_2 dejando 30.4 por ciento de CaO y 21.7 por ciento de MgO. Las impurezas principales son sílice y alúmina. Por lo que para un mejor uso del refractario, la dolomía debería contener más del 21 por ciento de MgO, menos del 1 por ciento de SiO_2 y menos de 0.5 por ciento de Al_2O_3 en estado natural. Desde el punto de vista de consumo, la dolomía excede a los otros refractarios ya sea en estado natural o calcinada; es la que más se usa en el mantenimiento de la parte baja del horno Siemens, y también es un material natural importante para ladrillos que protegen los contenedores para la fabricación de acero.

4.1.6 Grupo de Cromita.

Los minerales de cromo consisten de un vidrio altamente refractario (RO- R_2O_3) compuesto de FeO, MgO, Al_2O_3 y Cr_2O_3 en varias proporciones y menos silicatos refractarios asociados. Los minerales de Cromo con una amplia variedad de composiciones son adecuados para propósitos de refractarios; las principales limitaciones son cal, óxidos de hierro y sílice.

El mineral de cromo es usado ya sea solo o en varias combinaciones con magnesia en la manufactura de ladrillos, y como refractario granular o plástico para un sin número de propósitos.

4.1.7 Grupo de Carbonos.

Este grupo incluye grafitos naturales y artificiales y varios tipos de carbón, coque y cenizas.

Los depósitos de grafito están ampliamente distribuidos, siempre están mezclados con rocas calcáreas o siliciosas y requieren una purificación extensiva.

Los ladrillos de carbono son usados como refractarios, y pueden ser hechos de coque fundido, coque de petróleo o carbón de antracita. Tales refractarios están usándose ampliamente para refractarios de altos hornos y otras aplicaciones.

Las composiciones químicas típicas se dan en las siguientes tablas:

TABLA 4.1 Composiciones Químicas Típicas de los Refractarios de las plantas de acero.

| Refractory Type | Composiciones químicas (Por ciento) | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|-------------|--------------------------------|------------------|------------|---|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | Alcali | C |
| <i>Silica Brick</i> | | | | | | | | | |
| High-Purity | 96.4 to 97.4 | 0.1 to 0.4 | — | 0.1 to 0.2 | 2.2 to 3.4 | 0.3 to 2.1 | 0.1 | 0.1 | — |
| Coke-Oven | 95.5 to 96.5 | 0.6 to 1.2 | — | 0.1 to 0.2 | 2.0 to 3.5 | 0.4 to 0.7 | 0.1 | 0.1 to 0.4 | — |
| <i>Sandstone</i> | 89.6 to 96.1 | 1.8 to 2.8 | — | — | 0.1 to 1.4 | 0.5 to 1.6 | 0.2 to 0.5 | 0.6 to 1.2 | — |
| <i>Fused-Silica</i> | 99.6 to 99.8 | 0.1 to 0.2 | — | — | 0.0 to 0.2 | 0.0 to 0.2 | — | 0.1 to 0.2 | — |
| <i>Semi-Silica Brick</i> | 69.6 to 79.0 | 18.0 to 26.9 | — | 0.1 to 0.4 | 0.1 to 0.4 | 0.6 to 2.0 | 0.8 to 1.6 | 0.2 to 0.4 | — |
| <i>Fireclay Brick or Shapes</i> | | | | | | | | | |
| Stopper-Rod Sleeves | 58.1 to 61.6 | 30.0 to 34.0 | — | 0.2 to 0.6 | 0.3 to 0.4 | 2.7 to 3.1 | 1.7 to 1.8 | 2.4 to 2.6 | — |
| Steel-Teeming Nozzles | 52.4 to 62.3 | 29.0 to 36.9 | — | 0.9 to 1.0 | 0.3 | 2.8 to 4.3 | 1.6 to 1.9 | 3.0 to 3.3 | — |
| Ladle Brick; Bloating Type | 60.0 to 61.3 | 28.0 to 30.8 | — | 0.5 to 0.8 | 0.2 to 0.5 | 2.3 to 5.3 | 1.3 to 1.5 | 3.6 to 4.2 | — |
| Ladle Brick; Volume-Stable Type | 53.4 to 61.0 | 30.6 to 40.6 | — | 0.4 to 0.6 | 0.2 to 0.4 | 1.1 to 2.7 | 1.4 to 2.4 | 0.9 to 4.2 | — |
| Low Duty | 53.0 to 69.0 | 25.0 to 34.0 | — | 0.4 to 0.6 | 0.3 to 0.6 | 2.3 to 3.4 | 1.0 to 2.0 | 1.8 to 2.9 | — |
| Intermediate Duty | 56.0 to 70.0 | 25.0 to 36.0 | — | 0.5 to 0.6 | 0.2 to 0.4 | 1.8 to 3.4 | 1.3 to 1.9 | 1.0 to 2.7 | — |
| High Duty | 51.0 to 59.0 | 35.0 to 40.0 | — | — | 0.3 to 0.5 | 1.6 to 2.5 | 2.0 to 3.0 | 1.5 to 2.6 | — |
| Super Duty | 50.2 to 54.0 | 40.0 to 46.0 | — | — | 0.1 to 0.5 | 0.8 to 2.3 | 2.1 to 2.5 | 0.2 to 1.4 | — |
| <i>High-Alumina Brick</i> | | | | | | | | | |
| 50% Al ₂ O ₃ | 43.0 to 47.0 | 47.0 to 51.0 | — | 0.5 to 0.6 | 0.5 to 0.6 | 0.9 to 1.6 | 2.2 to 2.4 | 0.8 to 1.3 | — |
| 60% Al ₂ O ₃ | 27.7 to 37.0 | 58.0 to 67.0 | — | 0.1 to 0.6 | 0.1 to 0.3 | 0.9 to 2.7 | 1.7 to 3.0 | 0.2 to 1.2 | — |
| 70% Al ₂ O ₃ | 19.4 to 28.0 | 68.0 to 76.7 | — | 0.1 to 0.2 | 0.1 to 0.3 | 0.9 to 2.2 | 2.0 to 3.3 | 0.2 to 1.2 | — |
| 80% Al ₂ O ₃ | 8.5 to 17.1 | 78.0 to 86.5 | — | 0.1 to 0.2 | 0.1 to 0.4 | 0.7 to 1.7 | 2.5 to 3.2 | 0.1 to 0.6 | — |
| 90% Al ₂ O ₃ | 3.0 to 10.0 | 87.5 to 95.8 | — | 0.0 to 0.2 | 0.1 to 1.9 | 0.2 to 1.1 | 0.1 to 2.6 | 0.2 to 0.9 | — |
| 100% Al ₂ O ₃ | 0.4 to 1.1 | 97.7 to 99.0 | — | 0.0 to 0.1 | 0.1 to 0.2 | 0.1 to 0.3 | 0.0 to 0.3 | 0.1 to 0.3 | — |
| Mullite | 12.4 to 29.3 | 67.5 to 86.5 | — | 0.0 to 0.1 | 0.1 to 0.4 | 0.1 to 1.4 | 0.1 to 2.8 | 0.2 to 0.6 | — |
| Fused-Cast | 0.1 to 1.3 | 93.5 to 99.5 | — | — | 0.1 to 0.3 | 0.1 to 0.2 | — | 0.3 to 4.0 | — |
| <i>Fireclay or High Alumina Monoliths</i> | | | | | | | | | |
| Fireclay Plastics | 50.0 to 55.0 | 40.0 to 45.0 | — | — | 0.2 to 0.5 | 1.0 to 2.5 | 2.0 to 3.0 | 0.5 to 1.6 | — |
| 2000°F 1093°C Castables | 44.0 to 74.0 | 20.0 to 40.0 | — | — | 5.4 to 16.5 | 3.1 to 6.8 | 1.4 to 2.8 | 0.6 to 2.0 | — |
| 2250°F 1232°C Castables | 38.0 to 45.0 | 30.0 to 40.0 | — | — | 7.6 to 14.0 | 2.0 to 5.2 | 1.5 to 2.1 | 0.6 to 1.5 | — |
| 2700°F 1482°C Castables | 39.0 to 46.0 | 40.0 to 52.0 | — | — | 4.2 to 6.5 | 0.5 to 3.6 | 1.6 to 2.6 | 0.6 to 1.2 | — |
| 3000°F 1648°C Castables | 2.0 to 32.0 | 54.0 to 96.0 | — | — | 2.5 to 5.9 | 0.1 to 1.3 | 0.1 to 2.6 | 0.1 to 0.4 | — |
| 60% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 28.1 to 41.3 | 54.1 to 66.0 | — | 0.1 to 0.4 | 0.1 to 0.3 | 0.3 to 2.1 | 0.7 to 2.8 | 0.2 to 1.7 | — |

TESS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 4.1 (Continuación) Composiciones Químicas Típicas de los Refractarios de las plantas de acero.

| Refractory Type | Composiciones químicas (Por ciento) | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------|------------------|------------|----------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | Alcali | C |
| 70% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 5.8 to 26.2 | 66.0 to 75.5 | ---- | 0.1 to 0.3 | 0.1 to 0.4 | 0.9 to 2.4 | 1.6 to 4.1 | 0.2 to 2.6 | ---- |
| 80% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 7.2 to 17.2 | 75.8 to 85.1 | ---- | 0.0 to 1.3 | 0.3 to 2.8 | 0.3 to 2.8 | 1.6 to 3.1 | 0.0 to 1.2 | ---- |
| 90% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 0.0 to 11.0 | 72.3 to 95.0 | ---- | 0.0 to 0.2 | 0.0 to 54 | 0.0 to 0.9 | 0.2 to 2.5 | 0.1 to 0.8 | ---- |
| 100% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 0.0 to 0.3 | 97.7 to 99.8 | ---- | ---- | ---- | 0.1 to 0.5 | 0.2 to 2.4 | 0.0 to 0.3 | ---- |
| Mullite Plastics or Ramming Mixes | 23.8 to 36.4 | 59.7 to 72.9 | ---- | 0.1 to 0.3 | 0.1 to 0.2 | 0.5 to 1.2 | ---- | 0.2 to 1.7 | ---- |
| <i>Basic Brick</i> | | | | | | | | | |
| Magnesite; Unburned or Fired | 0.4 to 4.5 | 0.1 to 1.0 | 0.1 to 0.9 | 91.7 to 98.3 | 0.6 to 3.8 | 0.1 to 2.3 | ---- | ---- | ---- |
| Magnesite-Chrome; Unburned | 1.8 to 8.3 | 5.5 to 14.1 | 6.1 to 15.0 | 49.5 to 82.0 | 0.8 to 1.8 | 2.3 to 8.4 | ---- | ---- | ---- |
| Magnesite-Chrome; Fired | 1.8 to 4.4 | 2.5 to 10.0 | 6.7 to 17.1 | 60.8 to 80.7 | 1.0 to 1.5 | 2.3 to 11.5 | ---- | ---- | ---- |
| Magnesite-Chrome; Direct-Bonded | 1.4 to 2.5 | 6.5 to 10.5 | 10.3 to 18.1 | 58.8 to 65.5 | 0.6 to 1.1 | 4.3 to 10.5 | ---- | ---- | ---- |
| Magnesite-Chrome; Rebonded | 1.5 to 3.0 | 6.6 to 8.4 | 16.5 to 18.5 | 60.0 to 64.2 | 0.6 to 1.1 | 9.6 to 10.7 | ---- | ---- | ---- |
| Magnesite-Chrome; Fused-Cast | 2.0 to 3.0 | 6.9 to 8.1 | 17.5 to 18.5 | 58.8 to 62.0 | 0.8 to 1.1 | 9.5 to 11.9 | ---- | ---- | ---- |
| Chrome-Magnesite; Unburned | 3.5 to 5.0 | 17.5 to 22.4 | 18.8 to 24.4 | 37.0 to 49.0 | 0.7 to 1.4 | 8.8 to 11.5 | ---- | ---- | ---- |
| Chrome-Magnesite; Fired | 3.4 to 5.1 | 8.8 to 26.7 | 18.1 to 24.5 | 29.5 to 52.5 | 0.7 to 1.4 | 8.5 to 14.6 | ---- | ---- | ---- |
| Chrome; Fired | 4.9 to 8.3 | 27.3 to 29.1 | 29.8 to 32.8 | 18.4 to 22.5 | 0.5 to 0.7 | 12.0 to 14.6 | ---- | ---- | ---- |
| Spinel Bonded; Unburned or Fired | 1.7 to 1.9 | 10.0 to 15.9 | 0.0 to 0.9 | 76.5 to 87.0 | 0.9 to 1.4 | 0.6 to 9.3 | ---- | ---- | ---- |
| <i>Basic Monolithic Materials</i> | | | | | | | | | |
| Dead-Burned Natural Magnesite | 4.4 to 8.1 | 1.0 to 2.8 | 0.1 to 0.4 | 72.5 to 87.5 | 2.1 to 7.2 | 3.8 to 14.3 | ---- | ---- | ---- |
| Dead-Burned Dolomite | 0.3 to 6.7 | 0.1 to 2.3 | ---- | 32.5 to 43.0 | 45.5 to 56.9 | 0.3 to 10.2 | ---- | ---- | ---- |
| Bottom Ramming Materials | 0.6 to 3.2 | 0.2 to 1.4 | 0.0 to 0.8 | 92.1 to 98.4 | 0.7 to 1.2 | 0.2 to 0.9 | ---- | ---- | ---- |
| Bottom Patching Materials | 4.3 to 13.2 | 0.5 to 8.4 | 0.1 to 7.8 | 47.0 to 88.5 | 0.8 to 42.4 | 1.3 to 13.0 | ---- | ---- | ---- |
| Plastic Chrome Ore | 5.6 to 14.8 | 11.9 to 35.8 | 24.0 to 42.4 | 11.2 to 23.5 | 12.0 to 21.1 | 0.1 to 0.6 | ---- | ---- | ---- |
| <i>Pitch-Bearing Basic Refractories</i> | | | | | | | | | |
| Low-Flux Dolomite Type | 0.3 to 1.0 | 0.1 to 0.6 | 0.1 to 0.3 | 38.0 to 43.0 | 50.0 to 57.0 | 0.2 to 1.1 | ---- | ---- | 4 to 5 |
| Dolomite; Magnesite Type | 0.5 to 1.5 | 0.2 to 0.6 | 0.0 to 0.3 | 60.0 to 66.0 | 35.0 to 38.0 | 0.3 to 1.5 | ---- | ---- | 4 to 5 |
| Magnesite Type | 0.5 to 3.8 | 0.2 to 1.0 | 0.0 to 0.4 | 88.1 to 98.1 | 0.9 to 6.2 | 0.1 to 3.0 | ---- | ---- | 2 to 5** |
| <i>Carbon Brick</i> | | | | | | | | | |
| Graphite Base | 1.0 to 2.5* | 1.0 to 2.5* | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | 96 to 98 |
| Anthracite Base | 5.0 to 10.0* | 5.0 to 10.0* | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | 88 to 94 |
| Anthracite Base; Hot Pressed | 15.0 to 20.0* | 15.0 to 20.0* | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | 79 to 84 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| * Al ₂ O ₃ plus SiO ₂ | | | | | | | | | |
| ** Burned-impregnated type 2 to 3 per cent carbon; pitch-bonded or tempered type 4 to 5 percent carbon. | | | | | | | | | |

26

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 4.2.- Algunas propiedades físicas de los refractarios de las plantas de acero

| Refractory Type | Apparent Porosity | Bulk Density | Modulus of Rupture (MPa) | |
|---|-------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | % | g. per cc. | At Room Temperature | |
| | | | At 1260°C | |
| <i>Silica Brick</i> | | | | |
| High-Purity | 19.2 to 26.2 | 1.72 to 1.89 | 3.2 to 7.5 | ---- |
| Coke-Oven | 21.0 to 30.0 | 1.70 to 1.86 | 2.8 to 10.3 | ---- |
| Sandstone | 5.5 to 22.9 | 2.04 to 2.48 | 4.14 to 12.3 | 1.0 to 12.3 |
| Fused-Silica | 15.0 to 24.5 | 1.60 to 1.75 | 2.6 to 10.7 | ---- |
| Semi-Silica Brick | 23.4 to 30.8 | 1.77 to 2.05 | 2.2 to 4.1 | ND* |
| <i>Fireclay Brick or Shapes</i> | | | | |
| Stopper-Rod Sleeves | 13.7 to 21.5 | 2.06 to 2.20 | 10.3 to 60.4** | ---- |
| Steel- Teeming Nozzles | 12.3 to 17.4 | 2.14 to 2.23 | 40.3 to 110** | ---- |
| Ladle Brick; Bloating Type | 9.1 to 17.7 | 2.14 to 2.39 | 7.3 to 19.0 | ---- |
| Ladle Brick; Volume-Stable Type | 9.3 to 19.9 | 2.13 to 2.27 | 6.2 to 22 | ---- |
| Low Duty | 18.0 to 21.0 | ---- | 6.2 to 10.3 | ---- |
| Intermediate Duty | 18.0 to 21.0 | ---- | 6.2 to 11.0 | ---- |
| High Duty | 4.2 to 30.4 | 1.81 to 2.49 | 2.5 to 20.1 | ---- |
| Super Duty | 5.3 to 21.5 | 2.06 to 2.46 | 2.4 to 23.2 | 5.5 to 13.0 |
| <i>High-Alumina Brick</i> | | | | |
| 50% Al ₂ O ₃ | 20.0 to 24.0 | 2.00 to 2.16 | 6.9 to 10.3 | ---- |
| 60% Al ₂ O ₃ | 13.0 to 28.4 | 2.07 to 2.56 | 3.9 to 20.2 | 1.4 to 9.5 |
| 70% Al ₂ O ₃ | 14.6 to 28.6 | 2.25 to 2.79 | 5.8 to 25 | 2.5 to 9.9 |
| 80% Al ₂ O ₃ | 14.3 to 28.7 | 2.45 to 2.97 | 4.6 to 30.5 | 2.2 to 37.9 |
| 90% Al ₂ O ₃ | 15.5 to 26.8 | 2.67 to 3.00 | 6.9 to 10.3 | 3.1 to 24.5 |
| 100% Al ₂ O ₃ | 19.0 to 27.6 | 2.84 to 3.07 | 8.3 to 24.4 | 3.0 to 17.6 |
| Mullite | 12.0 to 24.1 | 2.34 to 2.66 | 8.2 to 25.2 | 2.4 to 27.6 |
| Fused-Cast | 0.9 to 3.1 | 3.18 to 3.50 | 24.1 to 41.4 | 16.5 to 26.2 |
| <i>Fireclay or High Alumina Monoliths</i> | | | | |
| Fireclay Plastics | 20.1 to 26.8 | 1.96 to 2.22 | 0.2 to 4.2 | ---- |
| 2000°F 1093°C Castables | 29.9 to 40.4 | 1.18 to 2.59 | 0.9 to 8.9 | ---- |
| 2250°F 1232°C Castables | 27.6 to 37.5 | 1.66 to 2.06 | 1.4 to 6.4 | ---- |
| 2700°F 1482°C Castables | 28.4 to 37.8 | 1.71 to 2.15 | 1.2 to 10.1 | ---- |
| 3000°F 1648°C Castables | 26.9 to 34.7 | 1.87 to 2.77 | 0.7 to 9.1 | ---- |
| 60% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 15.8 to 30.9 | 2.07 to 2.93 | 0 to 7.4 | 1.7 to 7.3 |
| 70% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 17.4 to 30.3 | 2.33 to 2.65 | 0.2 to 8.1 | 0.4 to 9.6 |
| 80% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 17.3 to 30.7 | 2.40 to 2.96 | 0.7 to 5.9 | 1.5 to 9.6 |
| 90% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 12.7 to 30.4 | 2.68 to 3.09 | 0.4 to 13.8 | 2.2 to 14.1 |
| 100% Al ₂ O ₃ Plastics or Ramming Mixes | 14.8 to 23.8 | 2.14 to 3.02 | 0 to 15.2 | 0.8 to 10.7 |

TABLA 4.2 (Continuación)- Algunas propiedades físicas de los refractarios de las plantas de acero

| Refractory Type | Apparent Porosity | Bulk Density | Modulus of Rupture (MPa) | |
|---|-------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | % | g. per cc. | At Room Temperature | |
| | | | At 1260°C | |
| <i>Basic Brick</i> | | | | |
| Magnesite; Unburned or Fired | 15.2 to 23.8 | 2.70 to 2.95 | 10.8 to 24.2 | 0.6 to 18.3 |
| Magnesite-Chrome; Unburned | 17.5 to 22.0 | 2.80 to 3.02 | 6.4 to 16.1 | 1.0 to 3.0 |
| Magnesite-Chrome; Fired | 15.9 to 19.6 | 2.88 to 3.16 | 3.9 to 6.1 | 0.7 to 2.1 |
| Magnesite-Chrome; Direct-Bonded | 15.5 to 19.0 | 2.90 to 3.10 | 4.1 to 9.0 | 8.3 to 17.2 |
| Magnesite-Chrome; Rebonded | 13.0 to 15.2 | 2.95 to 3.16 | 6.2 to 17.9 | 13.8 to 17.9 |
| Magnesite-Chrome; Fused-Cast | 12.0 to 16.2 | 3.03 to 3.21 | 13.8 to 17.2 | 10.3 to 20.7 |
| Chrome-Magnesite; Unburned | 18.8 to 21.0 | 2.97 to 3.15 | 9.9 to 16.7 | 1.7 to 2.1 |
| Chrome-Magnesite; Fired | 18.3 to 26.5 | 2.81 to 3.15 | 6.1 to 10.0 | 2.9 to 11.1 |
| Chrome; Fired | 16.6 to 18.5 | 3.16 to 3.40 | 9.6 to 16.7 | 0.4 to 1.1 |
| Spinel Bonded; Unburned or Fired | 15.3 to 21.5 | 2.74 to 2.97 | 9.5 to 21.2 | 2.3 to 6.3 |
| <i>Basic Monolithic Materials</i> | | | | |
| Bottom Ramming Materials | ---- | 2.69 to 2.83 | 7.6 to 12.5 | 0.7 to 2.5 |
| Bottom Patching Materials | 3.7 to 21.7 | 2.72 to 3-08 | ---- | ---- |
| Plastic Chrome Ore | 17.8 to 24.1 | 2.75 to 3.13 | 1.0 to 9.4 | 0.7 to 2.1 |
| <i>Pitch-Bearing Basic Refractories</i> | | | | |
| Low-Flux Dolomite Type | ---- | ---- | 6.2 to 10.3 | ---- |
| Dolomite; Magnesite Type | ---- | ---- | 6.9 to 11.0 | ---- |
| Magnesite Type | ---- | ---- | 9.0 to 10.7 | 10.3 to 20.7 |
| <i>Carbon Brick</i> | | | | |
| Graphite Base | 15.0 to 17.0 | 1.65 to 1.72 | 24.1 to 27.6 | ---- |
| Anthracite Base | 19.0 to 23.0 | 1.50 to 1.55 | 12.4 to 21.4 | ---- |
| Anthracite Base; Hot Pressed | 20.0 to 22.0 | 1.64 to 1.68 | 8.3 to 10.3 | ---- |

*ND Not determined. **Compressive Strength.

Bibliografía.

- Norton, F.H. "Refractories", 3rd. Ed. NY, Mc Graw Hill, 1949.
- Harbison Walker Refractories Company, Modern Refractory practice; 3rd. Ed.; Pittsburgh, PA., The Company, 1961.
- General Refractories Company, Refractories. Philadelphia, PA; The Company, 1949.

5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS REFRACTARIOS Y SU APLICACIÓN PARA ALCANZAR LAS CONDICIONES DE SERVICIO.

Entre los requerimientos de los procesos de las plantas de acero se encuentra una variedad amplia de refractarios. Obviamente estos requerimientos deben ser igualmente diversificados. El análisis de las condiciones de servicio muestra en general que los refractarios deben soportar:

- 1) Todos los rangos de temperatura hasta 3200 °F (1584 °C).
- 2) Cambios repentinos en la temperatura (Choque térmico).
- 3) Esfuerzos, principalmente de compresión, a altas y bajas temperaturas.
- 4) La acción de las escorias, variando de ácidas a básicas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5) La acción de los metales disueltos, siempre a altas temperaturas y capaces de ocasionar grandes presiones y fuerzas.

6) La acción de los gases, incluyendo SO_2 , CO , Cl , CH_4 , H_2O , y óxidos volátiles y sales de metales, hasta metales volátiles. Todos son capaces de penetrar y reaccionar con los ladrillos. El SO_2 puede reaccionar con óxidos en el ladrillo para formar sales fácilmente diluibles. El CO al penetrar un ladrillo de arcilla, se descompone en C y CO_2 en la presencia de carburos de hierro, el carbón que se deposita en el ladrillo causa su desintegración. El Zinc en su fase de vapor tiene un efecto similar. A relativamente bajas temperaturas el vapor de agua produce un cambio químico en los refractarios de dolomía y magnesita. Y casi todos los refractarios son aptos de ser sujetos a hierros volátiles y álcalis.

7) La acción del polvo en los gases, que puede fluir o no fluir, y ácido o básico.

8) El impacto y las fuerzas abrasivas a altas y bajas temperaturas, como aquellos en las paredes de los hornos altos.

Los refractarios están sujetos a una o más de las condiciones arriba mencionadas al mismo tiempo, pueden ser requeridos para funcionar como almacenadores de calor, como en los verificadores; como conductores de calor, como en las paredes de las cámaras de coque; o como un aislante.

Con tal cantidad de requerimientos de servicio es necesario tener formas de determinar si un refractario es adecuado para una aplicación dada. Sin embargo, es difícil, o en muchos casos, imposible, duplicar estas amplias condiciones de servicio en el laboratorio. Aun cuando éste no sea el caso, el costo y el tiempo son barreras para el desarrollo de pruebas prácticas que proveerán la información necesaria para la selección positiva del refractario adecuado. Por tanto, las pruebas estándar que se han planeado, generalmente dentro de las limitaciones mencionadas (costo y tiempo), proveen medidas del desempeño de estos refractarios, las cuales aunque son imprescindibles para el control de calidad, deben ser relacionadas con conocimientos fundamentales adicionales del comportamiento de los refractarios y con las observaciones de servicio antes de que puedan ser usados efectivamente por los consumidores. En muchos casos, la información no está disponible para unir esta brecha, y pruebas especiales deben ser implementadas.

Por lo tanto en comparación con otros materiales de construcción, los refractarios parecen sufrir en el grado de precisión con la que deben ser aplicados para satisfacer alguna necesidad. Para apreciar esta situación es necesario saber algo acerca del comportamiento a altas temperaturas de los refractarios y reconocer que este comportamiento es el resultado de una compleja combinación de factores físicos y químicos. Algunos de estos factores son fijos, pues

constituyen las propiedades inherentes de los materiales empleados, o de los productos de la reacción con otros materiales en servicio. Otros pueden ser variados con ciertos límites para producir cierto comportamiento deseado. En el efecto combinado de su dureza en frío y caliente, su resistencia al desgaste, su resistencia a la deformación bajo carga en caliente, su permeabilidad y otras propiedades medidas estos factores casi siempre se oponen uno al otro; por lo que un refractario en particular puede representar uno o más arreglos, sacrificando la excelencia de una característica para alcanzarla en otra más importante para una aplicación dada. En la siguiente discusión de características de los refractarios, estos asuntos son enfatizados más que los detalles de las pruebas usadas en la evaluación de los refractarios.

5.1.1. Fusión o Temperatura de Ablandado.

La fusión de la mayoría de los materiales refractarios no es un corte claro, sino más o menos una transición gradual de sólido a líquido. La cantidad de líquido que puede ser tolerada por un refractario y aun dejarlo en condición de servicio es gobernada por la viscosidad del líquido y el tipo de cristalización de las fases sólidas presentes. Por ejemplo, los refractarios de arcilla pueden formar líquido y empezar a suavizarse a temperaturas tan bajas como 980°C (1800°F),

pero debido a la alta viscosidad del líquido, su temperatura de servicio puede ser cientos de grados más alta.

5.1.2. Porosidad y permeabilidad.

Todos los refractarios contienen una cierta cantidad de huecos; la cantidad, tamaño, y continuidad de éstos tienen una influencia importante en el comportamiento del refractario. La *porosidad aparente* indica el porcentaje del volumen total que es espacio de poros abiertos, y por lo tanto es la medida del área de superficie disponible de reacción con escorias y gases. La *porosidad total* es el porcentaje del volumen total que consta de huecos, ya sea abiertos o cerrados, y por lo tanto, dependiendo de la naturaleza del material, del método de manufactura y del grado de calcinación, puede exceder ligeramente la porosidad aparente o ser más del doble. El efecto de la porosidad en las propiedades de los refractarios será discutido más adelante, pero en general, el incrementar la porosidad afecta la resistencia en frío, la resistencia a la deformación bajo carga en caliente, la capacidad de calentamiento, la conductividad térmica y la resistencia al ataque por gases y escorias. Con ciertos límites la porosidad mejora la resistencia al desgaste, pero esto sólo se puede conseguir en ladrillos de baja porosidad; como regla general, se puede ganar mucho más en el desempeño de

los refractarios que poseen la porosidad más baja. Las porosidades típicas de varias clases de refractarios son dadas en la tabla 4.2.

La porosidad tiene que ver un poco con la *permeabilidad*, que es la medida de la velocidad de difusión de líquidos y gases a través del refractario, y que por tanto está gobernada por el tamaño y número de poros o canales conectados que están continuos de un lado del refractario hasta el otro. La permeabilidad a los líquidos aumenta con la temperatura alta pues las viscosidades de los líquidos disminuyen, mientras que para los gases ocurre el efecto contrario pues sus viscosidades aumentan con altas temperaturas. Mientras que la permeabilidad no es comúnmente determinada, es sin duda importante en aplicaciones como paredes del horno donde la desintegración puede ocurrir como resultado de penetración de monóxido de carbono y subsecuentes depósitos de carbono en el ladrillo.

5.1.3. Densidad total y Peso específico.

Como la porosidad, la *densidad total* de los refractarios es usada como una indicación de la relación huecos/sólidos, pero no tiene sentido sin la referencia del *peso específico* del refractario. Por esto, la densidad total de un ladrillo de cromo teniendo un peso específico de 4, pero una porosidad del 25% es mucho mayor que la densidad total de un ladrillo de arcilla cuya porosidad es del 10%, pero cuyo peso específico es sólo 2.6. La densidad total puede ser expresada en varias formas, las más comunes son gramos por centímetro cúbico (peso específico total), libras por pie cúbico, u onzas por pulgada cúbica. Considérese la masa de un material refractario en un volumen dado, un incremento en la densidad total de este refractario aumenta la dureza, la estabilidad de volumen, la capacidad de calentamiento, la resistencia a la penetración de escorias, y generalmente, resistencia al desgaste estructural o desgaste provocado por la vitrificación causada por los flujos con polvo y escoria.

El peso específico de un refractario quemado puede variar sustancialmente de aquel del material crudo del que está hecho, debido a la conversión de los minerales constituyentes. Por ejemplo, la cuarzita con un peso específico de 2.65 se convierte con el calor a cristobalita y tridimita con pesos específicos, respectivamente, de 2.32 y 2.26, por lo que los pesos específicos resultantes de

ladrillos de sílice quemados reflejan el grado de conversión, y es la prueba más confiable para adecuación de tratamiento de quemado. La conversión de cianita a mullita es otro ejemplo. La tabla 4.2 muestra densidades típicas de varios cerámicos, alta alúmina, carbón y otros refractarios.

5.1.4. Expansión Térmica y Cambios de Volumen.

Desde las primeras etapas de su manufactura y a través de su vida de servicio, los refractarios son sujetos a varios tipos de cambio de volumen. Todos estos cambios pueden afectar la uniformidad del producto y el desempeño del servicio, por esto son de especial importancia para el usuario y el fabricante. El más familiar de estos cambios de volumen es la *expansión térmica* reversible, o *dilatación* que es una característica de prácticamente todos los materiales, manifestada por un incremento en volumen con el calentamiento y una comparable disminución de volumen con el enfriamiento. Debido a las dificultades involucradas en medir el incremento real de volumen en tres dimensiones, es más práctico medir los cambios en una dimensión: por lo tanto la *expansión lineal* es tomada como una medida de la expansión cúbica. La figura 5.1 muestra las curvas típicas de expansión lineal para varios tipos de refractarios.

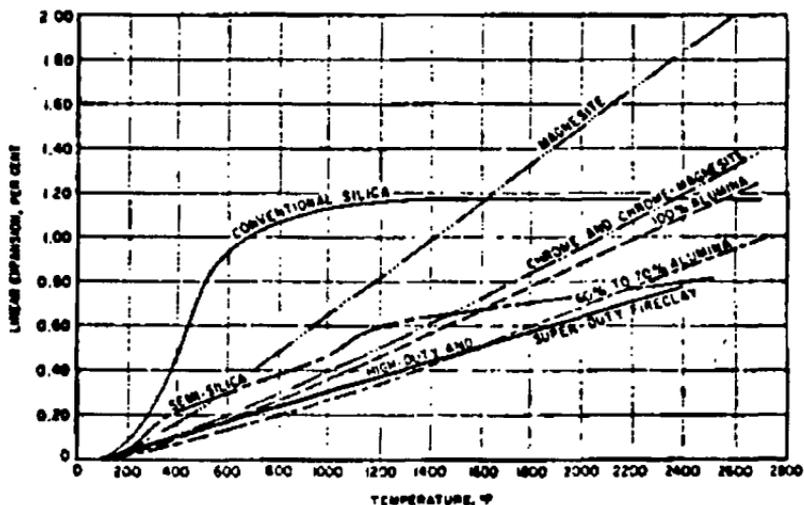


Fig.5.1.- Curvas Típicas de la expansión lineal de varios tipos de refractarios.

Los refractarios que tienen una expansión uniforme promedio generalmente presentan las mínimas dificultades cuando las temperaturas del horno fluctúan ampliamente, y de éstas, aquéllas con la expansión total más baja, como regla general, son menos sujetos a desgaste térmico. Tal es el caso de los refractarios de arcilla. Los ladrillos de sílice, como se mencionó previamente poseen proporciones variables de los minerales de sílice, cristobalita, tridimita y cuarzo sin convertir, dependiendo del tratamiento térmico. Cada una de estas formas de sílice tiene su propia expansión característica con cambios repentinos acompañando inversiones de formas de baja a alta temperatura, por tanto la

curva para un ladrillo de sílice refleja su composición mineral. Sin embargo, la mayoría de las expansiones de ladrillos de sílice de todas las fuentes toma lugar debajo de 570°C (1060°F), por lo que, si se toma el debido cuidado al enfriar y calentar debajo del calor de rojo vivo, este ladrillo se comporta admirablemente. De hecho, uno de los mayores problemas en la aplicación de ladrillos básicos en techos de horno de corazón abierto viene con la expansión a alta temperatura continua del ladrillo básico, el cual, aunque es uniforme, causa un trabajo de estos techos. Estos cambios de temperatura se dan en rangos que no tienen efecto alguno en los techos hechos de ladrillo de sílice.

Los *cambios permanentes de volumen* pueden ser de expansión o de contracción. Este último se encuentra en moldes refractarios de secado, particularmente ladrillo de barro, y debe ser controlado efectivamente para hacer un producto uniforme. Durante el tratamiento térmico del refractario pueden ocurrir contracciones. Finalmente, si el refractario es usado a temperaturas por arriba de la de su tratamiento térmico, pueden ocurrir más contracciones que pueden ser causadas por flujos con polvo o escorias y su subsecuente vitrificación.

En los refractarios quemados también puede ocurrir una expansión permanente. Los ladrillos de sílice, por la disminución en peso específico de las

formas de sílice de altas temperaturas, aumentarán aproximadamente 13% en el quemado.

5.1.5. Resistencia en frío.

La resistencia mecánica de los refractarios, determinada por los módulos de ruptura o pruebas de presionado en frío, es generalmente mucho más grande que aquella que se requiere para alcanzar cualquier carga en construcción. Sin embargo, la resistencia adecuada es una importante característica de los refractarios. Los refractarios pueden ser manejados de forma intensa antes de que sean finalmente puestos en servicio, y es naturalmente deseable que resistan estos manejos con un mínimo de ruptura, abrasión y esquinas rotas. Los ladrillos de arcilla ligeramente quemada, particularmente si son presionados en seco, pueden ser muy delicados y fácilmente rompibles pero inclusive poseer una resistencia a la compresión arriba de las 1000 libras por pulgada cuadrada. La resistencia en frío refleja el tratamiento térmico que un refractario recibe en su fabricación, y este tratamiento térmico afecta la porosidad, densidad total, refractoriedad bajo carga, y resistencia a la abrasión. La información general de cualquier refractario específico quemado puede ser obtenida de pruebas de dureza con suficiente aproximación. Por esta razón los requerimientos de resistencia en frío son siempre usados en la especificación de los refractarios. Los rangos en pruebas de

compresión y módulos de ruptura para varios tipos de refractarios se muestran en la tabla IV.2.

5.1.6. Resistencia y Comportamiento bajo cargas a Temperaturas elevadas.

La resistencia en frío de los refractarios es gobernada principalmente por la cantidad de uniones cristalinas presentes; la resistencia en caliente es gobernada por los cambios traídos en estas uniones cristalinas por el calor. Generalmente, con temperatura elevada, el cristal gradualmente se convierte en líquido viscoso, aunque la temperatura inicial de suavizado y el rango de temperatura del flujo viscoso puede variar ampliamente entre los diferentes tipos de refractarios. Por esto, a diferentes grados, todos los refractarios a ciertas temperaturas presentan flujo plástico, y si es sujeto a presión, el comportamiento subsecuente dependerá (a) de la cantidad de presión y la duración e intensidad de su aplicación, (b) de la cantidad y viscosidad del líquido presente, y (c) de la estructura cristalina de los sólidos.

Cuando los refractarios son cargados fuerte y rápidamente, como en una prueba normal de compresión, fallarán por corte hasta que se alcancen temperaturas a las que contengan líquido de tan baja viscosidad que la deformación ocurre instantáneamente. Bajo estas condiciones, la resistencia a la compresión o módulo de ruptura puede materialmente no cambiar debajo de

temperaturas de la formación inicial del líquido, pero disminuirán rápidamente tan pronto estas temperaturas se excedan por grandes cantidades.

El comportamiento de los refractarios bajo cargas ligeras y sostenidas es más significativo comparado con el comportamiento cuando están en servicio, y numerosas pruebas han sido creadas para medir la cantidad o rango de deformación ocurrido bajo condiciones específicas de tiempo, temperatura y tensión. Mientras que las pruebas prolongadas son especialmente informativas para el usuario de los refractarios; todas las pruebas estándar son de relativamente poca duración, aunque se está dando atención a las pruebas largas, particularmente aquellas enfocadas a la determinación de la casi imperceptible fluencia de los refractarios a temperaturas alrededor de la formación inicial de líquido.

Los refractarios de arcilla tienen el más largo rango de suavizado y son más susceptibles a la deformación plástica. Bajo condiciones estándares de prueba, consistiendo en calentar ladrillo de 9 pulgadas bajo una carga de 25 libras por pulgada cuadrada durante 4 ½ horas a la temperatura de prueba (1350°C para ladrillos de alto desempeño; 1450°C para ladrillos de super desempeño) y manteniéndolo por 1 ½ horas; la temperatura de la deformación inicial y la cantidad total de deformación dependerá del contenido de flujo, del grado de quemado, y de la porosidad. Impurezas como cal, magnesio, óxidos de

alcalis, bajarán la temperatura de la formación inicial del líquido y la viscosidad de este líquido, y por tanto aumentarán la deformación. El ladrillo altamente quemado mostrará una mayor resistencia a la carga que el ladrillo ligeramente quemado hecho del mismo barro, debido en gran parte al gran desarrollo de la mullita, pero principalmente debido al hecho de que el alto quemado ha desarrollado una fase más cristalina de refractario que forma un líquido de mayor viscosidad a temperaturas de prueba.

Al incrementar la porosidad de un ladrillo en particular, se disminuye su capacidad de resistir la deformación bajo carga, pues los huecos proveen la posibilidad del ladrillo de comprimirse y además disminuyen la cantidad de refractario disponible en cierto volumen para resistir la presión. La temperatura de la deformación inicial bajo carga variará ampliamente para un ladrillo dado con desviaciones de las condiciones estándar de prueba. Por ejemplo, un ladrillo de arcilla deformándose inicialmente a 1230°C (2250°F) en una prueba estándar, puede no deformarse hasta 1290°C (2350°F) con una menor carga o un calentamiento más rápido, y contrariamente, puede deformarse a una temperatura tan baja como 1090°C (2000°F) con una carga mucho mayor o con esta temperatura mantenida por varias horas.

El comportamiento del ladrillo convencional de alta alúmina unido por barro bajo carga es similar al del ladrillo de arcilla, aunque el rango de temperatura de la deformación plástica será generalmente mayor con contenidos más altos de alúmina. Sin embargo, en los nuevos ladrillos, (más densos) hechos de materiales naturales más puros y técnicas de unión superiores, hacen que la resistencia a la deformación bajo carga haya mejorado. De hecho, el pegamento y no el contenido de Al_2O_3 manda en el comportamiento de cargas bajo calor en los ladrillos modernos de alta alúmina.

Debido a su fuerza, su cristalización cerrada y su pureza, el ladrillo de sílice muestra poca evidencia de deformación plástica bajo carga, permaneciendo rígido bajo una carga de 25 o aun 50 libras por pulgada cuadrada hasta que falla por corte a temperaturas que varían de $1650^{\circ}C$ ($3000^{\circ}F$) hasta $1700^{\circ}C$ ($3100^{\circ}F$). Esta última temperatura, sin embargo, es alcanzada sólo por los tipos más puros que contienen un máximo de 0.5% de las impurezas de Al_2O_3 , TiO_2 , y alcalis. Debido a su fuerte estructura cristalina, el ladrillo de sílice puede estar más del 30% derretido a la temperatura de falla.

El comportamiento del ladrillo básico bajo carga a alta temperatura variará dependiendo de la estructura de la unión presente. En ladrillos hechos de cromo natural o magnesitas impuras, la formación de silicatos líquidos de baja viscosidad a temperaturas de 1420 a $1540^{\circ}C$ (2600 a $2800^{\circ}F$) producirán falla

por corte. Los ladrillos de magnesita que tienen altos contenidos de MgO (o sea menos impurezas) y cantidades controladas de CaO, SiO₂ pueden soportar cargas por largos periodos de tiempo a temperaturas hasta de 1760°C (3200°F). La resistencia a la carga a alta temperatura de refractarios hechos de combinaciones de cromo natural y magnesita puede ser muy buena por la reacción del magnesio con los silicatos presentes para producir una unión de fosterita (2MgO SiO₂). Normalmente, la refractoriedad bajo carga de refractarios básicos quemados hechos de cromo natural y magnesita serán mejores que los ladrillos sin quemar de composición similar; pues ocurren reacciones mucho más completas en el ladrillo quemado antes de que se apliquen cargas a altas temperaturas.

En los últimos años, se ha puesto un énfasis creciente en los módulos de ruptura de los ladrillos básicos medidos a temperaturas por debajo de donde ocurre falla bajo carga a alta temperatura. Esta propiedad es otra vez característica de la estructura de unión en los ladrillos básicos. Como es de esperarse, con el aumento de la temperatura, el ladrillo sin quemar pierde fuerza pues la unión química es quemada, normalmente los valores de los módulos de ruptura son de 100 a 400 libras por pulgada cuadrada a 1260°C (2300°F). El ladrillo básico quemado, sin embargo, variará en su módulo de ruptura a 1260°C de 100 lb/in² hasta 1600 lb/in². Normalmente, las altas resistencias a elevadas temperaturas son asociadas con uniones diferentes a las uniones convencionales

de silicatos, como las uniones cristalinas formadas de adiciones de Al_2O_3 o Cr_2O_3 al magnesio, o las uniones cristalinas directas magnesio-magnesio o magnesio-cromo producidas por temperaturas de alto quemado de composiciones especiales. Como resultado de las variaciones en la estructura de unión presente, la fluencia de largo tiempo bajo carga a alta temperatura para el ladrillo básico hecho de magnesita y cromo natural variará desde un 2 por ciento de deformación después de 24 horas a 1600°C (2900°F) hasta fallar después de sólo una hora a temperaturas tan bajas como 1510°C (2750°F).

Los refractarios de carbón muestran muy poco o nada de pérdida de resistencia y cero deformación bajo carga a lo largo de las temperaturas de la planta de acero. Los datos típicos de pruebas de carga se muestran en la Tabla 4.3.

5.1.7. Capacidad Calorífica y Conductividad Térmica.

La *capacidad calorífica* de un refractario a una temperatura dada está en función de su densidad y su calor específico a dicha temperatura. La *conductividad térmica* es la medida de la velocidad de la transmisión del calor a través del refractario. Ambas propiedades son incrementadas cuando aumenta la densidad y por tanto disminuidas cuando la porosidad aumenta. Como los

refractarios pueden ser usados para contener, almacenar o transmitir calor, la conductividad térmica variará ampliamente dependiendo su aplicación.

Existe un rango amplio de conductividades en los refractarios comerciales, pero no siempre es posible usar el refractario cuya conductividad es adecuada para un trabajo dado. Por tanto, en la mayoría de los casos, es deseable contener el calor, pero como se dijo anteriormente en la mayor parte de los casos una alta densidad era deseable desde un punto de vista de servicio. Con refractarios usados para transmisión y almacenamiento de calor no existe conflicto de propiedades, pues se necesita una alta densidad para (a) una buena estabilidad con alto almacenamiento de calor y (b) una buena conductividad.

Las curvas típicas de la conductividad térmica para varios ladrillos refractarios se muestran en la figura 5.2. Se puede ver que a las temperaturas comunes de operación de una planta de acero, las diferencias en conductividad encontradas en estos refractarios a bajas temperaturas son reducidas grandemente.

Sin embargo, el flujo de calor a través de las paredes del horno en servicio puede diferir considerablemente de los cálculos. La conductividad cambiará con las alteraciones de la estructura y de la composición de la cara caliente; la velocidad a la cual el calor es removido de la cara fría afecta el flujo a través de

la pared; y la presión del gas en el horno tiene una gran efecto, no sólo en el flujo de calor sino también en la vida del refractario, pues las presiones positivas dirigirán el calor hacia adentro del refractario, incrementando la profundidad de vitrificación y flujo.

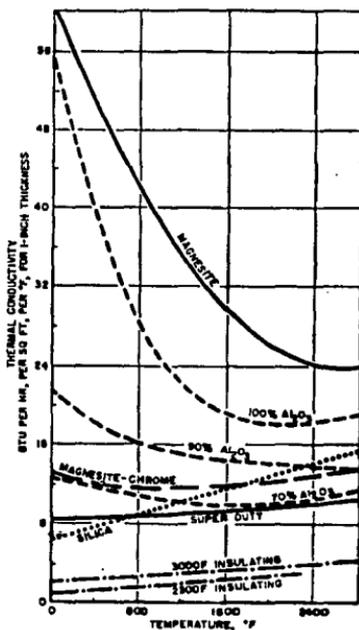


Fig. 5.2.- Curvas típicas de la Conductividad Térmica de varios ladrillos refractarios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.1.8. Resistencia al choque térmico (descarapelamiento).

Una de las mayores causas del desgaste de los refractarios es el *descarapelamiento*, que es la separación de piezas del refractario de la cara caliente, exponiendo las superficies frescas. El descarapelamiento puede resultar de la expansión o contracción rápida de la cara caliente del refractario con cambios repentinos de temperatura, llamados *descarapelamiento térmico*. También el descarapelamiento puede resultar de cambios en la cara caliente causados por una absorción de flujo o vitrificación produciendo zonas en el ladrillo que difieren en expansión o sensibilidad al choque térmico del ladrillo original, o puede ocurrir un encogimiento, provocando que las piezas se separen, lo que se conoce como *descarapelamiento estructural*. Un tercer tipo de descarapelamiento llamado *descarapelamiento mecánico*, puede resultar de abuso mecánico, como remover la acumulación de escorias de las superficies del refractario, o pueden ser causados por cambiar cargas y esfuerzos.

Las propiedades de los refractarios que más influyen en la resistencia al descarapelamiento son la expansión térmica, la elasticidad (habilidad para ceder en el esfuerzo sin rotura), y la dureza. Por su baja expansión térmica, los refractarios de arcilla como clase tienen la mejor resistencia al descarapelamiento, pero existen amplias variantes pues la elasticidad y

resistencia son altamente afectados por el grado de quemado, el tamaño de partículas y la porosidad. Por esto un ladrillo ligeramente quemado, rugoso y poroso tiene mayor elasticidad y alta resistencia al descarapelamiento térmico a bajas temperaturas que un ladrillo altamente quemado y denso, pero puede esperarse que falle por descarapelamiento estructural a alta temperatura, debido al gran encogimiento y absorción de flujo.

Los refractarios básicos generalmente no tienen la mejor resistencia al choque térmico por su alto coeficiente de expansión térmica. Los ladrillos de cromo tienen poca resistencia al descarapelamiento térmico. Los ladrillos de magnesita pueden tener de pobre a buena resistencia dependiendo de su composición. Los ladrillos unidos químicamente hechos de combinaciones de magnesita y cromo ordinariamente tienen una resistencia mejorada al descarapelamiento térmico sobre los ladrillos de cromo o magnesita; sin embargo el ladrillo quemado variará ampliamente en resistencia al descarapelamiento de acuerdo a la estructura de unión que esté presente.

La resistencia de los ladrillos de sílice varía de muy pobre a excelente, dependiendo si están sujetos a fluctuaciones de temperatura debajo o arriba de los 600°C (1100°F) respectivamente.

5.1.9. Resistencia a la abrasión.

La resistencia de los refractarios a la abrasión y erosión está principalmente en función de la dureza. Como la dureza es gobernada por el grado de quemado, alguna correlación también existe entre la pérdida de la abrasión y la porosidad y densidad. Mientras que no se ha adoptado una prueba estándar para la abrasión por calor hay algunas indicaciones de que la relación pérdida de resistencia-abrasión se mantiene a altas temperaturas, en cuyo caso la resistencia a la abrasión puede esperarse que no cambie apreciablemente debajo de los 1980°C (2000°F), pero disminuirá a altas temperaturas.

5.2. Variación de las propiedades de los refractarios en función de la temperatura.

5.2.1 Punto de fusión.

Temperatura Tammann.

Las temperaturas de fusión de los compuestos refractarios son importantes por diversas razones. Primero, la difusión de los átomos o iones en un sólido está en función de la temperatura. La difusión en compuestos iónicos es significativa arriba de $\frac{1}{4}$ de la temperatura de fusión.

Algunos aspectos de la *corrosión* se basan en la velocidad de difusión del material refractario. Si la corrosión limita la vida de un refractario, esta vida puede ser extendida escogiendo una composición con una temperatura de fusión más alta.

El *flujo plástico* también está en función de la difusión. Debajo de $\frac{3}{4}$ de la temperatura de fusión, un compuesto cristalino no muestra comportamiento plástico bajo carga mecánica, pero por arriba de esta temperatura límite conocida como *Temperatura Tammann* ocurre fluencia en función del tiempo y de la carga; conduciendo a ruptura por fluencia o deformación permanente.

Otro proceso controlado por la velocidad de difusión es el *sinterizado*, mostrando por lo general un rechupe o encogimiento.

Definiciones de la micro estructura de los refractarios.

Las diversas regiones que se encuentran en la microestructura de los materiales refractarios pueden alcanzar su punto de fusión a temperaturas muy diferentes. Esto es porque la mayoría de los materiales refractarios en la industria están compuestos de más de una fase pues son mezclas heterogéneas. Una sola fase es por definición una región homogénea, o hablando colectivamente todas las regiones de un sólido con la misma composición. Las fases sólidas se dividen en *soluciones* (composiciones químicas variables con ciertos límites) y

sustancias (elementos o compuestos de composiciones fijas representados por fórmulas químicas). Una sola fase generalmente contiene varias orientaciones en sus fronteras de grano, pues entre los cristales los arreglos están orientados muy diferente aunque tienen la misma composición. Estas fronteras son diferentes de las fronteras de fase de los materiales heterogéneos pues no ocurren cambios de composición.

Los refractarios son fabricados para trabajar a elevadas temperaturas con uno o dos compuestos que evitan la corrosión. Estos compuestos representan las fases principales del refractario. El punto de fusión de estas fases es el primero de varios indicadores del comportamiento térmico, químico y mecánico a altas temperaturas.

5.2.1.1 Puntos de fusión de los óxidos.

Óxidos Simples. Los compuestos óxidos binarios que se encuentran en la naturaleza se muestran en la figura 5.3. El punto de fusión de cada uno se da en °C.

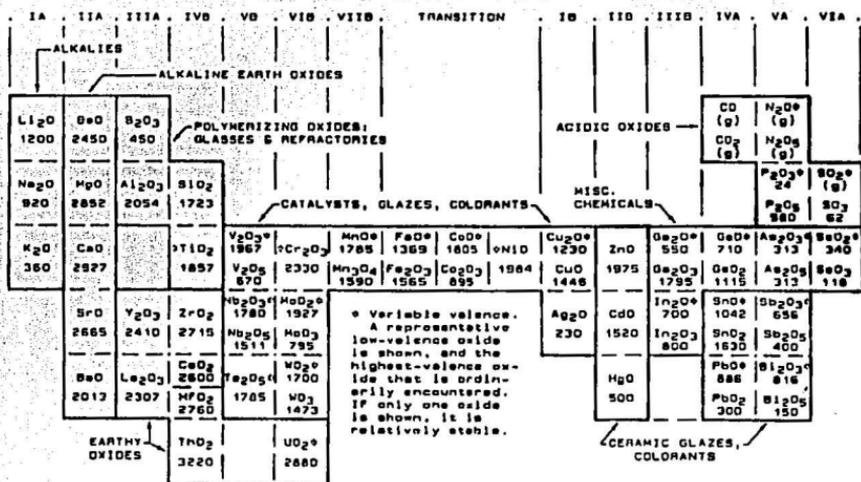


Fig. 5.3. Puntos de Fusión de Óxidos Simples, °C.

Óxidos Complejos. De todos los compuestos óxidos ternarios que existen sólo algunos tienen un alto punto de fusión.

| Nombre | Fórmula | Punto de Fusión, °C |
|-----------------------|--|---------------------|
| Aluminato de Magnesio | $MgAl_2O_4$ o $MgO \cdot Al_2O_3$ | 2135 |
| Cromita de Magnesio | $MgCr_2O_4$ o $MgO \cdot Cr_2O_3$ | 2380 |
| Cromita de Hierro | $FeCr_2O_4$ o $FeO \cdot Cr_2O_3$ | 1700 |
| Forsterita | Mg_2SiO_4 o $2MgO \cdot SiO_2$ | 1910 |
| Silicato Bicalcio | Ca_2SiO_4 o $2CaO \cdot SiO_2$ | 2130 |
| Zircon | $ZrSiO_4$ o $ZrO_2 \cdot SiO_2$ | 2550 |
| Silicato Bialuminio | Al_2SiO_5 o $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ | 1868 |
| Mullita | $Al_4Si_2O_{11}$ o $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ | 1920 |
| Zirconato de Calcio | $CaZrO_3$ o $CaO \cdot ZrO_2$ | 2550 |
| Titanato de Calcio | $CaTiO_3$ o $CaO \cdot TiO_2$ | 1975 |

El silicato bialuminio es el compuesto principal de los minerales de andalucita, cianita y silimanita.

5.2.1.2. Punto de Fusión de los no óxidos.

Los átomos de B, C y N son muy pequeños, y las uniones que forman en los compuestos son sustancialmente covalentes. Cada átomo se une típicamente a tres o cuatro átomos de metal, produciendo compuestos estables de altos puntos de fusión.

El Carbono forma redes atómicas de dos y tres dimensiones por enlaces covalentes. Los átomos de boro, nitrógeno y silicio comparten la capacidad de los átomos de carbono.

| Principal | Carburo | | Nitruro | | Boruro | |
|-----------|----------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Fórmula | Temp. Fusión, °C | Fórmula | Temp. Fusión, °C | Fórmula | Temp. Fusión, °C |
| B | B ₄ C | 2350 | BN | ~3000s | | |
| C | Grafito | ~3650s | | | | |
| Si | SiC | ~2700s | Si ₃ N ₄ | <1900s | | |
| Hf | HfC | ~3890 | HfN | 3305 | | |
| Nb | NbC | 3500 | NbN | 2575 | NbB ₂ | ~2900 |
| Ta | TaC | 3880 | TaN | ~3360 | TaB ₂ | ~3000 |
| Th | ThC ₂ | ~2660 | | | ThB ₄ | 2195 |
| Ti | TiC | ~3140 | TiN | 2930 | TiB ₂ | 2900 |
| U | UC, UC ₂ | ~2370 | UN | ~2630 | UB ₂ | 2365 |
| W | W ₂ C, WC | ~2860 | | | WB ₂ | ~2900 |
| Zr | ZrC | 3540 | ZrN | ~2980 | ZrB ₂ | ~3200 |

La notación “s” en la tabla quiere decir “sublimes”. Todas estas sustancias pueden ser utilizadas bajo circunstancias especiales, pero son muy caras.

De todas estas discusiones, se tiene una lista de óxidos y no óxidos que pueden ser candidatos para los refractarios de la industria del hierro y el acero. Esta lista se muestra consolidada en la tabla 5.1 que incluye el punto de fusión de cada sustancia y la Temperatura Tammann en °C. Las sustancias en cada categoría están arregladas en orden decreciente de acuerdo a su punto de fusión.

5.2.2. Temperatura Máxima de Servicio.

La Temperatura Máxima de Servicio (MST)¹ de un refractario implica un ambiente no corrosivo. Las propiedades mecánicas en caliente pueden limitar esta temperatura de servicio cuando hay condición de carga, pero no hay una condición de carga “estándar”. Como una definición alternativa de la MST, considérese una cara caliente de una pared de refractario cuya temperatura cae rápidamente a la temperatura de la cara fría; y la capa de la cara caliente (unos milímetros de espesor) no fluye por su propio peso. La temperatura máxima de servicio es un indicador de la refractoriedad de un cerámico.

¹ MST.- Siglas en inglés (Maximum Service Temperature)

Tabla 5.1 Puntos de Fusión de Sustancias Refractarias.

| Nombre | Fórmula | Temp. Fusión, °C | Temp. Tammann, °C |
|--|--|------------------|-------------------|
| Oxidos | | | |
| Cal | CaO | 2927 | 2130 |
| Periclasa; Magnesita | MgO | 2852 | 2070 |
| Zircona; Óxido de Zirconio | ZrO ₂ | 2700 | 1960 |
| Zircon, Silicato de Zirconio | ZrO ₂ •SiO ₂ | 2550 | 1850 |
| Zirconato de Calcio | CaO•ZrO ₂ | 2550 | 1850 |
| Cromita, Óxido Crómico | Cr ₂ O ₃ | 2330 | 1680 |
| Aluminato de Magnesita; Spinel | MgO•Al ₂ O ₃ | 2135 | 1530 |
| Silicato Bicálcico | 2CaO•SiO ₂ | 2130 | 1530 |
| Corundum, Alúmina Alfa | Al ₂ O ₃ | 2054 | 1470 |
| Titanato de calcio; Perovskita | CaO•TiO ₂ | 1975 | 1410 |
| Cromita de Magnesita; Spinel de Cromo | MgO•Cr ₂ O ₃ | 1950 | 1400 |
| Mullita | 3Al ₂ O ₃ •2SiO ₂ | 1920 | 1380 |
| Forsterita; Silicato Bimagnésico | 2MgO•SiO ₂ | 1910 | 1370 |
| Silicato Bialuminio | Al ₂ O ₃ •SiO ₂ | 1868 | 1340 |
| Rutila; titania | TiO ₂ | 1857 | 1330 |
| Silice; Cristobalita | SiO ₂ | 1723 | 1230 |
| Cromita de Hierro; Mineral de Cromo | FeO•Cr ₂ O ₃ | 1700 | 1210 |
| No Oxidos | | | |
| Carbono, Grafito | C | 3650* | 2670 |
| Carburo de titanio | TiC | 3140 | 2290 |
| Nitrato de Boro | BN | 3000* | 2180 |
| Nitrato de Titanio | TiN | 2930 | 2130 |
| Diboro de Titanio | TiB ₂ | 2900 | 2110 |
| Carburo de Silicio | SiC | 2700* | 1960 |
| Carburo de Boro | B ₄ C | 2350 | 1700 |

Productos de Alúmina-Sílice: El Cono Equivalente Pirométrico y la Temperatura Máxima de Servicio.

Para determinar los Conos Pirométricos Estándar (PCE)² de un refractario en arcilla, se corta parte del material en la forma y tamaño de los conos pirométricos estándar. Se pone en una placa con diversos juegos de conos estándar, se calientan todos juntos a 2.5°C por minuto en una atmósfera oxidante, y se identifica el cono estándar que se dobla a la temperatura que se dobla el cono del material refractario. El número del cono estándar es el P.C.E. del refractario.

MST a partir de P.C.E.

El P.C.E. puede ser encontrado en las hojas de datos de refractarios de arcilla-alúmina y de arcilla quemada mientras que la MST pocas veces se menciona. Una aproximación razonable entre ellos es (hasta 60% de alúmina en peso):

$$MST = T_{PCE} - 150 \quad (5-1)$$

Arriba del 60% de alúmina, la temperatura de fusión se eleva acercándose hacia la temperatura del P.C.E. y por tanto la ecuación (5-1) no aplica. La MST nunca debe estar por debajo del inicio del punto de fusión, pues no puede existir

² PCE.- Siglas en inglés (Pyrometric Cone Equivalent)

deformación viscosa si no hay líquido presente. Este efecto en la MST actúa en pleno a 70% Al_2O_3 , esto es cuando la fase del refractario cambia de SiO_2 + mullita a Al_2O_3 + mullita.

Tabla 5.2.- Temperatura Máxima de Servicio de Ladrillos Silíceo-Aluminosos.

| | Fundición | | Temp. Máxima de Servicio |
|--|-----------------|-------------|--------------------------|
| | Aparición °C | Final °C | °C |
| 25% Al_2O_3 Ladrillo de Bajo Desempeño | 740 | 1730 | 1490 |
| 30% Al_2O_3 Ladrillo de Medio Desempeño | 800 | 1760 | 1510 |
| 35% Al_2O_3 Ladrillo de Alto Desempeño | 860 | 1785 | 1535 |
| 40% Al_2O_3 Ladrillo de Excelente Desempeño | 940 | 1800 | 1570 |
| 45% Al_2O_3 Arcilla-Alúmina | 1060 | 1815 | 1610 |
| 50% Al_2O_3 Arcilla-Alúmina | 1200 | 1825 | 1635 |
| 60% Al_2O_3 Arcilla-Alúmina | 1460 | 1840 | 1660 |
| 70% Al_2O_3 Mullita | 1680 | 1850 | 1735 |
| 80% Al_2O_3 Alta Alúmina | 1810 | 1870 | 1810 |
| 85% Al_2O_3 Alúmina | 1830 | 1945 | 1830 |
| 90% Al_2O_3 Alúmina | 1870 | 1990 | 1870 |
| 95% Al_2O_3 Alúmina Pura | 1920 | 2025 | 1920 |
| 100% Al_2O_3 | 2054 | 2054 | 2050 |

5.2.3. Características de las Curvas Esfuerzo-Deformación a Baja Temperatura.

A bajas temperaturas y con los niveles de tensión más bajos, se observa algunas veces una concavidad creciente en la curva esfuerzo-deformación. Esta característica puede reflejar una distribución elástica no uniforme de la relación esfuerzo-deformación, que puede ser causada por huecos, y en el caso de fases sólidas, puede ser causada por un módulo de Young diferente. La deformación inicial se realizará de diferente forma entre los ligamentos delgados y los volúmenes grandes del mismo sólido, o darán lugar a diferentes tensiones en las fases sólidas unidas con diferente E , resultando en una redistribución elástica de las tensiones y deformaciones internas con el aumento de la carga. Esta respuesta a la deformación inicial en un refractario se realiza sin fricción interna. Es reversible y libre de histeresis³. La redistribución de tensiones y deformaciones se estabiliza con el aumento del esfuerzo, y la curva esfuerzo-deformación se hace lineal con una inclinación ligeramente más alta.

Otra característica de las curvas esfuerzo-deformación de los refractarios es la aparición de una concavidad decreciente. A bajas temperaturas esta concavidad es seguida por un intervalo lineal de tensiones y deformaciones crecientes, o sea un E constante pero menor que su valor inicial. Esto se debe

también a una redistribución de las tensiones y deformaciones en el sólido. Aunque este comportamiento es plástico (por la curvatura en σ contra ϵ) este componente plástico es siempre permanente. Se piensa que este componente tiene un *rompimiento no catastrófico de las fronteras de grano*. En un cerámico denso se conoce como "*crecimiento de fractura pre-crítico*". La diferencia es que aquí ocurre en diversas regiones simultáneamente y a tensiones muy bajas, y el efecto agregado en las tensiones y deformaciones macroscópicas se aprecia fácilmente.

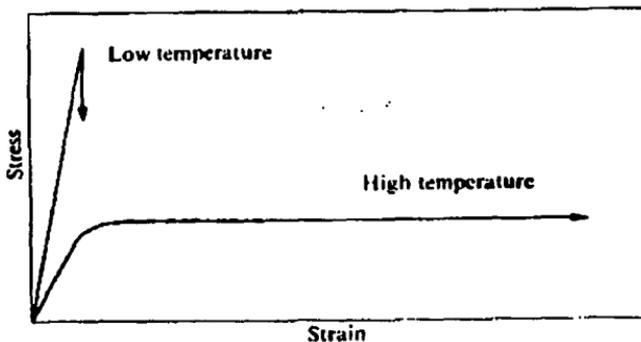


Fig.5.4.- Curvas Esfuerzo-Deformación mostrando un comportamiento frágil a baja temperatura y un comportamiento dúctil a elevada temperatura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

³ Hysteresis.- Disminución del efecto de un cuerpo cuando las fuerzas internas son cambiadas.

5.2.3. Curvas Esfuerzo-Deformación a Altas Temperaturas en función del Tiempo.

Considerando que la deformación elástica pura es producida por una tensión dada, la ϵ resultante y por tanto el E estático están en función del tiempo. La deformación plástica siempre produce una concavidad decreciente en la curva σ contra ϵ , y continúa siempre a niveles de tensión crecientes hasta la falla última. Esta deformación siempre es asociada con la caída de la curva E contra T . Se reconocen tres procesos plásticos a alta temperatura, que aparecen conforme la temperatura aumenta.

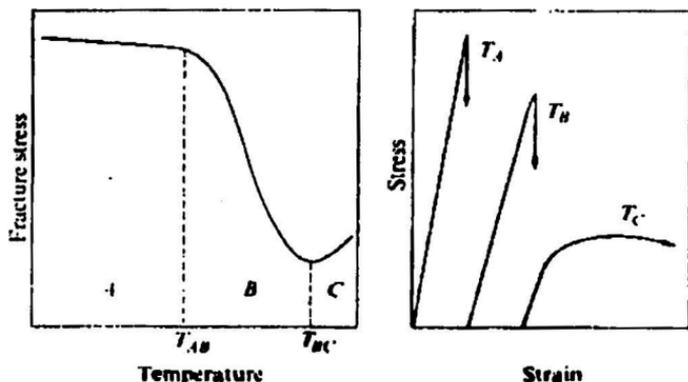


Fig.5.5.-Curvas de Esfuerzo de Fractura y Esfuerzo-Deformación en función de la temperatura para las tres regiones de temperatura.

El primer proceso es *la deformación de la matriz*, que en caso de que ocurra, aparece arriba de la Temperatura Tammann de dicha matriz. La

deformación total en este caso se conoce como *deformación elástico-plástica*. Cuando la Temperatura aumenta un poco más la matriz comienza a fundirse y se produce *deformación visco-elástica*, donde segmentos unidos de granos o cuellos en el sólido se alternan con huecos de líquido viscoso. A temperaturas mayores se observa *deformación viscosa*, donde la fase líquida se vuelve esencialmente continua y desaparece la deformación sólida. Los dos últimos tipos pueden variar de uno a otro con el tiempo y a una temperatura fija, pues conforme aumenta la deformación en los cuellos sólidos se da paso al líquido de los huecos adyacentes. Los tres tipos de deformación implican una disminución del esfuerzo a una deformación dada en el orden que fueron listados, y cada uno termina en fractura. En los refractarios, las dos últimas deformaciones y su evolución a temperatura fija pueden ser complicadas por cambios simultáneos de la composición química en función del tiempo, incluyendo la disolución simple de sólidos y la formación de cristales en la matriz fundida.

La figura 5.5 muestra la dureza de los cerámicos en función de la temperatura. Comprende las tres regiones de temperatura denominadas como *A, B* y *C*. En la región *A* la fractura es frágil, y la deformación es del orden de 10^{-3} . No aparece deformación plástica antes de la falla y el esfuerzo varía poco con el cambio de temperatura. En la región *B* la fractura también es frágil, pero en este caso, aparece una ligera deformación plástica antes de que ocurra la fractura en

la curva esfuerzo-deformación. La deformación es generalmente del orden de 10^{-3} - 10^{-2} y la dureza disminuye con el aumento de la temperatura. En la región C, que es raro encontrar a excepción de algunos cerámicos policristalinos de una fase como el MgO o el UO_2 , ocurre un flujo plástico, con defromaciones del orden de 10^{-1} antes de la falla. Las temperaturas críticas T_{AB} y TBC , varían grandemente para los diferentes cerámicos. Por ejemplo, T_{AB} es aproximadamente $0^{\circ}C$ para el MgO pero mayor que $2000^{\circ}C$ para el SiC. Por lo tanto la respuesta de los cerámicos al esfuerzo varía con el tipo de material y la variación de la temperatura.

5.2.5. Dureza a Temperaturas elevadas.

Los refractarios muestran la misma caída en las curvas de dureza y Módulo de Young que los cerámicos densos; pero la fundición de la matriz ocurre en un rango mucho mayor de temperatura, lo mismo que en la etapa inicial de la caída de la curva.(Figura 3.12)

Entre la temperatura ambiente y la caída de la curva, los refractarios muestran diferentes comportamientos de módulo de Young y dureza. La explicación de este comportamiento se debe a los diferentes tipos y grados de uniones intercrystalinas que se encuentran en los refractarios. Estas diferencias empiezan con las diferentes formas de manufactura: sinterizado térmico,

sinterizado por reacción, unión química y unión por cementación, por nombrar las más usadas y convencionales.

Para la mayoría de los refractarios, la dureza a la temperatura de la región elástica es adecuada para su uso. Algunas debilidades llegan a aparecer en los productos que se instalan sin tratamiento térmico, pues llegan a ocurrir cambios químicos que alteran su comportamiento.

La debilidad inmediata por temperatura que resulta por estos cambios físico-químicos, puede ser revelada por un procedimiento de laboratorio que mida la *expansión térmica bajo carga constante*. Se aplica una carga a compresión fija, después la temperatura se eleva a una velocidad constante y el cambio dimensional se mide continuamente. Como no ocurren cambios internos en el refractario, se obtiene una curva Temperatura-Deformación similar a una curva de expansión térmica. Un intervalo de temperatura de ablandamiento se hace evidente por un alto o una reversión en la expansión, continuando una vez que termina el cambio químico.

5.2.6. Fluencia a Temperaturas elevadas.

Los materiales refractarios muestran plasticidad bajo carga conforme se acercan a la temperatura de caída en E y σ . Esta plasticidad no es transitoria sino que aumenta exponencialmente o es activada térmicamente por la temperatura.

Esta propiedad está relacionada directamente con la capacidad de carga de los refractarios a sus temperaturas de servicio más altas.(Figura 3.12).

Se observa una amplia variedad de comportamientos, dependiendo principalmente de la composición del refractario. Los materiales puros de una sola fase se funden rápidamente, y debajo de la caída de curva, no muestran fluencia excepto a muy altas tensiones. Un ejemplo es Sílice al 99%, pues el líquido que se forma es de una alta viscosidad. Se dice que estos refractarios tienen una alta *dureza en caliente* o sea una velocidad baja de fluencia, cuando están muy cerca de la temperatura de caída de la curva E ó σ .

Los refractarios heterogéneos, se funden progresivamente sobre un rango amplio de temperaturas y pueden mostrar una matriz plástica de estado sólido antes de que empiece su fundición. Los estudios de la fluencia en estos casos pueden ser muy útiles, particularmente en las regiones de temperatura elástico-plástica y visco-elástica.

Estos estudios de la fluencia son costosos y laboriosos, sin embargo los refractarios tienen que ser usados y han sido usados por mucho tiempo sin que sus propiedades mecánicas en caliente puedan ser descritas completa y adecuadamente.

Se ha desarrollado una prueba de *deformación bajo carga en caliente* como un indicativo de la capacidad de carga en caliente. Se trata de ubicar la

temperatura a la que el refractario muestra deformación plástica de cero a un 2% en poco tiempo (1.5 horas), bajo una compresión baja fija (2kg/cm^2). Para el diseño de la pared de un refractario es posible transformar este indicativo de deformación plástica en parámetros prácticos y útiles de soporte de carga, incluyendo la temperatura máxima permisible de un refractario. Aunque esta temperatura máxima de carga es mucho menor que la temperatura de deformación de la prueba, la extrapolación hacia abajo es mucho menor y puede ser más segura que por ejemplo la temperatura P.C.E. para indicar el flujo plástico.

Se ha observado que la temperatura de la cara caliente de la pared de un refractario puede ser operada a mayor temperatura que a esta temperatura máxima permisible con carga. Esta temperatura permisible fue estimada en la sección V.2.2 como la Temperatura Máxima de Servicio (MST).

5.2.7 Efectos de la Porosidad en la Dureza a Temperatura Ambiente.

Si existe alguna relación entre la dureza a baja temperatura de un refractario y su porosidad, y si dicha relación se ajusta con las mismas reglas de los cerámicos densos, entonces:

$$\sigma_r = \sigma_o \exp(-bP) \quad (5-2)$$

Donde es de interés confirmar este hecho y estimar el valor de b . Se esperan ciertas variaciones en los datos, debidos a la incontrolable presencia de micro fracturas que influyen en la dureza del refractario. Para responder las dos cuestiones anteriores se grafica $\ln \sigma_r$ contra P como fracción de volumen. Entonces:

$$\ln \sigma_r = \ln \sigma_o - bP \quad (5-3)$$

Las figuras 5.6 y 5.7 son gráficas de este tipo usando datos del módulo de Ruptura (MOR) y de la Resistencia a Compresión (C.S.) respectivamente. En cada figura los refractarios de trabajo caen en un grupo que va de $P = 0.05$ a $P = 0.26$, mientras que los refractarios aislantes caen en el grupo de $P = 0.40$ a $P = 0.85$.

Considérese la figura 5.6. Entre los refractarios aislantes, el subgrupo de los ladrillos quemados (IFB) muestra un buen comportamiento. La curva que se forma tiene una pendiente de -6 (o sea $b = 6$). Las sílices y los fundidos dan una pendiente de aproximadamente -5 ó $b = 5$.

Por otro lado los refractarios de trabajo, parecen no seguir esta ecuación. Los puntos más altos y los más bajos parecen alinearse con una pendiente de -10 ó $b = 10$, y curvas paralelas a esta pendiente se muestran para representar a todos los refractarios presentados. Los análisis estadísticos no soportan esta opción, sin embargo en la mejor aproximación a esta ecuación aplica este valor de b .

Considerando ahora la figura 5.7. El impacto visual de los datos de los refractarios de trabajo es que la pendiente de -10 es más razonable. Entre los refractarios aislantes la pendiente de -10 es buena para el grupo de los ladrillos quemados (IFB), mientras que el resto se alinea con una pendiente de -8 aproximadamente.

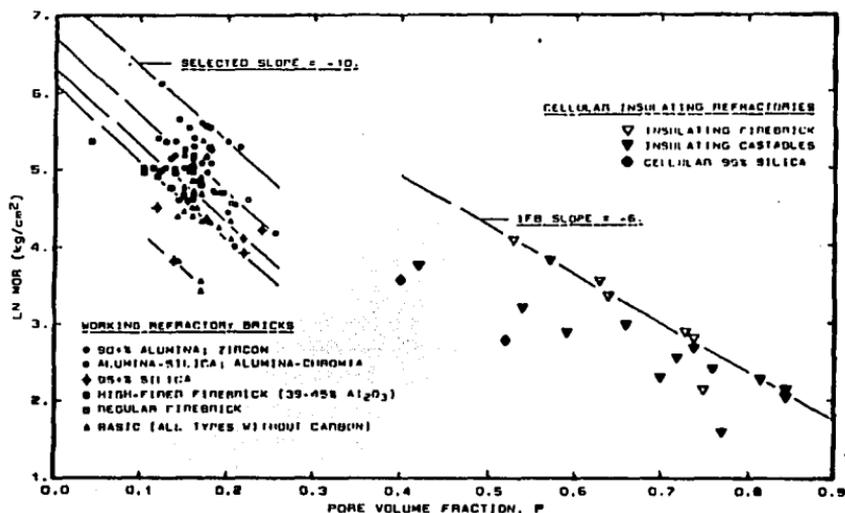


Fig. 5.6.- Módulo de Ruptura (MOR) a Temperatura Ambiente contra la Porosidad de Ladrillos Refractarios

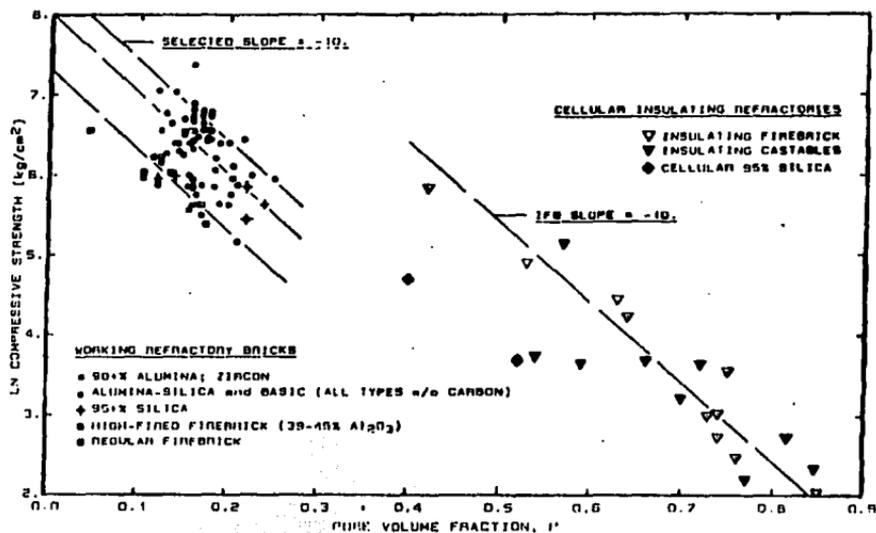


Fig. 5.7.- Dureza a Compresión a Temperatura Ambiente contra la Porosidad de Ladrillos Refractarios.

En general por lo tanto, se justifica el uso de la ecuación (5-2) para relacionar la dureza con la porosidad. Los valores preferidos para b son:

| | Ladrillos de Trabajo | Ladrillos Aislantes | Aislantes fundidos |
|---------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| (b) para MOR | 10 | 6 | 5 |
| (b) para C.S. | 10 | 10 | 8 |

Una prueba de dureza de 10 diferentes refractarios de trabajo ha dado lugar a la ecuación empírica:

$$(C.S) = k (MOR)^{1.5} \text{ ó } \ln (C.S.) = \ln k + 1.5 \ln (MOR) \quad (5-4)$$

En donde el exponente 1.5 refleja la dependencia del C.S. y el MOR con la porosidad. Esta ecuación es matemáticamente compatible con los valores de b mostrados para los refractarios aislantes, pero no para los refractarios densos donde los valores de b son los mismos. Ambos análisis confirman una relación negativa de dureza con la porosidad y una relación negativa de la relación C.S.:MOR con la porosidad; pero las expresiones matemáticas continúan dudosas pendientes de estudios controlados.

5.2.8 El Módulo de Ruptura en función de la Temperatura.

Ladrillos. Algunos de los datos de la figura 5.8 están acompañados por uno o más valores del MOR a altas temperaturas. Estos valores a altas temperaturas se muestran junto con los valores a temperatura ambiente. Esta figura presenta valores aleatorios del comportamiento de ladrillos quemados en función de la temperatura.

Dos de estos valores, 99% Al_2O_3 y 88% Al_2O_3 en el sistema alúmina-silíce, muestran claramente la anticipada caída en la curva del MOR. La caída para 99% de Al_2O_3 ocurre a una muy baja temperatura. Las caídas en otros

Debajo de esta caída, se ven ejemplos con valores del MOR aumentando y disminuyendo conforme aumenta la temperatura. Hasta arriba de la figura, se observa la alta dureza independiente de la temperatura del SiC unido por nitruros. La localización de la caída de su curva no está determinada, pero está muy por fuera de la escala de esta figura: quizás en el orden de los 1900°-2000°C.

Fundiciones de Alúmina. En la figura 5.9 se muestran datos de varias fundiciones de aluminio. Todas las curvas del MOR para fundiciones regulares de aluminatos de calcio cementados son similares, la mayoría mostrando la caída en la dureza entre la temperatura ambiente y los 1000°C. Más datos a 500°C mostrarán que esta caída empieza a esta temperatura aproximadamente. Las reacciones cementadas se completan a 1400°-1500°C, muy cerca de la aparición de la caída de la curva de dureza de algunas composiciones.

Aunque las fundiciones cementadas bajas y ultra bajas fueron desarrolladas para resistencia a la corrosión por escorias, siempre tienden a aumentar dureza a temperatura ambiente y alta temperatura como se ve en la figura 5.9 b). El MOR a temperatura ambiente es superior a 70kg/cm² o 1000 psi en todos los casos. Las reacciones de las uniones de sílice coloidal se hacen evidentes a los 500°C y continúan endureciendo a estos materiales hasta los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1000°C o más. Algunas curvas muestran un mínimo en el MOR a aproximadamente 1400°C, pues es cuando ocurre la cristalización de la sílice; pero se recuperan a temperaturas más altas. Las composiciones de la Figura 5.9c), que están por arriba del 65% de Al_2O_3 , en la mayoría de los casos no han alcanzado la caída en la curva de MOR de los 1500°C a 1600°C.

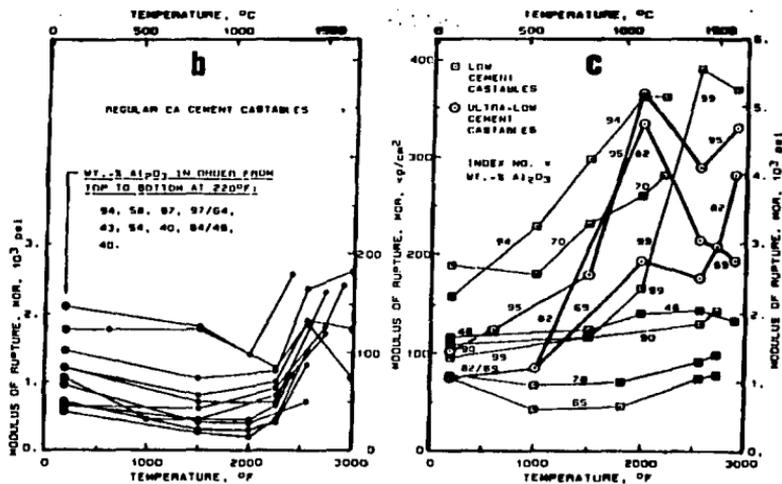


Fig.5.9 Curvas del MOR contra Temperatura para Fundiciones de Alúmina: b. Cementados C-A. c. Cementados Bajos y Ultra bajos.

MgO + C Composites. La tabla 5.3 muestra el MOR a diversas temperaturas para una variedad de refractarios básicos para la fabricación de acero que contienen partículas de Carbono o Grafito. Sólo se muestran los tipos que están unidos por resina y unidos por brea, pues estos tipos obtienen su dureza por el quemado convencional del ladrillo antes de la impregnación de brea o resina.

Tabla 5.3.- Propiedades Mecánicas de Ladrillos Refractarios de MgO+C.

| Comp. Mineral | Unión Inicial | Cocido %C | Cocido $\delta, \text{g/cm}^3$ | Cocido Por. % | Sin Cocer MOR, kg/cm^2 | Caliente (cocido) MOR, kg/cm^2 | | | |
|------------------|---------------|------------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|---|--------|-----|--------|
| | | | | | | MOR | (T °C) | MOR | (T °C) |
| 97M ^a | Brea | 4.9 ^b | 3.0 | 12 | 85 | 210 | (1095) | 350 | (1540) |
| 96M | Brea | 4.4 ^b | 3.1 | 9 | 120 | 120 | (1095) | | |
| 94M | Brea | 4.5 ^b | 3.1 | 8 | 105 | 110 | (1095) | 140 | (1400) |
| 94M | Resina | 9.0 | 3.0 | 8 | 140 | | | 125 | (1400) |
| 92M | Brea | 10.0 | 3.0 | 8 | 105 | 120 | (1095) | 175 | (1400) |
| 90M | Resina | 9.5 ^c | 2.9 | 11.5 | 175 | 160 | (1095) | 210 | (1540) |
| 97M | Resina | 19.5 | 2.8 | 8.5 | 75 | 55 | (1095) | 40 | (1400) |
| 94M | Resina | 20.5 | 2.8 | 8.5 | 105 | 50 | (1095) | 50 | (1400) |
| 90M | Resina | 18.0 | 2.8 | 11 | 100 | 85 | (1095) | 125 | (1540) |
| 95M | Resina | 26.5 | 2.7 | 12 | 75 | 65 | (1095) | 60 | (1540) |

NOTAS: a - 97M = 97% MgO; etc.

B - Carbón exclusivamente de Brea. En los demás casos, por el Grafito agregado.

C - Contiene polvo de metal antioxidante.

El MOR a temperatura ambiente es el del ladrillo antes de ser cocido; la siguiente columna es el MOR con el producto totalmente cocido a 1095°C, donde los granos de Magnesia están unidos entre ellos y a las partículas de

grafito por carbón amorfo. La última columna muestra los valores del MOR a temperaturas mucho mayores (1400°-1500°C), donde el carbón de unión se ha consolidado y la unión C-O-Mg está completamente establecida. Los ladrillos que se muestran están agrupados de acuerdo al contenido de carbón total agregado después del cocido, los valores nominales son 5, 10, 20, y 25%C (tercera columna). Arriba de la clase del 5% C, la mayoría del carbón es grafito. Estos productos son relativamente homogéneos pues su porosidad va del 8 al 12 por ciento de volumen.

Las durezas a temperatura ambiente son similares a la dureza de los ladrillos de magnesia cocidos. Sólo al 20 y 25% de grafito se ve una pérdida de dureza después del cocido (1095°C). Esta pérdida se relaciona con la conductividad térmica baja observada a estos niveles de carbono. La causa puede ser la diferencia entre la expansión térmica del grafito y el MgO. Esta conjetura se basa en la falla que presentan los mismos productos a recuperar su dureza a altas temperaturas, excepto por uno (90%MgO), cuyas impurezas minerales son lo suficientemente altas para que la fase líquida se recupere a 1540°C. Los productos de bajo contenido de carbono generalmente muestran poco cambio en la dureza en el cocido y una ganancia considerable de dureza a altas temperaturas.

5.2.9. El Módulo de Young en función de la Temperatura.

Ya sea que el origen de las deformaciones o tensiones en un refractario sean térmicas o mecánicas, es evidente que el Módulo de Young estático es la propiedad necesaria para describir la respuesta macroscópica hasta la fractura. El módulo de Young dinámico se mide a muy bajas deformaciones, y su aplicación a altas deformaciones o altas tensiones ignoraría los demás mecanismos que ocurren. Si la deformación es puramente elástica y reversible a bajas temperaturas, entonces el único argumento entre estos dos métodos es cuál es el más exacto. Pero las desviaciones de la respuesta elástica sólo pueden ser detectadas realizando medidas estáticas de tensión-deformación, y una vez encontradas, estas desviaciones necesitan el uso del módulo estático.

El elemento más importante para el uso del módulo estático o dinámico en las deformaciones plásticas es el *tiempo*. En cualquier estado de tensión o deformación transitoria, entre menor sea el tiempo de respuesta, el módulo de Young cambia más rápido del módulo estático al módulo dinámico. Por lo tanto en situaciones de choque térmico se debe usar el módulo de Young dinámico. Pero no se espera que los refractarios respondan en milisegundos. Por lo tanto, es muy razonable que el método tensión-deformación estático se obtenga por una sucesión de aumentos en la velocidad de deformación, y el E resultante sea

graficado contra $\delta\epsilon/\delta t$ y sea extrapolado como sea necesario para su uso en transiciones térmicas rápidas.

La figura 5.10 muestra los valores de E contra T para a) ladrillos cocidos, y para b) ladrillos monolíticos (empapados dos horas para cada prueba de temperatura para fomentar su unión antes de la prueba). Obsérvese que en este caso las escalas están en kg/mm^2 y 10^6 psi, en vez de kg/cm^2 y 10^3 psi usados en las gráficas anteriores de dureza.

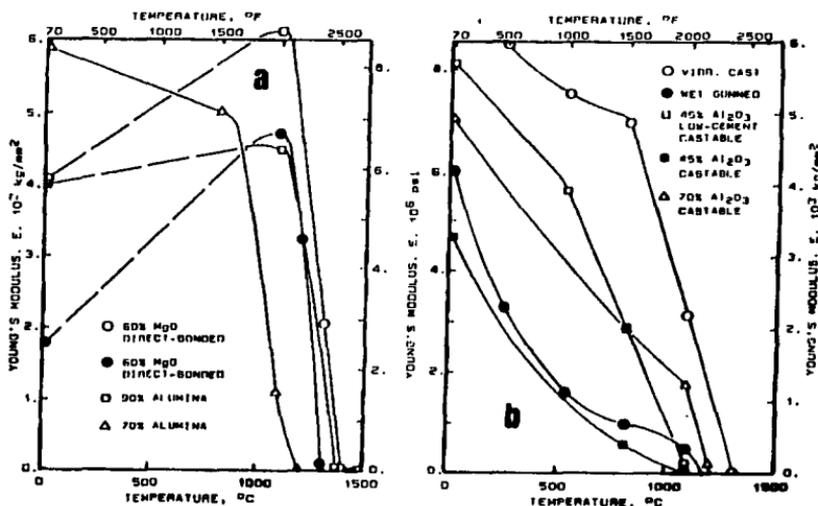


Fig. 5.10.- Módulo de Young estático contra Temperatura. A.Ladrillos cocidos, B.Monolíticos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La característica más sobresaliente que se ve en la figura 5.10 a) es la caída de la curva. Desafortunadamente no existe relación entre los especímenes usados para los datos E-T de esta figura y los datos MOR-T de la figura 5.8. Parece que la caída en la curva de dureza ocurre unos 50°C arriba de la caída de la curva del módulo de Young.

Antes de la caída de la curva las constantes elásticas de los refractarios son de un orden de magnitud menores que los valores E intrínsecos de la Tabla 3.3. Esto se debe a los efectos de la porosidad y micro fracturas.

Las curvas E-T de la figura 5.10b) para monolíticos muestran una característica que no tiene relación con las curvas MOR-T de la figura 5.9: una caída muy grande en el módulo de Young estático entre la temperatura ambiente y la temperatura de caída de la curva. La razón es la forma en que se obtuvo E de los valores σ - ϵ ; además las figuras difieren en que una muestra un Módulo de Ruptura (MOR) a tensión con una deformación a compresión, una alta con una baja velocidad de deformación, y probablemente diferentes tratamientos antes de la prueba. De cualquier forma los monolíticos de la figura 5.10 b) son altamente deformables arriba de 500°C.

BIBLIOGRAFÍA.

- Norton, F.H. "Refractories", 3rd. Ed. NY, Mc Graw Hill, 1949.
- Harbison Walker Refractories Company, Modern Refractory practice; 3rd. Ed.; Pittsburgh, PA., The Company, 1961.
- General Refractories Company, Refractories. Philadelphia, PA; The Company, 1949.
- R.W. Davidge, "Mechanical Behaviour of Ceramics". Cambridge University Press (1979).
- Stephen C. Carniglia, Gordon L. Barna, "Handbook of Industrial Refractories Technology", NOYES publications, New Jersey, USA, 1992.

6. REACCIONES A TEMPERATURAS ELEVADAS.

Las discusiones del comportamiento de los refractarios a temperaturas elevadas han tendido a enfatizar la influencia de varios factores físicos y han dado poca atención al comportamiento que reflejan las leyes naturales que gobiernan las reacciones a altas temperaturas, ocurriendo no sólo en los refractarios sino entre los refractarios y los óxidos que se encuentran en servicio. Hasta hace algunos años poco se sabía de estas reacciones y las mejoras en los refractarios eran lentas, pues derivaban de prueba y error.

Ahora existen los diagramas de fase-equilibrio que han probado ser excelentes guías para la producción de refractarios superiores y para la corrección de las dificultades encontradas en su servicio. Debe reconocerse que estos diagramas no son del todo exactos en el uso de predecir o explicar el comportamiento de los refractarios. Por ejemplo, todos los sistemas se han explorado con óxidos puros y representan condiciones de equilibrio, mientras

que los refractarios rara vez son puros y nunca están en equilibrio, ya sea manufacturados o en servicio. Por la naturaleza tan compleja de los refractarios, casi siempre la información que se necesita es para reacciones que involucran varios óxidos y por lo tanto no es muy recomendable en este caso el uso de sistemas que involucran sólo tres óxidos. Por último, y lo más importante, es que los diagramas no dan información de datos tan importantes como la viscosidad de los líquidos formados o la velocidad a la que las reacciones ocurren.

Algunos diagramas se muestran a continuación.

6.1. El sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

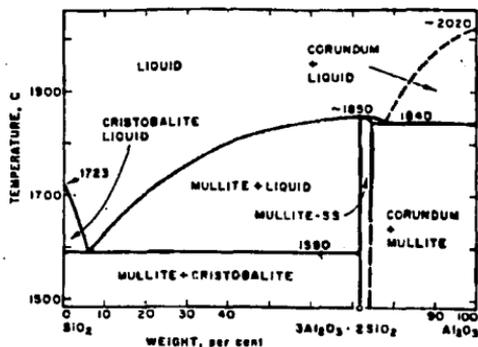


Fig.6.1.- Diagrama de Fase del Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 6.1 muestra el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ que se aplica para la sílice, arcilla (fireclay) y refractarios de alta alúmina. Se puede notar que la más baja temperatura a la que aparece líquido en el sistema es 1590°C (2894°F), mientras que para las composiciones más aluminosas que la mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$) o arriba del 71.8 por ciento de Al_2O_3 no se desarrolla líquido por debajo de 1840°C (3344°F). Al 94.5 por ciento de SiO_2 y 5.5 por ciento Al_2O_3 ocurre un eutéctico. Es evidente que si la unión y otras dificultades de manufactura pueden ser resueltas, se pueden sacar muy buenos refractarios de óxidos puros, aun en el alto rango de la alta sílice. De hecho, el ladrillo de sílice que contiene aproximadamente 80 por ciento de SiO_2 representa una aproximación práctica a esta condición. Gracias a sus muy bajas impurezas estos ladrillos tienen una mejor capacidad de carga que muchos ladrillos mucho más aluminosos que tienen un P.C.E. más alto.

El efecto pronunciado de las impurezas presentes en la mayoría de los refractarios comerciales en este sistema se puede apreciar comparando las temperaturas a las que se deforman inicialmente bajo carga con la temperatura inicial del líquido de 1590°C ó 1840°C indicadas en el diagrama.

Las impurezas de óxido que son las principales responsables de disminuir la capacidad de calor de los refractarios de arcilla (fireclay) son CaO , MgO , FeO , Na_2O , y K_2O , y son encontradas también en servicio.

6.2. El sistema FeO-Al₂O₃-SiO₂.

La figura 6.2 muestra el sistema FeO-Al₂O₃-SiO₂. Aquí se observa que con grandes cantidades de óxido de hierro disponible para reaccionar casi con cualquiera de los miembros de las series de los refractarios Al₂O₃-SiO₂ (excepto los más puros), se puede esperar la formación de líquido aun por debajo de 1090°C (2000°F), y esta temperatura es común en los procesos de acero. Esto es peligroso pues generalmente los líquidos que llevan óxidos de hierro son muy fluidos.

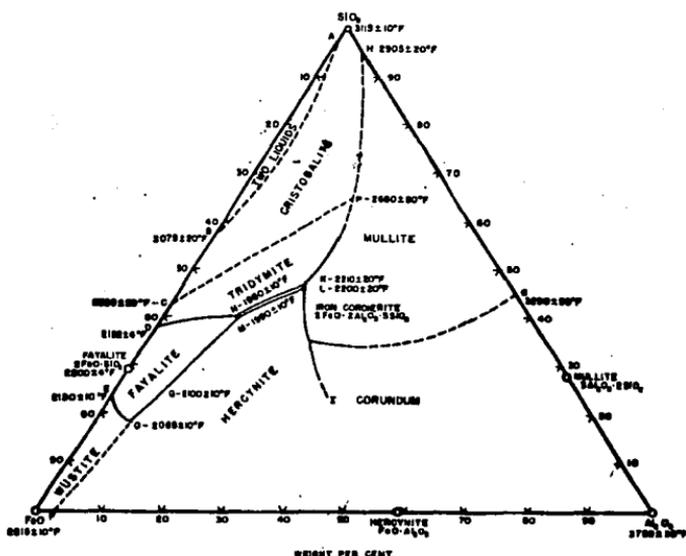


Fig. 6.2.- El sistema FeO-Al₂O₃-SiO₂.

6.3. El sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

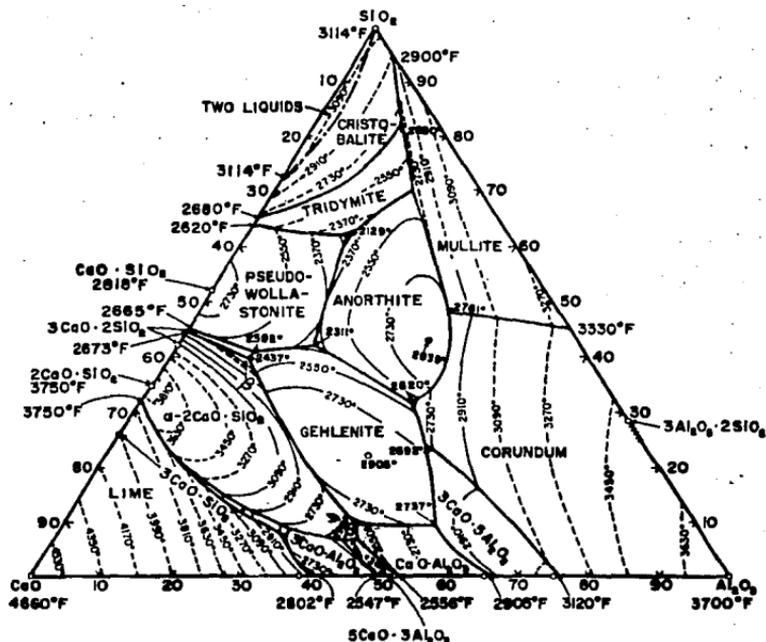


Fig. 6.3.- El sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

El diagrama del sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (Fig.6.3) se aplica principalmente a las reacciones de los refractarios de arcilla con las escorias del alto horno, pero también puede proporcionar información en otras reacciones de los refractarios, como las que ocurren con escorias más complejas del horno de

silice es afectada por pequeñas cantidades de Na_2O , con menos del 1 por ciento es suficiente para bajar la temperatura de la formación inicial de líquido a menos de 1090°C (2000°F), mientras que un 10 por ciento es suficiente para hacer líquidas las composiciones de alúmina-silice con altos contenidos de silice a 1200°C .

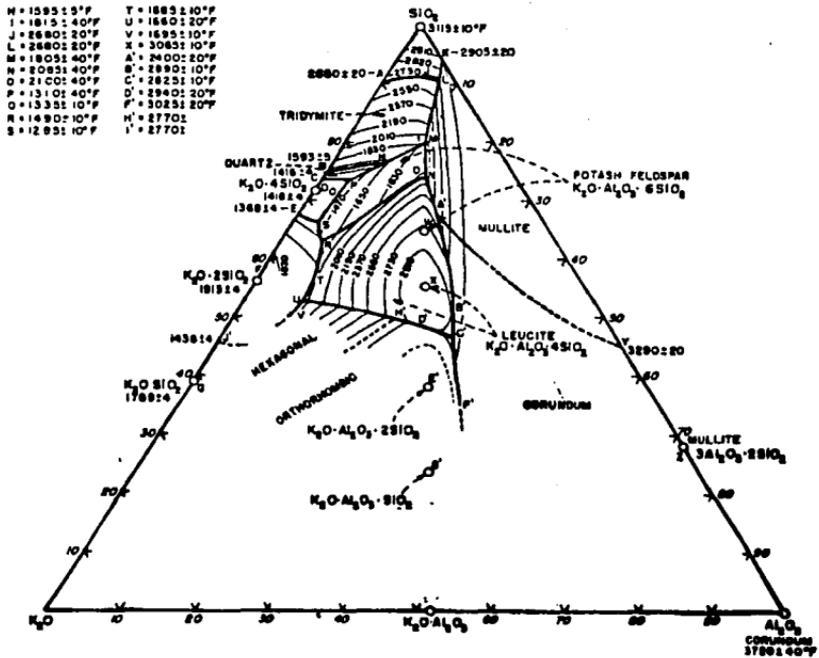


Fig. 6.5.- El sistema $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

El K_2O tiene un efecto similar al Na_2O en cantidades hasta de 10 por ciento, pero mientras el Na_2O continua bajando el punto de formación de líquido con mayores adiciones, lo contrario pasa en adiciones de K_2O en el rango de 10 a 20 por ciento.

Los pequeños porcentajes de impurezas son mucho más críticos en los ladrillos de sílice que en los ladrillos de arcilla, y los alcalis son los peores, aunque afortunadamente nunca aparecen en cantidades mayores del 0.3 por ciento. Los porcentajes requeridos de Na_2O , K_2O y Al_2O_3 para bajar el punto de formación de líquido en la sílice pura de $1730^{\circ}C$ ($3140^{\circ}F$) a $1680^{\circ}C$ ($3050^{\circ}F$) son respectivamente 1.4, 1.9 y 3.1 por ciento.

6.5. El sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂.

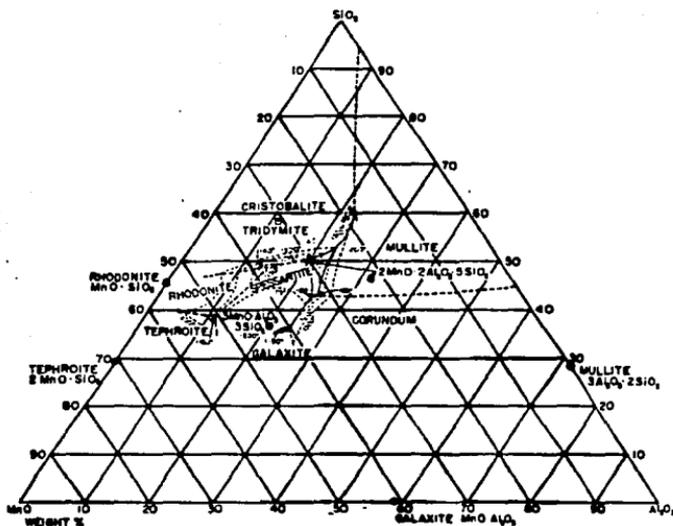


Fig. 6.6.- El sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂

El MnO es otro agente que baja la temperatura de formación de líquido en los refractarios de arcilla, como se ve en la figura 6.6. Este sistema es similar al sistema FeO-Al₂O₃-SiO₂.

6.6. El sistema CaO-SiO₂.

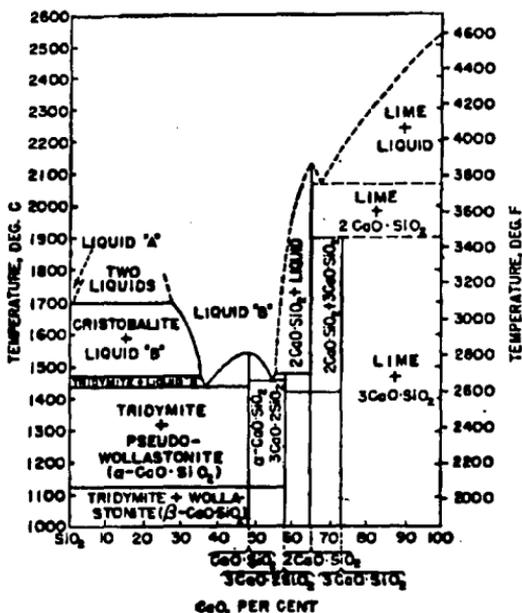


Fig. 6.7.- El sistema CaO-SiO₂.

Debido a que los materiales naturales para ladrillo de sílice carecen de una unión natural y un alto punto de fusión, se debe tomar especial atención para que la adición de unificador tenga efectos mínimos en la refractoriedad.

La figura 6.7 muestra el sistema CaO-SiO₂ y se puede observar porque la cal es usada universalmente para este propósito. Con adiciones de CaO al SiO₂,

la temperatura de fusión permanece sin cambios entre 1 y 27.5 por ciento de CaO, debido a la formación de dos líquidos inmiscibles.

Este fenómeno no ocurre en el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, y si se observa el sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (fig. 6.3), encontramos que sólo una pequeña cantidad de Al_2O_3 se requiere para destruir la inmiscibilidad del CaO-SiO_2 . De hecho, el efecto de incrementos pequeños de Al_2O_3 en el desarrollo del líquido en el ladrillo de sílice es tal que la temperatura de falla bajo una carga de 25 libras por pulgada cuadrada disminuye aproximadamente 5.5°C (10°F) cada 0.1 por ciento de incremento en Al_2O_3 en el rango de Al_2O_3 de 0.3 a 1.2 por ciento entre el ladrillo de sílice de alto rendimiento y el convencional.

6.7. El sistema FeO-SiO_2 .

El diagrama del sistema FeO-SiO_2 (fig. 6.8) muestra que el FeO (al igual que el CaO) forma también dos líquidos inmiscibles cuando es agregado al SiO_2 , aumentando grandemente la tolerancia del ladrillo de sílice para el FeO. Sin embargo (al igual que el CaO), una pequeña cantidad de Al_2O_3 puede eliminar esta inmiscibilidad.

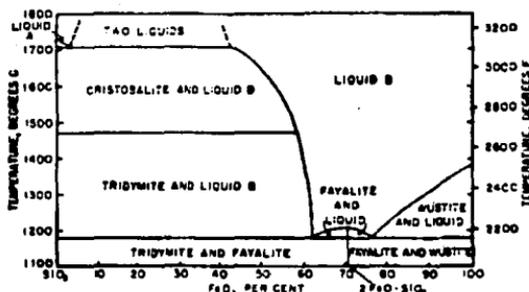


Fig. 6.8.- El sistema FeO-SiO₂

6.8. El sistema FeO-Fe₂O₃-SiO₂.

Como las condiciones atmosféricas en los hornos de las plantas de acero pueden variar de altamente reductoras a altamente oxidantes, la forma de los óxidos de hierro presentes pueden variar de FeO a Fe₂O₃. Por esta razón el sistema FeO-Fe₂O₃-SiO₂ (fig.6.9) es de considerable importancia. En este diagrama se puede observar que los más bajos puntos de fusión ocurren de reacciones de FeO y SiO₂, y que a temperaturas en el rango de 1450°C (2650°F) a 1660°C (3030°F) menos líquido, y menos líquido silicioso se producirá con Fe₃O₄ ó Fe₂O₃ que con FeO, esto es debido a la gran extensión de la región de dos líquidos bajo condiciones oxidantes. Por tanto, bajo condiciones oxidantes, un techo de sílice en un horno de corazón abierto tendrá más tolerancia para el óxido de hierro, y por tanto será más durable.

6.9. El sistema MgO-FeO.

Los dos principales óxidos refractarios considerados como básicos son la magnesia (MgO) y la cal (CaO). La magnesia se destaca por su tolerancia a los óxidos de hierro. Como se muestra en la figura 6.10, el MgO y el FeO forman una serie continua de soluciones sólidas que tienen alta refractoriedad aun con altas cantidades de FeO.

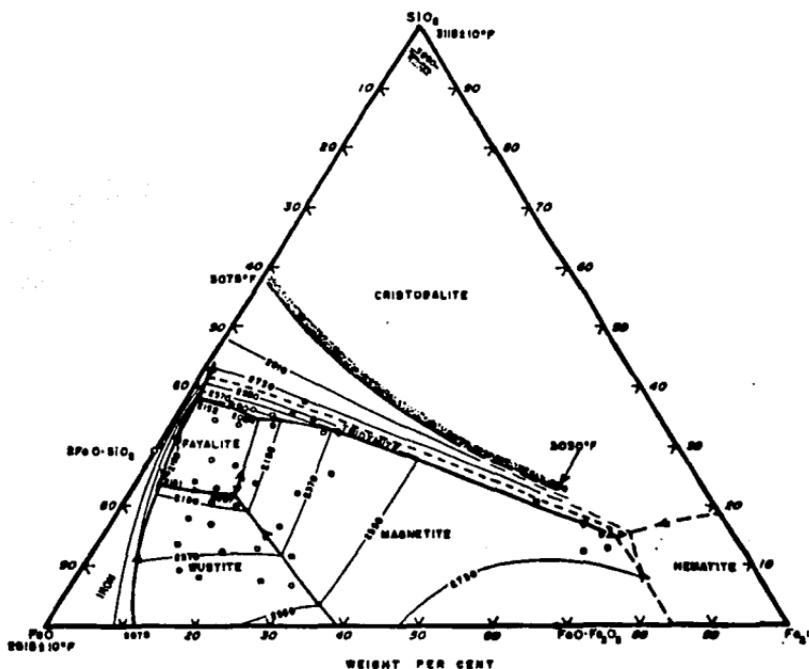


Fig.6.9.- El sistema FeO-Fe₂O₃-SiO₂.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

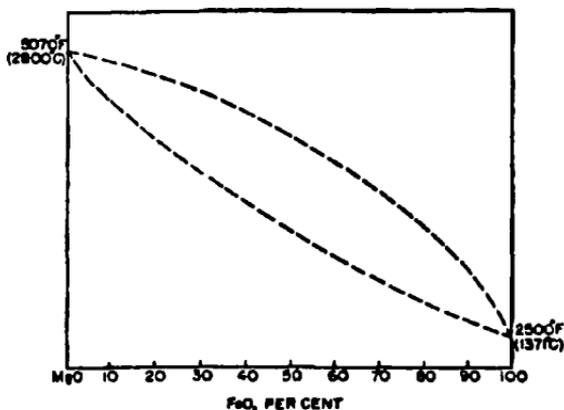


Fig. 6.10.- El sistema MgO-FeO

Bajo condiciones oxidantes, la magnesia es aún más tolerante al óxido de hierro. La magnesia y el óxido de hierro forman el compuesto refractario magnesioferrita ($MgO-Fe_2O_3$) que contiene 80 por ciento de Fe_2O_3 . La magnesioferrita forma soluciones sólidas con la magnetita ($FeO-Fe_2O_3$) con altos contenidos de óxido de hierro y con la magnesia a bajos contenidos de óxido de hierro. Por otro lado, la cal es más reactiva con óxido de hierro, formando ferritas de calcio de bajo punto de fusión como la dicalcio-ferrita ($2CaO-Fe_2O_3$) que se disuelve incongruentemente a aproximadamente $1440^{\circ}C$ ($2620^{\circ}F$). También, la cal es sujeta a hidratación y desintegración cuando se expone a

condiciones atmosféricas y no puede ser utilizada como un refractario hecho por procedimientos convencionales. Es evidente, por lo tanto, que la magnesia es el óxido refractario básico más útil y forma la base para todos los tipos de refractarios básicos incluyendo aquellos hechos de magnesita, olivina, dolomita quemada y magnesita con mineral de cromo.

Los refractarios que contienen magnesita, no importando el tipo, contienen óxidos refractarios adicionales y encuentran otros óxidos refractarios en servicio que ejercen una influencia importante en su desempeño.

6.10. El sistema MgO-CaO-SiO₂.

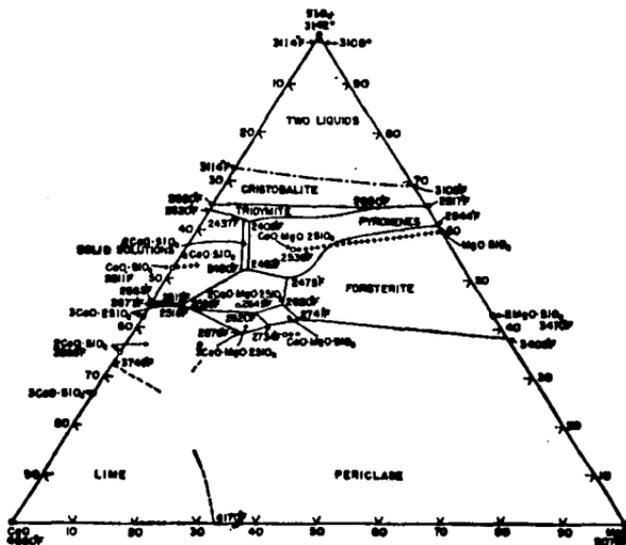


Fig.6.11.- El sistema CaO-MgO-SiO₂.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 6.11 muestra las reacciones y cambios de fase en el sistema MgO-CaO-SiO₂.

En la porción de alto contenido de MgO, el mineral principal es la periclasa. Los silicatos adicionales de unión, sin embargo, variarán considerablemente dependiendo de la relación de CaO con SiO₂.

La tabla 6.1 muestra un resumen de los compuestos presentes con periclasa y afectados por la relación peso CaO/SiO₂ y sus puntos aproximados de fusión.

Tabla 6.1 Fases Minerales en equilibrio con Periclasa (MgO) en el sistema MgO-CaO-SiO₂.

| Relación Peso CaO-SiO ₂ | Minerales Presentes | Composición | Temperatura aproximada de Fusión (°F) |
|------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Menor que 0.93 | Forsterita | 2MgO•SiO ₂ | 3450 |
| | Monticelita | CaO•MgO•SiO ₂ | 2710* |
| 0.93 | Monticelita | CaO•MgO•SiO ₂ | 2710* |
| 0.93 a 1.40 | Monticelita | CaO•MgO•SiO ₂ | 2710* |
| | Merwinita | 3CaO•MgO•2SiO ₂ | 2870* |
| 1.40 | Merwinita | 3CaO•MgO•2SiO ₂ | 2870* |
| 1.40 a 1.86 | Merwinita | 3CaO•MgO•2SiO ₂ | 2870* |
| | Silicato Dicalcio | 2CaO•SiO ₂ | 3865 |
| 1.86 | Silicato Dicalcio | 2CaO•SiO ₂ | 3865 |
| 1.86 a 2.80 | Silicato Dicalcio | 2CaO•SiO ₂ | 3865 |
| | Silicato Tricalcio | 3CaO•SiO ₂ | 3450** |
| 2.80 | Silicato Tricalcio | 3CaO•SiO ₂ | 3450** |
| Mayor que 2.80 | Silicato Tricalcio | 3CaO•SiO ₂ | 3450** |
| | Calcio | CaO | 4650 |

*Fusión incongruente

**Estable sólo entre 3450 y 2280°F. Ocurre disociación en 2CaO•SiO₂ y CaO por encima y por debajo de estas temperaturas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aunque el tipo de refractario usado para la unión, depende de su aplicación, la unión de forsterita, que ocurre a relaciones de CaO-SiO_2 menores que 0.93, es preferida en la mayoría de los ladrillos básicos para prevenir la formación excesiva de monticelita y merwinita. Estos minerales forman líquidos a baja temperatura, y por lo tanto tienen poca capacidad de carga a altas temperaturas. Además del control de la relación CaO-SiO_2 , se ha puesto un énfasis especial en disminuir las cantidades de calcio y sílice para obtener todas las ventajas de las propiedades de la magnesia casi pura. Esto se ha logrado gracias al uso de magnesitas sintéticas. Además también se han desarrollado otros minerales de unión para la magnesia como las espinelas refractarias $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$. En estos refractarios de alta magnesia, al agregar Al_2O_3 o Cr_2O_3 con la temperatura suficiente provoca la formación de uniones espinela-magnesita o uniones directas de magnesia-magnesita reemplazando las uniones con silicatos. Estas uniones no sólo ofrecen excelente refractoriedad bajo carga, sino también una resistencia al desgaste térmico y altos módulos de ruptura a elevadas temperatura.

Para refractarios con contenidos mayores de calcio, como los que se producen de dolomita quemada o calcio conteniendo magnesita, la relación CaO-SiO_2 es tal que se producen silicatos de calcio. El silicato dicalcio producido a relaciones altas de CaO-SiO_2 tiene un alto punto de fusión, pero

debe ser estabilizado contra la inversión polimórfica agregando óxidos de cromo (Cr_2O_3) y/o ácido bórico (B_2O_3). La reacción de calcio con sílice para formar silicato dicalcio es un método para disminuir la tendencia a hidratación del calcio, pero lamentablemente tiene una resistencia pobre a los óxidos de hierro. Los refractarios hechos de combinaciones de calcio conteniendo magnesitas, dolomita quemada y magnesia, son producidos con una unión protectora de brea para ser usados en los contenedores de los hornos. En estos refractarios, el carbono, que se forma al cocer la brea, es la principal unión. Se ha observado que las uniones de carbono inhiben gran parte de las reacciones y penetración de líquidos de óxidos de hierro y silicatos de calcio, asociados comúnmente con los refractarios que no tienen la unión de carbón.

Las reacciones a altas temperaturas de los refractarios hechos de magnesia y mineral de cromo están bajo constante estudio. Las propiedades de los refractarios hechos de estos dos minerales son excelentes por la tendencia de cada uno a minimizar las debilidades del otro. El mineral de cromo consiste de soluciones sólidas de espinelas de cromo $(\text{Mg,Fe})\text{O}\cdot(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_3$ con grandes cantidades de silicatos. A altas temperaturas, los silicatos presentes en el mineral de cromo son responsables de la baja resistencia a la deformación bajo carga y los óxidos de hierro pueden ser alternativamente consumidos y reducidos con expansiones y contracciones constantes causando su desintegración. Además las

espinelas de cromo muestran un crecimiento grande cuando se ponen en contacto con óxidos de hierro a altas temperaturas debido a la formación de soluciones sólidas de magnetita ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) y otras espinelas. Sin embargo, al agregar magnesia al material de cromo, los silicatos son convertidos por el cocido o por su servicio en forsterita (más refractaria), y los óxidos de hierro son convertidos a la espinela $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ por co-difusión de Fe_2O_3 y MgO entre la magnesia y la espinela de cromo. La magnesioferrita es más resistente a las condiciones de oxidación-reducción que los óxidos de hierro y el mineral de cromo. Además al agregar cantidades mucho mayores de magnesia al mineral de cromo mejora la resistencia del refractario al crecimiento por óxidos de hierro por la gran afinidad de la magnesia con el óxido de hierro. Por otro lado al agregar mineral de cromo a la magnesia mejora la resistencia de la magnesia al desgaste térmico a través de una liberación de tensiones en su estructura rígida.

Al igual que en los refractarios de magnesia, la relación CaO/SiO_2 influye en las fases presentes en composites de magnesia y mineral de cromo. A relaciones CaO/SiO_2 menores de 1.86, las fases primarias entre MgO , CaO y SiO_2 son las mismas que las discutidas anteriormente con los sesquióxidos¹ Cr_2O_3 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 combinados con MgO y FeO para formar soluciones sólidas de espinela. A relaciones mayores de CaO/SiO_2 , los sesquióxidos forman

compuestos de bajo punto de fusión con el CaO. Esta relación alta es rara en refractarios hechos de periclasa y mineral de cromo, pero llega a ocurrir en muchos refractarios después de ser expuestos a escorias básicas ricas en calcio. Así como en los refractarios de magnesia, se han hecho muchos esfuerzos para reemplazar la unión por silicatos en refractarios hechos de magnesia y mineral de cromo. El más notorio de estos esfuerzos es el uso de temperaturas de cocido superiores a las normalmente empleadas para reproducir refractarios básicos de sílice con las llamadas uniones "directas" de magnesia-espínela de cromo y magnesia-magnesia. Los ladrillos de uniones "directas" muestran altas durezas en caliente que pueden ser de 2 a 8 veces mayor que la de los ladrillos convencionales de composiciones similares.

¹ Sesquióxidos.- Un óxido en el que tres átomos de oxígeno o equivalentes son combinados con dos átomos de algún otro elemento o radical.

BIBLIOGRAFÍA.

- Norton, F.H. "Refractories", 3rd. Ed. NY, Mc Graw Hill, 1949.
- Harbison Walker Refractories Company, Modern Refractory practice; 3rd. Ed.; Pittsburgh, PA., The Company, 1961.
- General Refractories Company, Refractories. Philadelphia, PA; The Company, 1949.

7. Análisis en el Alto Horno.

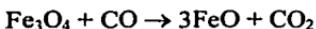
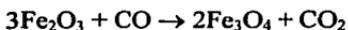
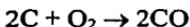
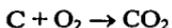
7.1. Producción de hierro en el Alto Horno.

El producto obtenido del Alto horno es el hierro (Fe) a partir de sus principales óxidos: Fe_2O_3 (hematita, 69.9% de hierro) y Fe_3O_4 (magnetita, 72.4% de hierro). Sólo el 50% del mineral de hierro está compuesto de óxidos de hierro, el resto consiste de tierra y piedras mezcladas con estos óxidos de hierro.

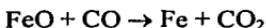
La carga del horno consiste de niveles alternados de mineral de hierro, de coque y de cal con una relación aproximada de 4:2:1 respectivamente. La cal sirve como fluido para las piedras y tierra del mineral de hierro y también para las cenizas del coque.

Se inyecta aire a alta temperatura a través de las boquillas colocadas alrededor de la parte baja del alto horno. Este aire oxida el coque, produciendo calor y grandes cantidades de monóxido de carbono. El monóxido de carbono

sube y a una temperatura de 300°C reduce el óxido de hierro a FeO. Las siguientes reacciones químicas describen la producción de FeO:



Conforme continúa el proceso de reducción, la temperatura del FeO cae hasta 700 u 800°C. Entonces el FeO es reducido a una masa de hierro puro por el monóxido de carbono.



Después el hierro fundido cae en la región donde la temperatura está entre 800 y 1400°C. El hierro se satura con carburos y carbón libre. El carbón absorbido disminuye el punto de fusión del hierro de 1550°C aproximadamente a 1150°C de tal manera que cae como líquido al fondo del horno.

La escoria se funde a la misma temperatura que el hierro, pero como es menos densa flota en el hierro líquido. Esto permite que el hierro (arrabio) y la escoria sean extraídos por separado. El hierro generalmente va en estado líquido a un subsecuente proceso de refinamiento.

Como el hierro líquido es un excelente solvente, el arrabio contiene todos los minerales que no pudieron ser llevados por la cal líquida. La composición

aproximada del arrabio es de 3 a 4% de carbono, de 1 a 3% de sílice, de 0.1 a 2% de fósforo, de 0.5 a 2% de manganeso, y 0.01 a 0.1% de azufre. La composición dependerá de los elementos que se encuentran mezclados en la tierra y piedras del óxido de hierro. El calcio, el magnesio y la alúmina son removidos por la cal fundida y se extraen como escoria.

Los procesos subsecuentes que se aplican en el arrabio dependen del producto final deseado (es decir el contenido final de carbono). Para producir acero se utilizan los procesos neumáticos, de corazón abierto y horno eléctrico.

7.2 Temperaturas en el Alto Horno.

El alto horno opera con el principio de intercambio de calor en contraflujo y energías químicas. A pesar de que la producción de hierro en el alto horno ha existido por más de 100 años, se sabe muy poco acerca de la distribución de temperaturas; esto dificulta el entendimiento de las condiciones de servicio de los materiales refractarios usados en el tragante, la cuba, el etalaje y el crisol.

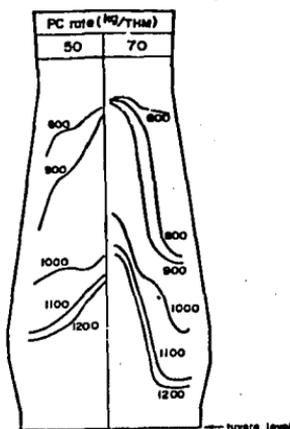


Fig.7.1.-Distribución de Temperaturas en el Alto Horno Kobe No.3

La tabla 7.1 muestra una idea de las temperaturas que se alcanzan en el alto horno mostrando la temperatura de los gases en diferentes zonas.

Tabla 7.1.-Temperatura de los Gases en varias Zonas del Alto Horno, °C

| Zona del Alto Horno | Temperatura Máxima | Temperatura Mínima |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| Crisol | 1900 | 600 |
| Etalaje | 1200-1300 | 960 |
| Vientre | 1450 | - |
| Cuba: | | |
| Parte Inferior | 1100-1145 | 805 |
| Parte Media | 925-980 | 540-700 |
| Parte Superior | 580-620 | 305-400 |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.3 Refractarios usados en el Alto Horno.

En cuanto al uso de refractarios, el Alto Horno se puede dividir en dos zonas principales:

- (a) la zona alta donde la parte más crítica es la cuba;
- (b) la zona baja que contiene el crisol, el etalaje, el vientre y las boquillas de inyección.

Los límites de temperatura aproximados en la zona baja son de 1300 a 1800°C, y en la zona alta son de 200 a 1300°C. La zona baja tiene que soportar las altas temperaturas, el hierro fundido y las escorias y esto sólo puede ser logrado enfriando los refractarios. La zona alta tiene que ser construida para soportar las fuerzas mecánicas y la corrosión química de los gases y vapores emitidos por la carga.

Una vez que el alto horno está en operación, el crisol estará sometido durante toda su vida a la acción del hierro fundido a temperaturas alrededor de 1500°C y presiones de 5kg/cm² (0.5 Mpa). El crisol debe ser construido con especial cuidado pues cuando se requieren grandes reparaciones el alto horno debe ser desmantelado.

La tabla 1.1 (capítulo 1) muestra el tipo de refractarios empleados en los altos hornos; se observa que el crisol está construido con ladrillos de carbono, por lo que el crisol debe ser enfriado adecuadamente. La remoción de carbono de

los bloques refractarios juega un papel importante en la vida del crisol y esto ocurre cuando se funden hierros con bajos contenidos de carbono, pues el carbono del refractario puede disolverse en el hierro, dejando los bloques más porosos y en situación de desgaste. Una solución posible es usar bloques de carbono de baja permeabilidad, lo que depende del origen del carbono usado en la manufactura de los bloques.

Los refractarios que se encuentran en el crisol se impregnan de hierro, carburos y grafito, provocando un incremento en su densidad y disminuyendo su conductividad térmica. Esto mejora la eficiencia de enfriamiento y retarda el desgaste de los bloques. Sin embargo la parte central del fondo del crisol es reemplazada por hierro y escorias no importando el tipo de refractario empleado.

Las tablas 7.2 y 7.3 muestran algunas características físicas de los ladrillos de carbono, de grafito y semigrafito empleados en el crisol, etalaje y vientre.

Los refractarios empleados en el etalaje son desgastados debido a la corrosión y erosión provocadas por el ataque de escorias a temperaturas de hasta 1500°C y por la acción de la fricción de la carga. Se utilizan refractarios de grafito, semigrafito y alúmina (incluyendo zirconia-alúmina). El grado de corrosión química depende directamente de qué tan básica es la escoria y de su viscosidad. Las escorias que contienen 45% de óxido de calcio son altamente corrosivas. La vida del etalaje para los refractarios de alúmina-sílice está en

función de la formación de una capa de alúmina y sílice enriquecida con cal, magnesio y otros óxidos contenidos en la carga.

Los ladrillos de grafito y semigrafito cuentan con una elevada conductividad térmica, gran resistencia a los alcalis, resistencia a la oxidación y alta resistencia a la carga.

A partir del vientre se utilizan ladrillos de sílice-alúmina con diferentes porcentajes de alúmina. En la parte baja del tragante, los alcalis pueden penetrar profundamente en los ladrillos. Se han encontrado concentraciones de alcalis de hasta 25%, aunque el común es entre un 9 y un 10%. En Estados Unidos se ha reducido el daño a los refractarios insertando enfriadores en la estructura. Mackenzie (1966) sugiere que cuando los alcalis reaccionan con ladrillos de baja composición de alúmina se forma un líquido vidrioso, mientras con ladrillos de alto contenido de alúmina se forma una reacción seca granulosa que puede ocasionar la desintegración del refractario. Un material que contenga 42% de alúmina está en un término medio aceptable y puede absorber alcalis sin crecimiento y producir poca fase líquida o nada. La tabla 7.4 muestra algunas características físicas de los ladrillos sílico-aluminosos.

Tabla 7.2.- Características físicas de los ladrillos de carbono, de grafito y de semigrafito.

| Calidad | Densidad Aparente | Porosidad Abierta | Resistencia a la compresión en frío | Dilatación Térmica Lineal | | | Conductividad Térmica | | | | | |
|---------------|------------------------|----------------------|--|------------------------------|------|------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| | | | | (%) °C | | | (W/Km) °C | | | | | |
| | | | | 200 | 600 | 1000 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
| | % g/cm ³ | Vol % | N/mm ² | | | | | | | | | |
| Carbural R | 1.52 | 14 | 40 | 0.06 | 0.22 | 0.40 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Carbural A | 1.54 | 13 | 45 | 0.06 | 0.21 | 0.38 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 11 |
| Carbural A/G | 1.56 | 16 | 53 | 0.06 | 0.22 | 0.40 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 11 |
| Carbural A/I | 1.63 | 15 | 60 | 0.06 | 0.22 | 0.44 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 11 |
| Carbural AE | 1.52 | 15 | 25 | 0.06 | 0.21 | 0.38 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 13 |
| Carbural AE/I | 1.68 | 17 | 45 | 0.06 | 0.22 | 0.40 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 14 |
| Carbural TG | 1.67 | 21 | 25 | 0.06 | 0.21 | 0.38 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 19 |
| Carbural TGX | 1.72 | 13 | 48 | 0.06 | 0.21 | 0.38 | 33 | 34 | 32 | 29 | 26 | 24 |
| Carbural TG/I | 1.75 | 21 | 48 | 0.06 | 0.22 | 0.40 | 30 | 30 | 28 | 25 | 23 | 22 |
| Carbural G | 1.55 | 26 | 15 | 0.03 | 0.13 | 0.27 | 95 | 84 | 67 | 60 | 55 | 51 |

Tabla 7.3.-Características físicas de los bloques de carbono.

| Calidad | Granulometría | Base de Materia Prima | Densidad aparente | Resistencia a la compresión en frío | Conductividad Térmica |
|------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|---|--------------------------|
| | K | | | (°C) | (°C) |
| | mm | | Kg/dm ³ | N/mm ² | W/mK |
| Carburit GP | 0-8 | Grafito | 1.5 | 10 (150) | 9 (100) |
| Carburit GP10 | 0-8 | Grafito | 1.5 | 9 (150) | 40 (100) |
| Carburit GP Spezial | 0-0.5 | Grafito | 1.7 | 10 (150) | 48 (100) |
| Carburit GT | 0-8 | Grafito | 1.45 | 9 (900) | 13 (100) |
| Carburit GT10 | 0-8 | Grafito | 1.5 | 8 (900) | 35 (100) |
| Carburit GT Spezial | 0-0.5 | Grafito | 1.75 | 7 (900) | 50 (100) |

Tabla 7.4.- Características físicas de los ladrillos sílico-aluminosos.

| Calidad | Temp. Límite de Utilización | Composición Química | | | | Resistencia a la Compresión en Frio | Dilatación lineal | Conductividad Térmica |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | ZrO ₂ | | | |
| | °C | % | | | | N/mm ² | % | W/K m |
| Comprit 135 | 1350 | 41 | 46 | 1.8 | | 65 (110) | -0.05 (110) | 0.70 (400) |
| | | | | | | 35 (1000) | 0 (1000) | 0.60 (600) |
| | | | | | | | | 0.80 (1000) |
| | | | | | | | | 0.80 (1200) |
| Comprit 135 AL | 1350 | 31 | 33 | 1.4 | 29 | 50 (110) | -0.05 (110) | 0.80 (400) |
| | | | | | | 45 (1000) | -0.2 (1000) | 0.80 (600) |
| | | | | | | | | 0.90 (1000) |
| | | | | | | | | 0.90 (1200) |
| Comprit 135 H | 1350 | 43 | 49 | 0.6 | | 60 (110) | -0.05 (110) | 0.90 (400) |
| | | | | | | 35 (1000) | -0.1 (1000) | 0.90 (600) |
| | | | | | | | | 1.00 (1000) |
| | | | | | | | | 1.10 (1200) |
| Comprit 135 HS | 1350 | 36 | 55 | 0.8 | | 35 (110) | -0.05 (110) | 0.80 (400) |
| | | | | | | 25 (1000) | -0.2 (1000) | 0.80 (600) |
| | | | | | | | | 0.90 (1000) |
| | | | | | | | | 1.00 (1200) |
| Comprit 135 HSR | 1350 | 42 | 47 | 0.7 | | 70 (110) | -0.1 (110) | 0.70 (400) |
| | | | | | | 30 (1000) | -0.3 (1000) | 0.80 (600) |
| | | | | | | | | 0.80 (1000) |
| | | | | | | | | 0.90 (1200) |
| Comprit 135 S | 1350 | 41 | 46 | 1.8 | | 30 (110) | -0.05 (110) | 0.60 (400) |
| | | | | | | 20 (1000) | -0.3 (1000) | 0.60 (600) |
| | | | | | | | | 0.70 (1000) |
| | | | | | | | | 0.80 (1200) |
| Comprit 140 | 1400 | 55 | 30 | 1.7 | | 80 (110) | -0.05 (110) | 0.70 (400) |
| | | | | | | 40 (1000) | -0.1 (1000) | 0.70 (600) |
| | | | | | | | | 0.80 (1000) |
| | | | | | | | | 0.80 (1200) |

Tabla 7.4 (continuación).- Características físicas de los ladrillos sílico-aluminosos.

| Calidad | Temp. Límite de Utilización | Composición Química | | | | Resistencia a la Compresión en Frío | Dilatación lineal | Conductividad Térmica |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | ZrO ₂ | | | |
| | °C | % | | | | N/mm ² | % | W/K m |
| Comprit 140 S | 1400 | 56 | 31 | 1.7 | | 35 (110) | -0.05 (110) | 0.60 (400) |
| | | | | | | 25 (1000) | -0.2 (1000) | 0.60 (600) |
| | | | | | | | | 0.70 (1000) |
| | | | | | | | | 0.80 (1200) |
| Comprit 170 H | 1700 | 93 | 2.0 | 0.1 | | 100 (110) | -0.05 (110) | 3.10 (400) |
| | | | | | | 80 (1000) | -0.2 (1000) | 2.40 (600) |
| | | | | | | | | 2.20 (1000) |
| | | | | | | | | 2.50 (1200) |
| Comprit 180 H | 1800 | 96 | 0.2 | 0.1 | | 100 (110) | -0.05 (110) | 3.20 (400) |
| | | | | | | 90 (1000) | +0.01 (1000) | 2.50 (600) |
| | | | | | | | | 2.30 (1000) |
| | | | | | | | | 2.60 (1200) |
| Comprit 185 H | 1850 | 97 | 0.6 | 0.1 | | 80 (110) | -0.05 (110) | 3.30 (400) |
| | | | | | | 55 (1000) | -0.2 (1000) | 2.70 (600) |
| | | | | | | | | 2.60 (1000) |
| | | | | | | | | 2.60 (1200) |
| Comprit 185 H MV | 1850 | 92.5 | 0.5 | 0.1 | 7 MgO | 25 (110) | -0.1 (110) | 3.20 (400) |
| | | | | | | 35 (1000) | 1.3 (1000) | 2.90 (600) |
| | | | | | | | | 2.70 (1000) |
| | | | | | | | | 2.60 (1200) |
| Comprit 185 H MA | 1850 | 91 | 0.1 | 0.1 | 6 MgO | 55 (110) | -0.1 (110) | 3.20 (400) |
| | | | | | | 50 (1000) | -0.1 (1000) | 2.90 (600) |
| | | | | | | | | 2.70 (1000) |
| | | | | | | | | 2.60 (1200) |

7.4. Análisis en la zona alta del Alto Horno.

En la tabla 1.1 del capítulo 1 se observa que los refractarios usados en la cuba del alto horno en diversos hornos son ladrillos sílico-aluminosos con alúmina a diversos porcentajes.

Para nuestro estudio usaremos los porcentajes de alúmina característicos empleados en los ladrillos sílico-aluminosos para los tercios superior, medio e inferior de la cuba de un alto horno (cap. I Sección 3). En el tercio superior de la cuba se utilizarán ladrillos con un 33 a 38% de alúmina, para el tercio medio se usarán ladrillos con un 38 a 42% de alúmina y en el tercio inferior se utilizarán ladrillos con alúmina al 42% y ladrillos de silimanita (60% alúmina).

7.4.1 El tercio superior de la Cuba.

La temperatura máxima alcanzada en el tercio superior de la cuba es de 620°C (tabla 7.1). Consideraremos para el tercio superior el ladrillo refractario de calidad Comprit 135 HS (tabla 7.4) que contiene alúmina al 36%.

La temperatura Máxima de Servicio.

De acuerdo a la tabla 5.2 un refractario sílico-aluminoso con un 35% de alúmina tiene una temperatura máxima de servicio de 1535°C, sin embargo el fabricante da un estimado de 1350°C (tabla 7.4) por lo que el refractario en el

tercio superior de la cuba no tiene problema en soportar la temperatura máxima de 620°C.

Otra fórmula para calcular la Temperatura Máxima de Servicio en función del porcentaje de Al_2O_3 es:

$$MST (^{\circ}C) = 0.0465 (\%Al_2O_3)^2 + 0.713 (\%Al_2O_3) + 1458 \quad (7-1)$$

Para el ladrillo refractario con 36% de Al_2O_3 de acuerdo a la ecuación (7-1) la temperatura máxima de servicio es 1543.9°C; temperatura que está muy por encima de los 620°C alcanzados en el tercio superior de la cuba.

La Conductividad Térmica.

El fabricante muestra la conductividad térmica de este material a diferentes temperaturas (tabla 7.4):

$$T = 400^{\circ}C \quad k = 0.80 \text{ W/mK}, \quad T = 600^{\circ}C \quad k = 0.80 \text{ W/mK}$$

$$T = 1000^{\circ}C \quad k = 0.90 \text{ W/mK}, \quad T = 1200^{\circ}C \quad k = 1.00 \text{ W/mK}$$

Estos valores se representan en la figura 7.2.

De acuerdo a la figura 7.2 la conductividad térmica a una temperatura de 620°C es de 0.81 W/mK.

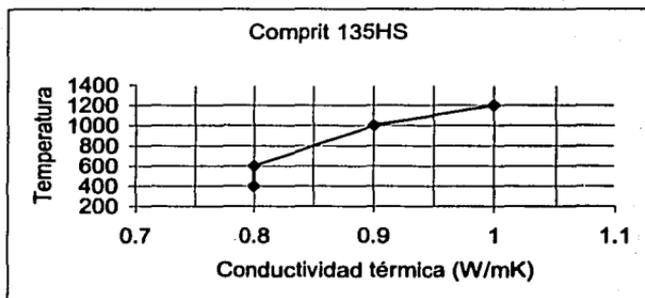


Fig.7.2.-Conductividad Térmica de los ladrillos Comprit 135HS.

El módulo de Young.

El tamaño de grano tiene poco efecto a bajas temperaturas en el módulo de Young de los refractarios, pero tiene un gran efecto en las microfrazas. Dependiendo del grado de textura los refractarios pueden tener (a) valores muy bajos del módulo de Young, y (b) una dependencia de E respecto a P, con la relación $E = E_0 \exp(-bP)$.

Existen tres diferentes valores del módulo de Young en un refractario, que es necesario distinguir:

1. El módulo *intrínseco*, E_i , que está asociado a la densidad teórica del material y sin microfrazas, está en función de la composición de fase y en la temperatura.
2. El módulo *dinámico*, E_d , que representa el comportamiento elástico pero agregando el efecto de las microfrazas y la porosidad; se mide

por la propagación del sonido en el sólido, pero no tiene conexión matemática alguna con E_i .

3. El módulo *estático*, E_s , que sobrepone a E_d los efectos de los procesos de deformación plástica (no linealidad de σ vs. ϵ) los cuales presentan histéresis y pueden ser irreversibles. Es medido como el esfuerzo contra la deformación hasta la fractura pero con cargas relativamente bajas o velocidades de deformación bajas.

En los cerámicos libres de microfracturas, E_i se calcula midiendo E_s a baja porosidad y extrapolando a $P=0$.

Con el fin de estimar la variación del módulo de Young con la temperatura, tenemos que considerar que desde la temperatura ambiente hasta la MST el módulo de Young presenta una disminución lineal del 20%.

La variación del módulo de Young con la porosidad del material puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$E_s = E_i \exp(-bP) \quad (7-2)$$

Donde P es la porosidad del material en tanto por uno ($P \rightarrow 0$, $E_s \rightarrow E_i$) y b es una constante que es igual a 2.5 cuando $T < 1000^\circ\text{C}$ y a 3.5 para $T > 1000^\circ\text{C}$.

Utilizaremos las tablas 4.1 y 4.2 (Cap. IV) para determinar la porosidad de un ladrillo refractario con un contenido de alúmina del 33 al 38%. En este caso el

ladrillo de arcilla para trabajos pesados ("high duty", 35 a 40% de Al_2O_3 , 51 a 59% SiO_2) cuenta con una porosidad aparente de 4.2 a 30.4%. Un caso crítico es la porosidad de 30.4%.

Para un ladrillo Comprit 135HS (Tabla 7.4) la resistencia a la compresión (CS, compressive strength) es:

$$A T = 110 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad CS = 35 \text{ Mpa}$$

$$A T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad CS = 25 \text{ Mpa},$$

La relación entre el MOR y la resistencia a la Compresión se define por la ecuación:

$$CS = 4.5 \text{ MOR} \quad (7-3)$$

Por lo tanto:

$$A T = 110 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad MOR = 35 \text{ Mpa} / 4.5 = 8.75 \text{ Mpa}$$

$$A T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad MOR = 25 \text{ Mpa} / 4.5 = 5.56 \text{ Mpa},$$

Para la estimación del módulo de Young usaremos la ecuación desarrollada por Griffith:

$$MOR(\text{Pa}) = 1.23 (E_p/C)^{1/2} \quad (7-4)$$

En donde C es el tamaño del defecto que para los refractarios es del orden de 2.0×10^{-4} (200 μm).

Por lo tanto:

$$\text{A } T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = (8.75 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 10.12 \text{ Gpa}$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = (5.56 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 4.09 \text{ Gpa}$$

Para estimar E_i , utilizamos la ecuación (7-2):

$$E_i = E_s / \exp(-bP),$$

$$\text{A } T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow b = 2.5, \quad E_i = 10.12 \times 10^9 / \exp(-2.5 \times 0.304) = 21.64 \text{ Gpa},$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow b = 3.5, \quad E_i = 4.09 \times 10^9 / \exp(-3.5 \times 0.304) = 11.85 \text{ Gpa}$$

En la figura 7.3 se observa la curva E_s contra Temperatura para el refractario Comprit 135HS. Por lo tanto:

$$\text{A } T = 620 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = 6.5 \text{ Gpa}$$

$$E_i = (6.5 \times 10^9) / \exp(-2.5 \times 0.304) = 13.9 \text{ Gpa}.$$

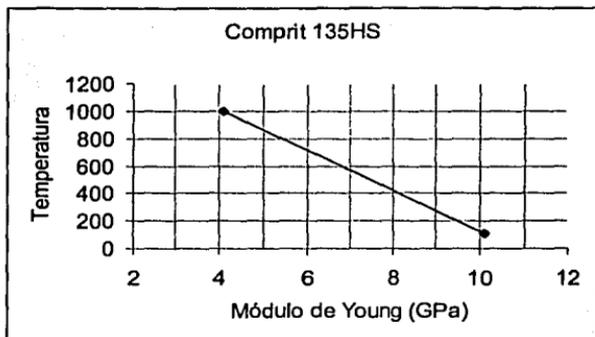


Fig.7.3.- Módulo de Young estático en función de la temperatura para el ladrillo Comprit 135HS

El Coeficiente de dilatación térmica.

Para el caso del refractario Comprit 135 HS (Tabla 7.4):

A $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = -0.05%

A $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = -0.2%

El coeficiente de dilatación térmica se define con la siguiente ecuación:

$$\Delta L = \alpha L_0 (T_2 - T_1) \quad (7-5)$$

$$\alpha = - (0.002 - 0.0005) / (1000 - 110^{\circ}\text{C}) = - 1.69 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

7.4.2 El tercio medio de la Cuba.

La temperatura máxima alcanzada en el tercio medio de la cuba de acuerdo a la tabla (7.1) es de 980°C. En este caso el refractario usado en el tercio medio de la cuba debe contener de 38 a 42 % de Al_2O_3 . Utilizaremos el refractario de calidad Comprit 135 cuya composición de acuerdo a la tabla (7.4) es de 41% de Al_2O_3 , 46% de SiO_2 y 1.8% de Fe_2O_3 .

La temperatura Máxima de Servicio.

Para un refractario silico-aluminoso con un 45% de alúmina ("super duty") se tiene una temperatura máxima de servicio de 1570°C (tabla 5.2), esta temperatura está por encima de la temperatura máxima de 980°C. El fabricante da un estimado de 1350°C (tabla 7.4).

La Temperatura Máxima de Servicio en función del porcentaje de Al_2O_3 (ec. 7-1) es 1565.4°C.

La Conductividad Térmica.

La conductividad térmica del refractario Comprit 135 (tabla 7.4) es:

$$T = 400^\circ C \quad k = 0.70 \text{ W/mK}, \quad T = 600^\circ C \quad k = 0.60 \text{ W/mK}$$

$$T = 1000^\circ C \quad k = 0.80 \text{ W/mK}, \quad T = 1200^\circ C \quad k = 0.80 \text{ W/mK}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

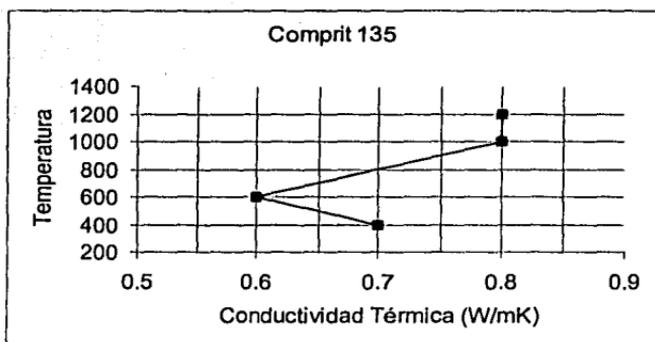


Fig.7.4.-Conductividad Térmica de los ladrillos Comprit 135.

De acuerdo a la figura 7.4 la conductividad térmica a una temperatura de 980°C es de 0.80W/mK.

El módulo de Young.

La porosidad de un ladrillo refractario con un contenido de Al_2O_3 del 40 al 52%, SiO_2 de 39% a 45% y Fe_2O_3 0.5 a 3.6 % (monolitos de alta alúmina o arcillas cocidas a 2700°F; tablas 4.1 y 4.2) es de 28.4 a 37.8%. El caso crítico es 37.8%.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para el refractario Comprit 135, la resistencia a la compresión (tabla 7.4)

es:

$$A T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad CS = 65 \text{ Mpa}$$

$$A T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad CS = 35 \text{ Mpa},$$

Por la ecuación (7-3):

$$A T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad MOR = 65 \text{ Mpa} / 4.5 = 14.44 \text{ Mpa}$$

$$A T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad MOR = 35 \text{ Mpa} / 4.5 = 7.78 \text{ Mpa},$$

El módulo de Young estático es (ec. 7-4):

$$A T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = (14.44 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 27.56 \text{ Gpa}$$

$$A T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = (7.78 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 8.00 \text{ Gpa}$$

El módulo de Young intrínseco es (ec. 7-2):

$$E_i = E_s / \exp(-bP),$$

$$A T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow b = 2.5, \quad E_i = 27.56 \times 10^9 / \exp(-2.5 \times 0.378) = 70.91$$

Gpa,

$$A T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow b = 3.5, \quad E_i = 8.00 \times 10^9 / \exp(-3.5 \times 0.378) = 30.04 \text{ Gpa}$$

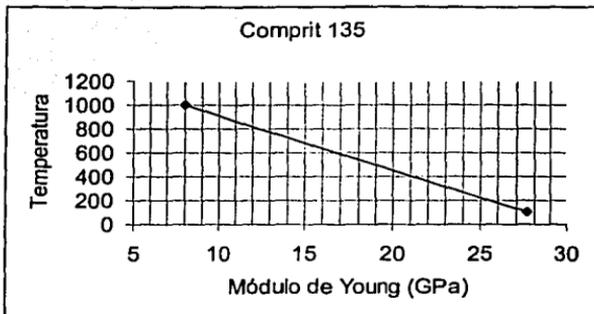


Fig.7.5.- Módulo de Young estático en función de la temperatura para el ladrillo Comprit 135.

De acuerdo a la figura 7.5:

$$\text{A } T = 980 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad E_s = 8.00 \text{ Gpa}$$

$$E_i = (8.00 \times 10^9) / \exp(-2.5 \times 0.378) = 20.58 \text{ Gpa.}$$

El Coeficiente de dilatación térmica.

Para el refractario Comprit 135 (tabla 7.4):

$$\text{A } T = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \text{Dilatación Lineal} = -0.05\%$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \text{Dilatación Lineal} = 0\%$$

El coeficiente de dilatación térmica es (ec. 7-5):

$$\alpha = -(0.0 - 0.0005) / (1000 - 110^{\circ}\text{C}) = 0.56 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

7.4.3 El tercio inferior de la Cuba.

La temperatura máxima que se alcanza en el tercio inferior de la cuba es de 1145°C (tabla 7.1). En este caso el refractario usado en el tercio medio de la cuba debe contener 42 % de Al_2O_3 . El refractario Comprit 135HSR (42% Al_2O_3 , 47% SiO_2 , 0.7% Fe_2O_3) cumple con esta condición (tabla 7.4).

La temperatura Máxima de Servicio.

El refractario sílico-aluminoso con 45% de alúmina ("super duty") tiene una temperatura máxima de servicio de 1570°C (tabla 5.2).

Para el refractario Comprit 135HSR la temperatura máxima de servicio es de 1350°C (tabla 7.4).

La Temperatura Máxima de Servicio en función del porcentaje de Al_2O_3 (ec. 7-1) es 1570°C.

Las tres diferentes fuentes de la Temperatura máxima de servicio están por debajo de la temperatura máxima alcanzada en la parte inferior de la cuba (1145°C).

La Conductividad Térmica.

La conductividad térmica del refractario Comprit 135HSR es (tabla 7.4):

$T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0.70\text{ W/mK}$, $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0.80\text{ W/mK}$

$T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0.80\text{ W/mK}$, $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $k = 0.90\text{ W/mK}$

Estos datos se encuentran graficados en la figura 7.6. La conductividad térmica a una temperatura de 1145°C , de acuerdo a la figura 7.6 es de 0.88W/mK .

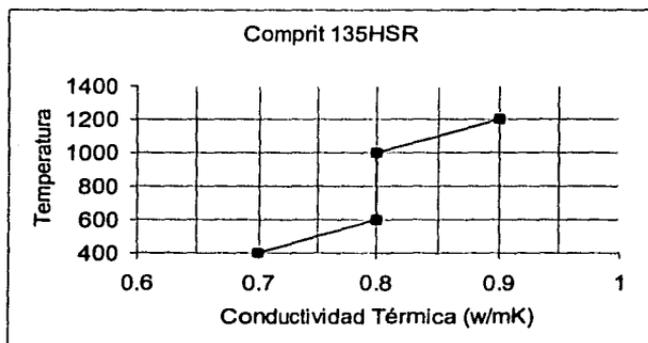


Fig.7.6.-Conductividad Térmica de los ladrillos Comprit 135HSR.

El módulo de Young.

La porosidad de un ladrillo refractario con un contenido de Al_2O_3 del 40 al 52%, SiO_2 de 39% a 45% y Fe_2O_3 0.5 a 3.6 % (monolitos de alta alúmina a 2700°F; tablas 4.1 y 4.2) es de 28.4 a 37.8%. El caso crítico es 37.8%.

La resistencia a la compresión para el refractario Comprit 135HSR (tabla 7.4) es:

$$\text{A } T = 110 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{CS} = 70\text{Mpa}$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{CS} = 30\text{Mpa},$$

El módulo de ruptura (ec. 7-3):

$$\text{A } T = 110 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{MOR} = 70\text{Mpa} / 4.5 = 15.56 \text{ Mpa}$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \text{MOR} = 30\text{Mpa} / 4.5 = 6.67 \text{ Mpa},$$

El módulo de Young estático es (ec. 7-4):

$$\text{A } T = 110 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_s = (15.56 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200\mu\text{m}) = 32.00 \text{ Gpa}$$

$$\text{A } T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad E_s = (6.67 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200\mu\text{m}) = 5.88 \text{ Gpa}$$

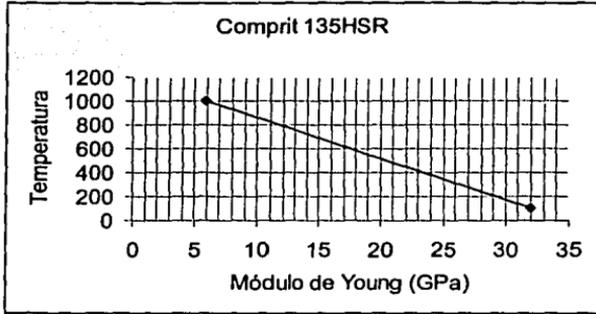


Fig.7.7.- Módulo de Young estático en función de la temperatura para el ladrillo Comprit 135HSR.

El módulo de Young intrínseco es (ec. 7-2):

$$E_i = E_s / \exp(-bP),$$

$$\text{A } T = 110^\circ\text{C} \Rightarrow b = 2.5, \quad E_i = 32.00 \times 10^9 / \exp(-2.5 \times 0.378) = 82.33 \text{ Gpa},$$

$$\text{A } T = 1000^\circ\text{C} \Rightarrow b = 3.5, \quad E_i = 5.88 \times 10^9 / \exp(-3.5 \times 0.378) = 22.08 \text{ Gpa}$$

Por la figura 7.7:

$$\text{A } T = 980^\circ\text{C}, \quad E_s = 4.00 \text{ Gpa}$$

$$E_i = (4.00 \times 10^9) / \exp(-2.5 \times 0.378) = 10.29 \text{ Gpa}.$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

El Coeficiente de dilatación térmica.

Para el refractario Comprit 135HSR (Tabla 7.4):

A $T = 110^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.1%

A $T = 1000^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.3%

El coeficiente de dilatación térmica es (ec. 7-5):

$$\alpha = (0.003 - 0.001) / (1000 - 110^{\circ}\text{C}) = 2.25 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

7.5. Análisis en la zona baja del Alto Horno.

Los refractarios utilizados en el vientre y etalaje del alto horno están fabricados a base de grafito y semigrafito; en el caso del crisol se utilizan ladrillos de carbono (tabla 1.1).

Para nuestro estudio analizaremos los ladrillos de calidad Carbural A y Carbural A/I que son ladrillos típicamente usados en la zona baja del alto horno.

De acuerdo a la tabla 7.1 la temperatura máxima alcanzada en la zona baja del alto horno es de 1900°C .

La temperatura máxima de servicio.

Los refractarios a base de carbono listados en la tabla 5.1 son comúnmente empleados como sustancias simples. La temperatura máxima de servicio está cercana al punto de fusión; por lo tanto de acuerdo a la tabla 5.1 un ladrillo

refractario de carbono o grafito cuenta con un punto de fusión de 3650°C!!!, o sea 2200°C por encima de la temperatura máxima alcanzada en el vientre.

El módulo de Young.

Para el Carbural A la resistencia a la compresión en frío de acuerdo a la tabla 7.2 es de 45 Mpa.

Aplicando la ecuación 7-3:

$$\text{MOR (Pa)} = 45 \times 10^6 / 4.5 = 10 \text{ Mpa.}$$

Para calcular el Módulo de Young intrínseco utilizamos la ecuación 7-4:

$$E_i = (10 \times 10^6 \text{ Pa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 13.22 \text{ Gpa.}^1$$

La tabla 4.2 muestra una porosidad para los ladrillos de carbono a base de grafito de 15 a 17%, el caso crítico es 17%.

Por lo tanto sustituyendo en la ecuación 7-2:

$$E_s = 13.22 \text{ Gpa} \exp(-2.5 \times 0.17) = 8.64 \text{ Gpa,} \quad T < 1000^\circ\text{C}$$

$$E_s = 13.22 \text{ Gpa} \exp(-3.5 \times 0.17) = 7.29 \text{ Gpa.} \quad T > 1000^\circ\text{C.}$$

Similarmente para el Carbural A/I el fabricante muestra la resistencia a la compresión en frío de 60Mpa (tabla 7.2).

Aplicando la ecuación 7-3:

$$\text{MOR} = 60 \text{ Mpa} / 4.5 = 13.33 \text{ Mpa,}$$

Por la ecuación 7-4

$$E_i = (13.33 \times 10^6 \text{ Mpa} / 1.23)^2 (200 \mu\text{m}) = 23.49 \text{ Gpa.}$$

El módulo de Young estático es (ec. 7-2):

$$E_s = 23.49 \text{ Gpa} \exp(-2.5 \times 0.17) = 15.36 \text{ Gpa}, \quad T < 1000^\circ\text{C},$$

$$E_s = 23.49 \text{ Gpa} \exp(-3.5 \times 0.17) = 12.96 \text{ Gpa}, \quad T > 1000^\circ\text{C}$$

La conductividad térmica.

La conductividad térmica del refractario Carbural A es de acuerdo a la tabla 7.2:

| | | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| $T = 100^\circ\text{C}$ | $k = 5 \text{ W/mK},$ | $T = 200^\circ\text{C}$ | $k = 6 \text{ W/mK}$ |
| $T = 400^\circ\text{C}$ | $k = 7 \text{ W/mK},$ | $T = 600^\circ\text{C}$ | $k = 9 \text{ W/mK}$ |
| $T = 800^\circ\text{C}$ | $k = 10 \text{ W/mK},$ | $T = 1000^\circ\text{C}$ | $k = 11 \text{ W/mK}$ |

Observando la línea de tendencia de la figura 7.8 a una temperatura de 1900°C la conductividad térmica de un Carbural A es de 17.5 W/mK .

¹ Se supone que es el Módulo de Young Intrínseco pues el fabricante muestra solamente la resistencia a la compresión en frío.

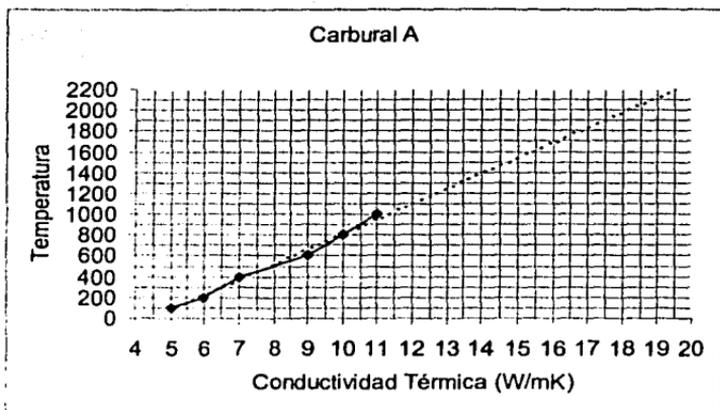


Fig.7.8.- Conductividad Térmica de los refractarios de calidad Carbural A.

Los valores de la conductividad térmica del Carbural A/I son:

| | | | |
|-----------|-------------|------------|-------------|
| T = 100°C | k = 6 W/mK, | T = 200°C | k = 7 W/mK |
| T = 400°C | k = 8 W/mK, | T = 600°C | k = 10 W/mK |
| T = 800°C | k = 11W/mK, | T = 1000°C | k = 11W/mK |

La figura 7.9 muestra la curva de tendencia de la conductividad térmica de los refractarios de calidad Carbural A/I que para una temperatura de 1900°C es también de 17.5 W/mK.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

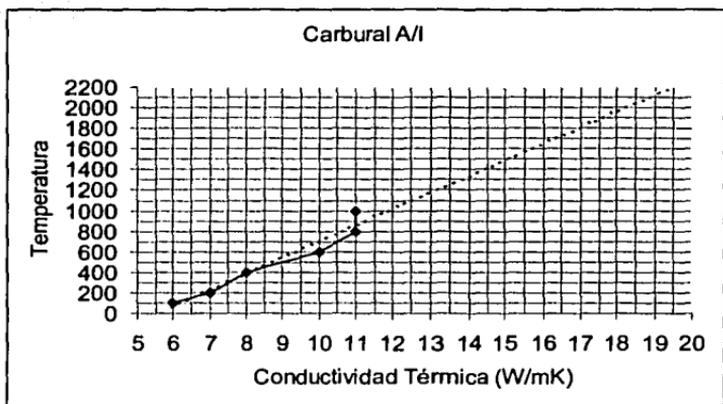


Fig.7.9.-Conductividad Térmica de los refractarios de calidad Carbural A/I.

El Coeficiente de dilatación térmica.

Para el ladrillo Carbural A (Tabla 7.2):

A $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.06%

A $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.21%

A $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.38%

Para el Carbural A/I:

A $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.06%

A $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.22%

A $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dilatación Lineal = 0.44%,

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Los datos de la dilatación térmica lineal del Cabural A y del Carbural A/I se muestran en la figura 7.10 junto con la línea de tendencia de cada uno.

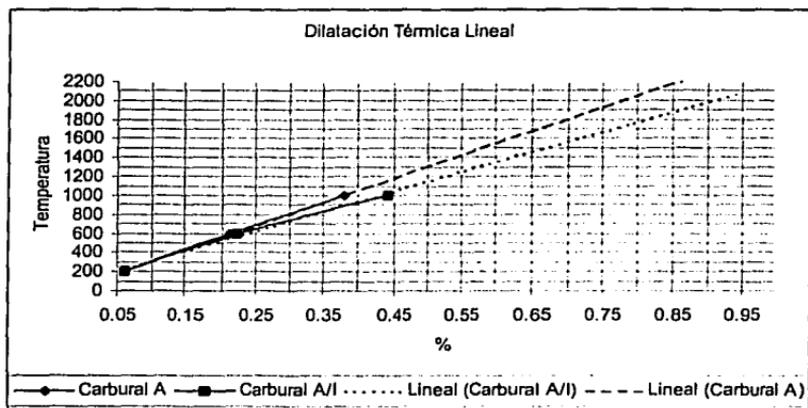


Fig.7.10.- Dilatación Térmica lineal de los refractarios Carbural A y Cabural A/I.

De acuerdo a la figura 7.10 a una temperatura de 1900°C, la dilatación térmica lineal del Carbural A es 0.74% y para el Carbural A/I es 0.86%.

Por lo tanto el coeficiente de dilatación térmica es (ec. 7-5):

Para el Carbural A: $\alpha = (0.0074 - 0.0006) / (1900 - 200^{\circ}\text{C}) = 4.0 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Para el Carbural A/I: $\alpha = (0.0086 - 0.0006) / (1900 - 200^{\circ}\text{C}) = 4.7 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.6. Desgaste de los materiales refractarios en el Alto Horno.

Los mecanismos predominantes en el desgaste de un alto horno se pueden separar en dos grupos: *el desgaste suave o dimensional* y *el desgaste duro o catastrófico*, caracterizado por fracturas. Las fracturas van acompañadas de distintas formas de desgaste suave que provoca el incremento en el tamaño de las fisuras y ayudan en su desarrollo.

El principal mecanismo de desgaste suave que se observa en el Alto Horno es la abrasión, debido a la acción destructiva de partículas duras presentes en la escoria. Además debido a la condición de alta temperatura existirán otros mecanismos de desgaste suave como la erosión, el desgaste químico, la adhesión y el desgaste térmico.

Todas estas formas de desgaste suceden al mismo tiempo y cooperan en la destrucción del interior del alto horno.

7.6.1 El desgaste abrasivo en los cerámicos.

La abrasión se define como el proceso en el que partículas duras o protuberancias son forzadas contra una superficie sólida y son movidas a lo largo de ella; el resultado es el desgaste del material de la superficie y se denomina como "desgaste abrasivo". Las partículas duras son los "abrasivos".

Para discutir los diversos mecanismos de remoción que ocurren durante la abrasión, es de gran ayuda revisar los aspectos generales de la interacción de las partículas abrasivas con la superficie (fig. 7.11).

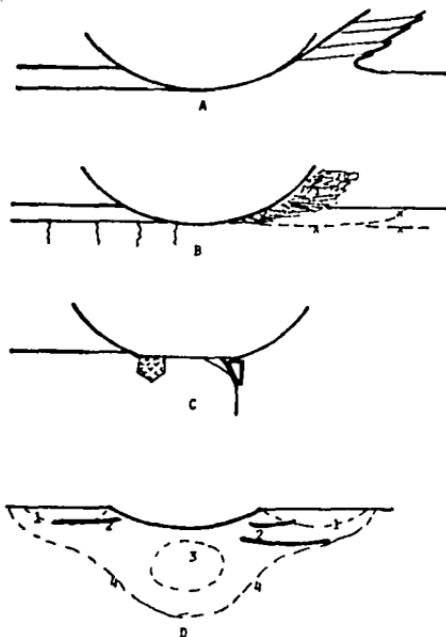


Fig.7.11.-Perfiles de varias interacciones abrasivo-superficie: (A) metal dúctil-abrasivo duro, (B) composite de baja ductilidad-abrasivo duro (x = posibilidad de fractura intergranular esperada para algunos materiales cerámicos), (C) composite de baja ductilidad-abrasivo suave, irregularidad cerca de superficie, (D) fracturas formadas por indentación en material frágil; (1) fracturas radiales, (2) fracturas laterales, (3) fractura media, (4) fractura frontal después de la carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Un primer modelo del desgaste por abrasivos duros compara los granos a los de un perforador duro, que forma una muesca como en la figura 7.11 A). Si el material es dúctil, formará pequeñas hojuelas en la orilla frontal del grano que además serán forzadas a las orillas de la muesca. Eventualmente las capas de la superficie son dañadas.

En el caso de materiales con ductilidad limitada como los carburos cementados, los mecanismos de desgaste son similares excepto que las hojuelas removidas generalmente están en la forma de aglomerados de pequeños fragmentos de material; además puede existir fractura por fragilidad removiendo pequeñas rebabas de material en las regiones cerca del grano abrasivo. Adicionalmente, la superficie dañada puede tener fracturas por tensión, que se forman bajo el grano deslizado (Fig. 7.11 B).

Cuando aumenta la dureza del material afectado y se acerca a la dureza del abrasivo, se vuelve necesario considerar el comportamiento del sistema como un todo. Ahora, el grano se deforma como resultado de la carga, y si la relación profundidad muesca-diámetro de grano está por debajo de cierto valor, no existirá material removido por deformación plástica. Por lo tanto el abrasivo, que se considera duro de acuerdo a la relación discutida arriba de $H_a/H_m = 1.2$, puede de hecho comportarse como un abrasivo suave. Este tipo de

comportamiento puede ser visto, por ejemplo, cuando las condiciones de operación resultan en cargas bajas en abrasivos grandes.

Cuando el abrasivo es “relativamente suave”, no puede perforar la superficie (Fig. 711 C). Se desliza sobre la superficie como una aspereza, que produce fuerzas de fricción en la superficie del material.

7.6.2. Mecanismos de desprendimiento de material en el desgaste abrasivo.

Todos los materiales naturales abrasivos son relativamente blandos comparados con los refractarios avanzados y por lo tanto serán desgastados por los mecanismos de desgaste blandos. Esto incluye las abundantes partículas de cuarzo, que están presentes en arena, polvo, cenizas, etc. Por lo tanto la mayoría de los problemas ocasionados por desgaste abrasivo caen en la región de “desgaste suave” para los refractarios avanzados.

Mecanismos de Abrasión Suave.

Generalmente se espera que las fuerzas de fricción de las asperezas predominen en los mecanismos de abrasión suaves. La mayoría de los daños ocurrirán en las partes débiles de la superficie, como el material soportado parcialmente en las orillas, los poros y las marcas de granos. Estos defectos se

esparcen en contraflujo o dirección opuesta. Este fenómeno no ha sido estudiado con gran detalle, pero es claro que el estado inicial de la superficie es el factor principal que determina la aparición del daño. Adicionalmente a los efectos de las orillas, pueden ocurrir daños por fatiga.

Mecanismos de Abrasión Dura.

El tamaño o forma de una perforación y la dureza determinan el tipo de deformación. Cuando existen perforaciones poco profundas, no se forman fracturas pero existe una deformación plástica. Este régimen es el mismo que se forma en las operaciones de acabado de los cerámicos. En esta región, el esfuerzo de cedencia y/o el ciclo bajo de fatiga a alta deformación y las velocidades de deformación controlan la resistencia al desgaste.

Para perforaciones más profundas y/o materiales más frágiles, se forman fracturas de varios tipos: primero las fracturas radiales al lado de la perforación, después las fracturas laterales debajo de la superficie; por último, para perforaciones más profundas de materiales frágiles, las fracturas de profundidad media (Fig. 7.11 D).

Se han desarrollado gran cantidad de modelos de desgaste basados en la suposición que todo el material sujeto a fracturas es removido y además la suposición implícita que los abrasivos son tan duros que su deformación es

despreciable. Estos modelos tienden a ser expresiones complicadas como por ejemplo:

$$V \propto K_c^{-3/4} H^{-1/2} P^{5/4} \quad (\text{A.G. Evans y T.R. Wilshaw})$$

Donde V es la pérdida de volumen por unidad de distancia de deslizamiento, K_c es la dureza de la fractura, H es la dureza de la perforación, y P es la carga aplicada.

Una expresión similar es propuesta por Evans y Marshall:

$$V \propto P^{1.125} K_c^{-0.5} H^{-0.625} (E/H)^{0.8}$$

Donde E es el módulo de Young.

Las dos ecuaciones anteriores exageran los efectos de la fractura frágil. Las causas posibles son que no todo el material fracturado es removido; que las fracturas en la superficie del material pueden liberar algunos esfuerzos y por lo tanto hacer la superficie más resistente al daño de los subsecuentes granos perforadores; y que las propiedades macroscópicas del material no dañado usado en las pruebas pueden no representar los eventos microscópicos del material dañado severamente que constituyen el desgaste.

Muchos cerámicos estructurados son de grano fino y tienen fronteras de grano débiles, por ejemplo, cuando existe microporosidad o materiales de unión. Por lo tanto, las fracturas alrededor de los granos perforadores pueden no ser tan lineales como la de la figura 7.11 D, sino que pueden seguir las fronteras de

grano. Para ciertas condiciones, se puede esperar que la onda de esfuerzo que va delante del perforador en movimiento puede forzar que las fracturas por debajo de la superficie se formen paralelas a la superficie (fig. 7.11 D) y por lo tanto crear un submecanismo de desgaste adicional.

7.7. Proposición del Modelo Tribológico del Alto Horno.

Si se considera que la resistencia al desgaste abrasivo está definida por la resistencia al esfuerzo cortante del material atacado, entonces la destrucción del refractario del alto horno debe ser más rápida en las zonas en donde los esfuerzos cortantes alcanzan su nivel máximo.

Por lo tanto, utilizando este principio se puede predecir que los esfuerzos cortantes controlarán el desarrollo del desgaste suave, mientras que la aparición de fracturas estará vinculada con aquellas zonas en donde el nivel y el gradiente de los esfuerzos de tensión alcancen sus valores máximos.

El desgaste se presenta en condiciones de altos esfuerzos de contacto entre el material abrasivo y el material presionado. Las condiciones en la zona de contacto se aproximan a las de la presión hidrostática, y en tales condiciones, la teoría indica que para lograr la deformación plástica o el desplazamiento de material, es necesario subir el nivel de carga lo suficiente para superar por tres veces el esfuerzo de cedencia del material, definido en la prueba uniaxial:

$$W_{nu} / A_{ch} = 3\sigma_{up} \quad (7-6)$$

En donde:

A_{ch} es el área de contacto real proyectada sobre la superficie de contacto,

W_{un} es la carga normal unitaria (que corresponde a una partícula) y,

σ_{up} es el límite de plasticidad en las condiciones de contacto.

Suponiendo que el área de contacto tiene una geometría circular con radio r :

$$W_{un} = (3\sigma_{up}) (\pi r^2) \quad (7-7)$$

Durante el desplazamiento relativo de los cuerpos en contacto, una partícula abrasiva idealizada forma mediante acción cortante una ranura transversal con forma triangular y área (ver figura 7.12):

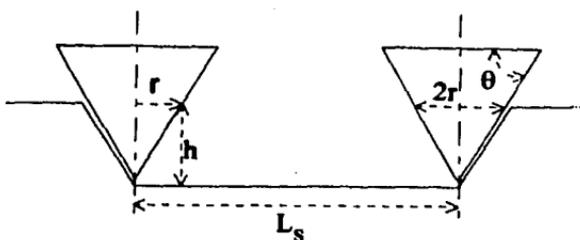


Fig7.12.- Parámetros geométricos de una partícula abrasiva.

$$A_{ch} = rh = r^2 \tan \theta \quad (7-8)$$

El volumen de material desgastado (V_{abr}) separado a lo largo del desplazamiento relativo L_s es igual a:

$$V_{abr} = A_{ct} L_s = L_s r^2 \tan\theta \quad (7-9)$$

Si se considera r el radio de contacto derivado de la fórmula (7-7), el desgaste abrasivo causado por una partícula se obtiene de la siguiente fórmula:

$$V_{abr} = W_{un} L_s \tan\theta / 3\pi\sigma_{up} \quad (7-10)$$

Considerando todos los granos activos que atacan abrasivamente al material que resiste la carga:

$$V_{abr} = W L \tan\phi / 3\pi\sigma_{up} \quad (7-11)$$

En donde:

W es la carga normal total,

$\tan\phi$ es el valor promedio para todas las partículas activas,

σ_{up} es el esfuerzo de cedencia del material más blando y,

L es la distancia de deslizamiento total.

Considerando lo anterior, la profundidad media de desgaste abrasivo (d_{abr}) es:

$$d_{abr} = V_{abr} / A_n = (\tan\theta / 3\pi\sigma_{up}) (W / A_n) L \quad (7-12)$$

Que se puede expresar de forma simplificada como:

$$d_{abr} = K_{abr} p L \quad (7-13)$$

Donde p es la presión nominal y K_{abr} es el coeficiente de desgaste abrasivo, que depende de las propiedades del material más blando. Es indispensable para utilizar este modelo de desgaste abrasivo, el determinar de forma experimental el coeficiente K_{abr} . En el caso del Alto horno la definición del coeficiente K_{abr} , se puede realizar experimentalmente, basándose en las observaciones y mediciones de los perfiles de desgaste observados durante los mantenimientos rutinarios al alto horno. Basándose en la naturaleza del desgaste, se puede suponer que la velocidad de desgaste es constante y que bajo condiciones constantes no se observan cambios inesperados en el coeficiente K_{abr} .

BIBLIOGRAFÍA.

- Michael R. Lindeburg, "Mechanical Engineering Reference Manual". Professional Publications, Inc. Tenth Edition, USA.
- R.W. Davidge, "Mechanical Behaviour of Ceramics". Cambridge University Press (1979).
- Stephen C. Carniglia, Gordon L. Barna, "Handbook of Industrial Refractories Technology", NOYES publications, New Jersey, USA, 1992.
- Said Jahanmir, "Friction and Wear of Ceramics", Marcel Dekker, Inc.

- Luis F. Verdeja*, Roberto González**, Piotr Rusek**, “Desgaste de materiales en el crisol del Horno Alto: Proposición de Modelo Tribológico.”, (*) Cátedra de Siderurgia. ETSIMO. Universidad de Oviedo. España. (**) Escuela de Ingeniería. Universidad Panamericana. México.
- Roberto González, “Propiedades Termico-mecánicas de materiales refractarios utilizados en los crisoles de los Hornos Altos”, Escuela de Ingeniería. Universidad Panamericana
- Tablas de Refractarios Prefabricados del Fabricante Didier.
- José Apraiz Barreiro, “Fabricación de Acero Hierro y Fundiciones”, Tomo I, 1era. Edición en español, URMO S.A., Bilbao España.

8. DISCUSIÓN.

Debido a la gran cantidad de materiales refractarios con diversas propiedades mecánicas y químicas, es necesario hacer un estudio de las aplicaciones de cada refractario en el alto horno.

Como se mencionó en el capítulo VII, la obtención del producto final del Alto Horno (Fe) a partir de sus principales óxidos (Fe_2O_3 y Fe_3O_4) se basa en la reducción que el CO ocasiona en estos óxidos para producir FeO, y finalmente Fe y CO_2 .

Refractarios Siliciosos.

La expansión térmica de los ladrillos de Sílice, muestra cambios repentinos dependiendo de los minerales de cuarzo, cristobalita y tridimita sin convertir, pues cada uno de estos minerales tiene su expansión propia característica. Por lo tanto la expansión que ocurra en un ladrillo de alto

contenido de SiO_2 estará determinada por los minerales contenidos en él. Sin embargo todas estas expansiones ocurren debajo de los 570°C , una vez superada esta temperatura los ladrillos siliciosos tienen un buen comportamiento. Esto implica además una buena resistencia al descarapelamiento. En cuanto a temperaturas alcanzadas en el Alto Horno no es recomendable usar ladrillos de este tipo en la parte media y superior de la cuba, pues las temperaturas van de 305°C a 620°C en la parte superior de la cuba y de 540°C a 980°C en la parte media de la cuba. Con estas variaciones de temperatura los ladrillos siliciosos presentarán diversos cambios de volumen que pueden dar lugar a esfuerzos residuales y eventualmente fracturas del ladrillo.

El ladrillo de Sílice muestra poca evidencia de deformación bajo carga, permaneciendo rígido a 50 lb/in^2 hasta fallar por corte a temperaturas de 1650 a 1700°C . La temperatura de 1700°C es alcanzada sólo por los tipos más puros con un máximo de impurezas del 5%. La temperatura de fusión es 1723°C y la temperatura Tammann es 1230°C . En este caso queda descartada la posibilidad de usar ladrillos de SiO_2 en el crisol del Alto Horno pues los rangos de temperatura van de 600°C a 1900°C .

En cuanto a la conductividad térmica los ladrillos siliciosos, presentan una mayor variación en función de la temperatura que el resto de los refractarios.

El diagrama de fase del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ muestra que la más baja temperatura donde aparece líquido es de 1590°C con un 94.5% de SiO_2 y un 5.5% de Al_2O_3 . Sin embargo las impurezas de óxido disminuyen la capacidad calorífica de estos ladrillos (CaO , MgO , FeO , Na_2O y K_2O).

El problema que se presenta con el óxido de hierro es que existe en gran cantidad en el Alto Horno y se puede esperar la formación de líquido aun por debajo de los 1090°C (temperatura que es común en los procesos de acero).

En cuanto a los álcalis presentes, es evidente que con pequeñas cantidades de Na_2O (menos del 1%) la formación inicial de líquido aparecerá por debajo de 1090°C ; mientras que un 10% es suficiente para hacer líquidas las composiciones con alto contenido de sílice. La diferencia con el K_2O es que el Na_2O continúa bajando el punto de formación de líquido con mayores adiciones, pero el K_2O aumenta el punto de formación de líquido en el rango de 10 a 20%.

Otro punto importante es que los ladrillos de sílice carecen de una unión natural y un alto punto de fusión, por lo que se debe agregar un material unificador que no afecte en su refractoriedad. En este caso se usa la cal (CaO), pues la temperatura de fusión permanece sin cambios entre 1 y 27.5% de CaO por la formación de dos líquidos inmiscibles. Aunque hay que tener en cuenta que se requiere sólo una pequeña cantidad de Al_2O_3 para destruir la inmiscibilidad del sistema $\text{SiO}_2\text{-CaO}$. De hecho cada 0.1% de incremento de

Al_2O_3 en el rango de 0.3 a 1.2% de Al_2O_3 disminuye la temperatura de falla 5.5°C.

El sistema FeO-SiO_2 también forma dos líquidos inmiscibles aumentando la tolerancia del ladrillo de sílice para el FeO , sin embargo sólo una pequeña cantidad de Al_2O_3 eliminará esta inmiscibilidad.

Debido a las condiciones atmosféricas del alto horno, la forma de los óxidos de hierro presentes puede variar de FeO a Fe_2O_3 . Los más bajos puntos de fusión ocurren en reacciones de FeO y SiO_2 ; a temperaturas en el rango de 1450°C a 1660°C se producirá menos líquido silicioso con Fe_3O_4 ó Fe_2O_3 que con FeO . Por tanto bajo condiciones oxidantes los ladrillos de sílice muestran una gran tolerancia para el óxido de hierro.

Refractarios aluminosos.

Los ladrillos con alto contenido de alúmina presentan una expansión térmica uniforme en los rangos de temperatura del alto horno, por lo tanto son menos sujetos a desgaste térmico.

La conductividad térmica de los ladrillos aluminosos muestra poca variación en los rangos de temperatura del Alto Horno, por lo que la transmisión de calor (o enfriamiento de la cara caliente) es controlada con un flujo de agua estable en las placas de enfriamiento.

La temperatura máxima de servicio varía desde 1535°C (para ladrillos con 35% de Al_2O_3) hasta 2050°C (ladrillos con un 100% de Al_2O_3), por lo que estos ladrillos son adecuados para las temperaturas alcanzadas en los altos hornos en las zonas de la Cuba, el Vientre y el Etalaje.

El diagrama de fase del sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ muestra que para las composiciones más aluminosas que la mullita (arriba del 71.8% de Al_2O_3) no se desarrolla líquido por debajo de 1840°C, para el resto de las composiciones se presentan dos fases por arriba de 1590°C.

La presencia de óxidos de hierro en el proceso de reducción no afecta a los ladrillos aluminosos (sistema $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$); igualmente los óxidos de calcio no influyen en los ladrillos aluminosos (sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$).

Los álcalis (Na_2O , K_2O) sólo influyen en ladrillos con muy bajos contenidos de alúmina.

Grupo Magnesio-Silicatos.

Este grupo contiene las olivinas (2MgO-SiO_2 , 2CaO-SiO_2 , 2FeO-SiO_2 , 2MnO-SiO_2) y las serpentinas ($3\text{MgO-2SiO}_2\text{-2H}_2\text{O}$).

El silicato de magnesio más deseable es la fosterita (2MgO-SiO_2) por lo que es el producto final que se busca al emplear estos minerales.

La temperatura Tamman de la fosterita es de 1380°C y su temperatura de fusión es de 1910°C, por lo que estos refractarios pueden ser utilizados en la cuba. El silicato bicálcico (2CaO-SiO_2) tiene una temperatura Tamman de 1530°C y una temperatura de fusión de 2130°C y pueden ser utilizados en el vientre y el etalaje.

La desventaja de estos refractarios es que forman líquidos (inmiscibles) a baja temperatura, por lo que tienen poca capacidad de carga a altas temperaturas.

Grupo de Cal-Magnesia.

La magnesita cuenta con una expansión lineal alta, por lo que puede presentar desgaste térmico si existe una variación de temperaturas en el alto horno. Cuentan con una conductividad alta por lo que se debe poner atención en la velocidad a la que el calor es removido de la cara fría. Además la presión del gas en el Alto Horno dirigirá el calor hacia adentro del refractario incrementando su velocidad de vitrificación y flujo.

La magnesia se destaca por su tolerancia a los óxidos de hierro, pues forman una serie continua de soluciones sólidas con puntos de fusión desde 2800°C para 100% de MgO hasta 1371°C con 100% FeO. Pero por otro lado la cal forma ferritas de calcio de bajo punto de fusión (1440°C).

Grupo de Cromita.

Estos minerales de cromo consisten de un vidrio altamente refractario compuesto de FeO , MgO , Al_2O_3 y Cr_2O_3 . Se ven limitados por la Cal, los óxidos de Hierro y la Sílice.

Al igual que los refractarios de Magnesia, los refractarios de cromo cuentan con una elevada expansión lineal por lo que existe el riesgo de descarapelamiento o desgaste térmico. La conductividad térmica de estos ladrillos es prácticamente constante por lo que la velocidad de enfriamiento puede ser controlada fácilmente.

El mineral de cromo consiste de soluciones sólidas de espinelas de cromo con grandes cantidades de silicatos. A altas temperaturas estos silicatos son responsables de la baja resistencia a la deformación bajo carga. Además las espinelas de cromo muestran un crecimiento grande cuando están con óxidos de hierro a altas temperaturas debido a la formación de soluciones sólidas de magnetita ($\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$) y otras espinelas.

Grupo de Carbonos.

Los depósitos de grafito aunque están ampliamente distribuidos requieren de una purificación extensiva pues siempre están mezclados con rocas calcáreas o siliciosas.

El módulo de ruptura de estos refractarios es de 24 a 28 Mpa por lo que tienen una alta resistencia a la carga.

Los ladrillos de Carbono cuentan con una temperatura Tamman de 2670°C por lo que son adecuados para el crisol del Alto Horno.

CONCLUSIONES.

Para una buena selección de los materiales refractarios usados en el alto horno se requiere (a) un conocimiento de las características de los refractarios: la conductividad térmica, el módulo elástico, el coeficiente de dilatación térmica, la temperatura máxima de servicio, la dureza y el comportamiento a elevadas temperaturas, entre otras, además se requiere (c) un conocimiento de las condiciones de servicio: la temperatura, las presiones generadas en el alto horno y las reacciones suscitadas en el alto horno y, basados en la experiencia, (c) la habilidad de relacionar las dos anteriores en términos de desempeño.

Una vez que se tiene información del comportamiento de los refractarios y sus condiciones de servicio, se deben aplicar pruebas de servicio que demuestren que el refractario seleccionado es el adecuado. Si se llegan a encontrar fallas en dichas pruebas, se necesita hacer una investigación más profunda de los refractarios o en su caso cambiar las condiciones de operación utilizadas para la selección del refractario.

Los refractarios del alto horno tienen dos tipos de desgaste, el desgaste suave y el desgaste catastrófico.

El principal mecanismo de desgaste suave que se observa en el Alto Horno es la abrasión, debido a la acción destructiva de partículas duras presentes en la escoria.

La resistencia al desgaste abrasivo de los refractarios se determina por una combinación de factores:

1. Las propiedades del abrasivo, principalmente su dureza relativa a la superficie del refractario y su fragilidad,
2. El tamaño de la profundidad de la muesca, que, en combinación con la dureza de la fractura local en la superficie del material, determina si la remoción de material está en la región dúctil o incluye algunas microfracturas,
3. Las propiedades locales de los componentes microestructurales de la superficie del refractario y el material cerca de la superficie, incluyendo la presencia de poros, fronteras débiles de grano, y regiones endurecidas por la transformación.

La dureza y la forma de la fractura dan una indicación general de la resistencia de un material al desgaste abrasivo, pero pueden ser usadas en

combinación con información de la microestructura, en la predicción cualitativa de los niveles generales de la resistencia a la abrasión.

Los ladrillos siliciosos deberán ser descartados de los procesos del alto horno pues los óxidos de hierro presentes bajarán la temperatura de formación de líquido, por lo que se esperará poca resistencia a la carga. Se requiere sólo un pequeño porcentaje de álcalis para bajar la formación inicial de líquido por debajo de 1090°C. Un bajo porcentaje de alúmina puede destruir la inmiscibilidad que existe entre la sílice y la cal, aumentando el riesgo de falla por corte.

Los refractarios a base de magnesia y silicatos presentan líquidos inmiscibles a baja temperatura por lo que tienen poca capacidad de carga a temperaturas elevadas.

Los ladrillos del grupo de cal-magnesia presentarán desgaste térmico si existen variaciones en la temperatura del alto horno. Además la cal forma ferritas de calcio con bajo punto de fusión.

El grupo de cromita presentará grandes cantidades de silicatos, los cuales son responsables de la baja resistencia a la carga a temperaturas elevadas.

Por lo tanto los refractarios aluminosos deberán ser empleados en la cuba, vientre y etalaje del alto horno (con diversos porcentajes de alúmina), ya que 1) presentan una expansión térmica uniforme en el rango de temperaturas del alto

horno, implicando un control de la temperatura de la cara caliente con un flujo constante de agua en las placas de enfriamiento; 2) la presencia de óxidos de hierro y óxidos de calcio no afecta su desempeño; 3) los álcalis sólo afectan a los ladrillos con muy bajos contenidos de alúmina.

Los refractarios a base de carbono deberán ser empleados en el crisol del alto horno por su alto punto de fusión y su resistencia a la carga a elevadas temperaturas. No se recomienda su uso en la Cuba, vientre y etalaje pues reaccionará con los óxidos de hierro y el dióxido de carbono presentes en la reducción.