

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



DESGASTE DE MATERIALES CERAMICOS EN
CONTACTO CON VIDRIO EN ALTA TEMPERATURA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

P R E S E N T A:
JOSE TALAMANTES SILVA

CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 1995

TM

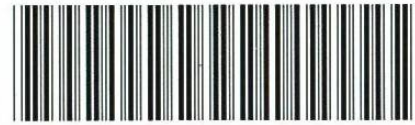
Z5853

.M2

FIME

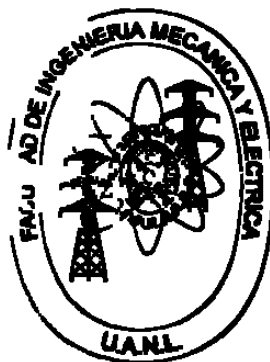
1995

T3



1020070698

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



**DESGASTE DE MATERIALES CERAMICOS EN
CONTACTO CON VIDRIO EN ALTA TEMPERATURA**

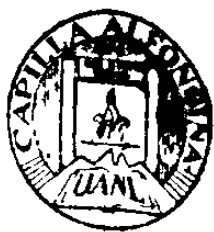
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA:
JOSÉ CALAMANTES SILVA

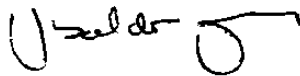
CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 1995

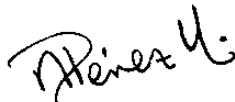


FONDO TESIS


66300



Dr. Ubaldo Ortiz Méndez
Asesor



Dr. Alberto Pérez Unzueta
Co-asesor



Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
Co-asesor

A mi mejor Maestra.

Gracias Jefa !!!

AGRADECIMIENTOS

Al Lic. Andres Monsivais por su gran ayuda para la construcción del horno eléctrico, así como a la Facultad de fisico matematicas por haber facilitado el laboratorio de fabricación de instrumentos para la realización de este trabajo.

Al Ing. Oscar Díaz por su ayuda en el maquinado de las muestras utilizadas en este trabajo de investigación.

A los Ingenieros Gastón Olvera, Buenaventura, y Paulino por sus consejos y ayuda.

Al Dr. Ubaldo Ortiz Méndez por sus consejos e interes mostrado para la realización de esta tesis.

Al Dr. Juan Antonio Aguilar Garib por sus sugerencias y su valioso apoyo para la culminación de este trabajo

Al Dr. Alberto Pérez Unzueta por su apoyo, entusiasmo y consejos ya que sin sus ideas no hubiese podido terminar este trabajo

Mi sincero agradecimiento. al Dr. Rafael Colás por su gran apoyo, ideas y sugerencias.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Electrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por su apoyo durante mis estudios de Licenciatura y Maestría y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ya que sin su apoyo económico no hubiese podido culminar esta etapa de mi vida.

Después de los agradecimientos formales quiero dar gracias:

A DIOS, por todo.

A mis padres por haberme dado la vida y por su apoyo durante toda mi etapa de estudiante.

A mis hermanos Chuy, Chacha y Moy ya que sin ellos mi vida familiar hubiera sido muy aburrida (aunque pocas veces se los he dicho: los quiero). También al nuevo miembro de la familia: el Firulais.

A mi tía Licha y mis primos Lalo, Licha, Angélica, Juan y Cristina por su apoyo en los momentos difíciles

Al Dr. Colás y Dr. Pérez (no hay!) por su ayuda, consejos, entusiasmo, y sobre todo enseñarme a no tirar el primer golpe y ser más diplomático... en fin, por todo su apoyo para poder iniciar una nueva etapa en mi vida (los voy a extrañar). Gracias Jacqui y Natasha!.

Gracias a toda la raza del DIMAT: El Viejo, Lupito, Moy, Vampiro, Char-Lee, Rodillo, Sigi, Mayito, Pablito, Ing. Trejo, García, Julio, Efren, Idalia, Planck, Palafox, Esperanza, Doris, Ana María, Mike, los Carlos, los Cuatro Fanáticos, los Nuevos y el Dream Team. Sigán siendo tan alegres y buenos compañeros como hasta ahora lo han sido. Si se me olvidó alguien no fue a propósito !.

Y claro, a mi GRAN AMIGA KARLA por un año de amistad sincera (te voy a extrañar), no olvidaré tu voz cada vez que me hablabas: TALAMANTEEEEEES !!!.

A todos GRACIAS !!!!!.

INDICE

CAPITULO	1. INTRODUCCION.	1
	1.1 Planteamiento del problema.	2
	1.2 Objetivo.	3
	1.3 Perfil de la tesis.	3
CAPITULO	2. FABRICACION DE VIDRIO.	4
	2.1 Introducción.	4
	2.2 Historia del uso y fabricación de vidrio.	4
	2.3 Vidrio.	5
	2.3.1 Definición.	5
	2.3.2 Estructura del vidrio.	6
	2.3.3 Propiedades físicas del vidrio.	9
	2.3.4 Tipos de vidrio.	11
	2.4 Procesamiento de vidrio.	11
	2.4.1 Materias primas.	12
	2.4.2 Fusión del vidrio.	14
	2.4.2.1 Procesos adversos.	16
	2.4.2.2 Hornos para fundir vidrio.	17
	2.4.3 Formado.	18
	2.4.3.1 Formado Manual.	18
	2.4.3.2 Suministro automático de vidrio caliente.	21
	2.4.3.3 Manufactura automática de envases.	21
	2.5 Tendencias Actuales y futura de la industria del vidrio.	23

CAPITULO	3. MATERIALES CERAMICOS.	25
3.1	Introducción.	25
3.2	Propiedades y clasificación de materiales cerámicos.	25
3.2.1	Definición.	25
3.2.2	Clasificación de cerámicos.	26
3.2.3	Propiedades físicas de los cerámicos.	27
3.3	Procesamiento de materiales cerámicos.	30
3.3.1	Procesado de Polvos.	31
3.3.2	Proceso de Formado.	32
3.3.3	Procesos de densificación (sinterizado).	33
3.4	Materiales cerámicos utilizados en la industria del vidrio.	33
3.4.1	Alúmina.	34
3.4.2	Zirconia.	35
3.4.3	Refractarios para la fusión de vidrio.	37
CAPITULO	4. DESGASTE.	43
4.1	Introducción.	43
4.2	Definición de desgaste.	43
4.3	Tipos y mecanismos de desgaste.	44
4.3.1	Adhesión	45
4.3.2	Delaminación.	45
4.3.3	Abrasión.	46
4.3.4	Erosión.	46
4.3.5	Fretting.	47
4.3.6	Desgaste por impacto.	47

4.3.7 Desgaste por fatiga superficial.	47
4.3.8 Desgaste corrosivo.	48
4.3.9 Desgaste difusivo.	49
4.4 Diseño de las pruebas de desgaste.	49
 CAPITULO 5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	 54
5.1 Introducción.	54
5.2 Diseño del sistema de pruebas de desgaste.	54
5.2.1 Pruebas preliminares.	55
5.2.2 Componentes del sistema de pruebas modelo de desgaste.	57
5.2.2.1 Sistema para la rotación de las muestras.	58
5.2.2.2 Sistema de sujeción de la muestra.	58
5.2.2.3 Unidad térmica.	60
5.2.3 Características y dimensiones de las muestras.	66
5.2.4 Tipo de vidrio utilizado.	68
5.3 Diseño experimental.	68
5.3.1 Procedimiento experimental.	69
 CAPITULO 6. RESULTADOS.	 70
6.1 Introducción.	70
6.2 Sistema de pruebas de desgaste.	70
6.3 Resultados de las pruebas de desgaste.	73

CAPITULO	7. DISCUSION.	78
	7.1 Sistema de pruebas de desgaste.	78
	7.2 Resultados de desgaste	80
CAPITULO	8. CONCLUSIONES.	83
CAPITULO	9. SUGERENCIAS PARA FUTURA TRABAJO.	85
APENDICE		86
REFERENCIAS.		86

CAPITULO 1

INTRODUCCION

El desarrollo industrial se ha caracterizado por una constante mejora en los procesos productivos con el objeto de proporcionar los bienes y servicios que satisfagan al máximo los requerimientos de los usuarios. Este es un mundo competitivo, nuevos productos son lanzados al mercado cada día a espera de atraer un porcentaje del público consumidor. Los fabricantes de los bienes tienen que estar mejorando la calidad de sus productos y servicios constantemente. Este es el caso de la industria de envases de vidrio, la introducción de botellas de plástico para bebidas gaseosas, ha tomado gran parte del mercado que adicionalmente habría dominado la botella de vidrio. Ante esta situación, la industria productora de envases y botellas de vidrio deberá emprender programas de mejoramiento de calidad de sus productos, reducción de sus costos de producción y mejoramiento de sus servicios. Sin embargo se espera que muchos problemas esten sobre la línea del límite tecnológico disponible actualmente. Este es el caso del remplazo de piezas de material cerámico llamadas "bushings" ó chorreadores. Estas piezas deben ser reemplazadas ya sea por el desgaste mismo de la pieza o por un cambio en la corrida de botellas a fabricar. Un cambio de ésta pieza normalmente tomaba de 15 a 20 minutos, las mejoras realizadas en algunas empresas han disminuido este tiempo a sólo 5 o 7 minutos, lo cual ha sido muy beneficioso. Si bien el tiempo actual de cambio de chorreador es relativamente corto (5 a 7 minutos) este tiempo genera un desbalance térmico en el recipiente de colado (ó noria). El tiempo necesario para homogeneizar térmicamente la noria puede llegar a ser de hasta 2 horas. De aquí la necesidad de reducir aún más el tiempo de cambio de un chorreador. El diseño actual de los chorreadores y su ensamble en la noria, no permite reducir aún más este tiempo, se considera que se ha llegado al límite.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Para la producción de envases de vidrio es necesario contar con porciones de vidrio conocidas como "velas". La vela consiste en un cilindro de vidrio fundido que tiene la masa de vidrio que conformará la botella a fabricar. La vela se forma gracias a un pistón que empuja el vidrio hasta hacerlo salir por el orificio de un dispositivo conocido como chorreador o "bushing". Cuando la cantidad de vidrio que ha pasado por este orificio es la requerida para fabricar determinado tipo de producto (en este caso botellas), unas cuchillas cortan esta porción, la cual cae en los moldes para su transformación. Periódicamente es necesario cambiar el chorreador, esto implica detener el proceso de descarga del vidrio.

Esta interrupción provoca perturbaciones en los perfiles térmicos presentes en el vidrio que espera ser descargado. Cuando se reanuda la descarga estas perturbaciones alteran las características del vidrio por lo que es necesario esperar a que los perfiles térmicos sean recuperados antes de poder producir envases con la calidad requerida.

El cambio de chorreador puede llegar a tomar hasta 15 a 20 minutos. Este tiempo es suficiente para crear grandes variaciones térmicas dentro del canal de descarga. El tiempo de recuperación de la homogeneidad térmica del canal y sistema de descarga (noria, bushing, cilindro-tapón, pistón) por lo tanto puede llegar a tomar varias horas. Todo este intervalo es tiempo improductivo lo cual implica un costo intrínseco en el proceso. Por lo anterior, cualquier mejora en el proceso de cambio de chorreador, repercutirá en una reducción del tiempo de recuperación térmica de la noria y por lo tanto en una reducción en los tiempos improductivos de las máquinas.

De aquí la importancia de estudiar el fenómeno de desgaste en el chorreador y de reducir el tiempo de cambio del mismo. El tiempo de cambio de chorreador se ha estado reduciendo cada día más, sin embargo se estima que con el diseño actual, ya se ha llegado al límite del tiempo más corto. De aquí nace la necesidad de buscar nuevos diseños y nuevos materiales que mejoren tanto la vida útil del chorreador así como la reducción del tiempo de cambio.

1.2 OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el de implementar un sistema de pruebas de desgaste que sea útil para encontrar un material alternativo que tenga mejor resistencia al desgaste, a la corrosión, y al choque térmico; de tal manera que, se pueda reducir substancialmente el tiempo de cambio del chorreador.

1.3 PERFIL DE LA TESIS.

En el capítulo 2 se exponen principalmente las características del vidrio de sosa-cal, así como su proceso de fabricación; a continuación en el capítulo 3 se analizan las propiedades y características de los materiales cerámicos utilizados principalmente en la industria del vidrio. En el capítulo 4 se analizan los diferentes tipos de desgaste así como los mecanismos que siguen estos. En el capítulo 5 se expone el procedimiento experimental y el diseño del sistema de pruebas de desgaste. Luego, en el capítulo 6, se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, los cuales son discutidos en el capítulo 7, posteriormente se presentan las conclusiones en el capítulo 8. Por último, en el capítulo 9, se hacen algunas sugerencias para futuros trabajos relacionado con el tema tratado en esta tesis.

CAPITULO 2

FABRICACION DE VIDRIO

2.1 INTRODUCCION

No se sabe a ciencia cierta cuando y dónde el ser humano comenzó a fabricar artículos de vidrio. Lo cierto es que desde que el primer artículo de vidrio fue fabricado, comenzó una carrera tecnológica para crear métodos de manufactura donde se busca darle la forma ideal a la pieza de vidrio cuando esté todavía puede fluir fácilmente gracias a la alta temperatura la cual es sometido. El reto de la tecnología del formado del vidrio ha sido el de diseñar procesos que capitalicen las propiedades del vidrio minimizando los efectos adversos.

2.2 HISTORIA DEL USO Y FABRICACION DE VIDRIO.

El vidrio fue utilizado como joyería en Egipto alrededor del año 1500 A.C., porque poseía colores parecidos a los de las gemas. Estos colores eran proporcionados por la adición de metales de transición en la composición del vidrio. Algunas composiciones de los primeros tipos de vidrio, descritos en tabletas de arcilla de hace 3000 años encontradas en la región de lo que fue Asiria, eran relativamente altas en el contenido de álcalis u otras especies, las cuales reducían el punto de fusión, pero a su vez, reducían la resistencia a la corrosión de los vidrios.

Con la invención de la caña de soplar o tubo de vidrio soplado, alrededor del año 250 A.C., se tuvieron que modificar las composiciones de vidrio para darle una mayor formabilidad, generalmente con sílice. La sílice reduce la viscosidad del vidrio, lo cual facilita la operación de soplado.

Se tienen referencias históricas que los primeros recipientes fabricados de vidrio hicieron su aparición por el año 79 de nuestra era. Tales recipientes fueron sólo utilizados por las personas más ricas, por lo difícil que resultaba fabricarlos.

Posteriores refinamientos en la técnica del soplado de vidrio dieron lugar a la aparición del vidrio coloreado, el cual fue utilizado en ventanas de iglesia por el año 591. La calidad óptica y acabado de superficie de estos primeros vidrios era pobre, pero mejoró para el año de 1100 a tal grado que permitió la fabricación de espejos.

Después de la Edad Media y el inicio de los experimentos científicos en Europa, el vidrio fue utilizado para la fabricación de dispositivos científicos, como el termómetro, microscopios y telescopios. La evolución de la ciencia de vidrio anterior a 1900 se considera fundamental en la tecnología de composición, fusión, y formado de este material [1].

2.3 VIDRIO.

2.3.1 Definición.

La Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM) define al vidrio de la siguiente manera:

“El vidrio es un producto inorgánico de fusión el cual se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizar. Es típicamente duro y frágil, y presenta fractura concordial. Puede ser incoloro o coloreado, y transparente u opaco por la presencia de un material cristalino amorfo disuelto” [2].

También se puede definir al vidrio como un sólido amorfo hecho mediante la fusión de sílice (SiO_2) con un óxido básico [3]. Sus propiedades características son transparencia, dureza y rigidez a temperaturas ordinarias, su capacidad de poder ser trabajado plásticamente a elevadas temperaturas, y su resistencia a la acción de

agentes atmosféricos y a la mayoría de los productos químicos con excepción del ácido hidrofúorhídrico.

2.3.2 Estructura del vidrio.

La estructura de los vidrios inorgánicos se basa en el óxido de silicio, SiO_2 (arena). Por ejemplo el cuarzo cristalino de forma tetragonal es la unidad estructural básica con un átomo de silicio rodeado por cuatro átomos de oxígeno, como se muestra en la figura 2.1.

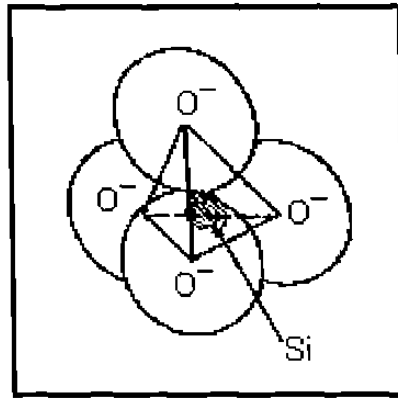


Fig 2.1 Representación esquemática de la estructura del cuarzo cristalino.

Los cuatro átomos grandes de oxígeno, muy cerca uno del otro, retienen al pequeño átomo de silicio. La razón de un átomo de silicio por cuatro de oxígeno (número de coordinación) satisface las cargas eléctricas de estos elementos con cada átomo de oxígeno enlazado a dos átomos de silicio. Esto provee el enlace necesario para una estructura masiva. Este es un sólido tetraedral, con un número de estas combinaciones tetraedrales, y con todos los átomos de oxígeno enlazados para formar una estructura fuerte. Esta estructura repetitiva es cristalina.

Cuando el cuarzo se somete a temperaturas muy altas hasta llegar a ser un líquido muy viscoso, muchos enlaces de oxígeno se rompen. Al enfriarlo hasta su temperatura de transición vítrea (T_g), figura 2.2, la viscosidad ha evitado que los

átomos lleguen a las posiciones que se requieren para formar un cristal. La red resultante, con un arreglo al azar de formas tetraédricas con cuatro, cinco, siete, e incluso ocho lados además de la normal de seis, es cuarzo fundido. Los ángulos de unión están distorsionados, incluso aquellos con los seis lados son desproporcionados debido a que los vecinos están desordenados. Además los vacíos en la estructura son de diferentes formas y tamaños. Por lo que se tiene una red en la que no existen dos segmentos idénticos [2].

La adición de componentes permite formar un vidrio a una temperatura mucho menor. Al agregar un óxido alcalino, muchos de los enlaces de los átomos de oxígeno se rompen, debido a que hay un exceso de oxígeno del álcali. Los átomos de sodio no entran a la red sino que se sitúan al rededor de ésta en las vacancias dando neutralidad eléctrica a los enlaces de oxígeno rotos. La red se debilita y se funde a una temperatura menor; los iones del álcali se mueven fácilmente bajo fuerzas eléctrica o de solución. Por lo que además de disminuir la temperatura a la que forma el vidrio también modifican la red.

Además, al agregar cal, se rompen más enlaces de oxígeno, formando un vidrio complejo de iones de sodio, iones de calcio, e iones de silicio no soluble en agua. Los óxidos bivalentes de calcio o de magnesio, por sí mismos son relativamente insolubles y transfieren esta característica al vidrio. Por lo que estos óxidos son llamados estabilizadores de vidrio.

Los enlaces químicos en el vidrio son tanto iónicos como covalentes, siendo los predominantes estos últimos. En ambos tipos de enlace, los electrones están unidos de tal manera que producen materiales duros, fuertes y de relativo alto punto de fusión.

El vidrio a altas temperaturas presenta una relación directa entre el flujo y el esfuerzo aplicado, por lo que es un fluido. En la que la pendiente de esta relación da la resistencia al flujo, es decir, la viscosidad.

Debido a que la estructura de el liquido ha sido “congelada” en un sólido elástico, el vidrio a temperatura ambiente (25 °C) ha sido conocido como liquido superenfriado. Este punto de vista es erróneo porque el vidrio sólido con propiedades elásticas muestra una diferencia notable en ciertas propiedades con respecto al vidrio líquido, como por ejemplo, existe un cambio abrupto en el coeficiente de expansión térmica ($\alpha V/dT$). Lo cual es indicativo de una diferencia en la relación de energía [4].

Debido a que los componentes del vidrio no necesitan cumplir con relaciones estequiométricas exactas, es de esperarse que los vidrios puedan variar ampliamente en composición. De hecho, más de la mitad de los elementos de la tabla periódica se utilizan en la fabricación de vidrio.

2.3.3 Propiedades físicas del vidrio .

En esta sección se enfocará en las propiedades físicas del vidrio de sosa-cal.

Densidad. Las botellas y ventanas de vidrio ordinario (sosa-cal) tienen una densidad de aproximada de 2.5 gr/cm^3 un poco menos que la del aluminio.

Dureza. El vidrio a veces raya el acero normal, y a veces es al contrario. Pruebas de indentación muestran que el vidrio es generalmente mas suave que el cuarzo, y más duro que las familias de piedra caliza.

Resistencia a carga mecánica. El vidrio solo falla en tensión. Bajo compresión se han registrado cargas máximas de 1200 MPa pero tales pruebas de compresión

resultan en tensión localizada. La fractura por corte se interpreta como falla por tensión.

Elasticidad. El vidrio es un material elástico real, mostrando una relación lineal entre esfuerzo y deformación hasta el punto de falla. El modulo de elasticidad en tensión para los vidrios de sosa-cal es de aproximadamente 70 MPa.

Calor específico. El calor específico de los vidrios a temperatura ambiente es de 0.20 cal/gr °C. Esto es más alto que los metales comunes y menor que los plásticos comunes.

Conductividad Térmica. El vidrio es un pobre conductor de calor a temperatura ambiente. El valor oscila entre 0.002 y 0.003 cal/cm³ °C seg.

Propiedades Opticas. Las propiedades ópticas del vidrio son únicas. El vidrio es ópticamente isotrópico. Algo de luz es reflejada en su superficie, otra es absorbida, transmitida, o difusa dependiendo del color del vidrio y el uso de partículas difusoras.

Resistividad Volumétrica. La resistividad volumétrica de los vidrios de sosa-cal es de aproximadamente de 10^{15} ohm cm a temperatura ambiente.

Durabilidad química. Se evalúa en términos de cambios en la superficie después de someterlo a factores ambientales o ataque de sustancias químicas. El vidrio de sosa-cal es resistente a productos de ácidos débiles, excepto al ácido hidrofúorhídrico.

Expansión Térmica. Esta propiedad depende del rango de temperatura. Comúnmente los valores de expansión térmica se basan en el rango de 0 a 300 °C. Las botellas de vidrio de sosa-cal pueden tener una expansión térmica de 89×10^{-7} 1/°C.

Viscosidad. Es una propiedad relacionada al flujo líquido, importante en la fusión, formado y procesamiento. El proceso de formado de vidrio generalmente comienza con vidrios que tienen viscosidades de entre 100 y 1000 Pa-seg. En los vidrios de sosa-cal, esto ocurre típicamente entre 1000 y 1200 °C. Para ilustrar esto, en la figura 2.3 se muestra la grafica de viscosidad contra temperatura de algunos tipos de vidrio.

2.3.4 Tipos de Vidrio.

Existen un gran numero de diferentes familias de vidrio, algunas de las cuales tienen cientos de variaciones en composición. Se estima que existen más de 50,000 fórmulas de vidrio. Los vidrios de sosa y cal son los más antiguos, de menor costo, los más fáciles de trabajar, y los más ampliamente usados. Se componen de sílice, oxido de sodio (sosa), y oxido de calcio (cal). Estos vidrios tienen poca resistencia a la corrosión y son útiles a temperaturas tan altas como 460 °C para el vidrio templado y 250 °C para el vidrio recocido. La expansión térmica es alta y la resistencia al choque térmico es baja comparada con otros vidrios. Este vidrio se utiliza para la fabricación de ventanas, botellas, y vasos de uso ordinario.

Como el objetivo de este trabajo de investigación sólo comprende el vidrio de sosa y cal sólo se mencionaran algunas de las familias de tipos vidrio, en la tabla 2.1, sin entrar en detalles [3].

2.4 PROCESAMIENTO DE VIDRIO.

Existen muchos procesos para la fabricación y formado de vidrio, de hecho para cada tipo de vidrio se cuenta con un proceso diferente. Esta sección se concentrará en el proceso para la fabricación de vidrio de sosa-cal, ya que es el tipo de vidrio que nos interesa estudiar. Esta sección está dividida en tres partes: materias primas, fusión, y formado.

Tabla 2.1 Esquema de algunos tipos de vidrio.

Familia de vidrio	Tipos de vidrio
Sosa-Cal	Vidrio para botellas, vidrio decolorado, vidrio corona, vidrio duro, vidrio bohemio
Vidrio de Plomo	Decorado
Vidrio Borosilicato	Pyrex, Kimax, Kovar
Aluminosilicato	Uso Industrial
Vicor	Vidrio para Filtro
Vidrio de Fosfato	Flourex
Sodio-Aluminosilicato	Recipiente para uso Industrial.
Vidrio Industrial	Vidrio de Hojuela, Carboglas 1600, Filmglass, Vidrio en Polva, Cer-Vit, Esferas de vidrio
Vidrio de sílice fundida	Vidrio Pedernal, Lustraglas, Thermopane, Vidrio Fluorescente, Kromex

2.4.1 Materias primas.

El vidrio manufacturado se puede clasificar en cuatro grandes categorías: vidrio plano, contenedores, fibra de vidrio, y vidrio especial. Las dos primeras categorías utilizan vidrio de sosa-cal, y constituyen los productos de mayor volumen en producción y ventas. La fibra de vidrio a menudo se basa en vidrio de borosilicatos. En cuanto a los vidrios especiales, a veces, utilizan materiales comunes a otros vidrios aunque cada producto tiene una composición especial.

La arena de sílice es el componente principal utilizado en vidrios comerciales. La sílice (SiO_2), es uno de los minerales naturales más abundantes, y se presenta en diferentes formas. La forma más importante para la industria del vidrio es el cuarzo.

La piedra caliza se presenta como un producto de alto contenido de calcio (CaCO_3) o bien, dolomítico [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. Tecnológicamente, las piedras calizas dolomíticas contienen menos de 46% de MgCO_3 ; aquellos que contienen 46% MgCO_3 y 54% de CaCO_3 se les denomina de dolomita. La mayoría de la industria del vidrio utiliza estos materiales en su forma carbonatada, aunque aún existe algún uso limitado de sus óxidos como por ejemplo la cal.

El feldespato es una de las fuentes principales de alumina. La alumina utilizada en el vidrio reduce el coeficiente de expansión, incrementa la resistencia tensil, y hace al vidrio más resistente a la abrasión, a los efectos atmosféricos, y al ataque de ácidos. El contenido de alumina para vidrio para recipientes varía de 1 a 3%.

La ceniza de soda o carbonato sódico (Na_2CO_3), es el tercer mayor constituyente de los vidrios de soda-cal y es la fuente principal de Na_2O en cualquier vidrio que contiene soda. Actúa como un agente fundente, reduciendo la temperatura requerida para fundir la sílice.

El término "terrón de sal" (salt cake) se refiere generalmente a una impureza del anhidro de sulfato de sodio (Na_2SO_4). En la industria del vidrio, el terrón de sal se utiliza para referirse a ambas formas de pureza e impureza. Este material es acelerador de la fusión. Bajo las condiciones apropiadas de oxidación-reducción, el sulfato de sodio y la ceniza de soda forman un eutéctico, el cual funde a una temperatura más baja que cualquiera de estos materiales en forma individual y forma un líquido fluido que ataca y disuelve los granos de sílice.

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es a veces utilizado como un sustituto del "terrón de sal". Reacciona con la ceniza de soda para formar Na_2SO_4 y CaCO_3 , desempeñando la misma función que el terrón de sal. Reduce el uso de la piedra caliza como fuente de CaO .

El nitrato de sodio es un agente oxidante. Su función primordial en el vidrio es la de estabilizar y mantener el color.

La pedacería de vidrio o "cullet" es otro componente para la fabricación de productos de vidrio. Este material se obtiene del reciclado de productos de vidrio.

Además de los materiales anteriormente mencionados existen otros que se utilizan en la industria del vidrio, para agregarle otras propiedades al vidrio, pero de menor uso. Como aceleradores de fusión se utilizan sulfatos, litina, y fluorita (CaF_2). Los agentes de acabado se utilizan para minimizar burbujas y ampollas en el vidrio. Estos agentes incluyen sulfatos, arsénico, antimonio, fosfatos, fluoruros y cloruros. Los colorantes y decolorantes incluyen selenio, óxido de cobalto, óxidos de hierro o sales, bióxido de manganeso, compuestos de tierras raras, níquel, cobre, cadmio y compuestos de cromo.

2.4.2 Fusión del vidrio.

El proceso de fusión convierte las materias primas granulares o en forma de polvo, en un líquido homogéneo, y listo para el formado. Los requerimientos del producto de cada aplicación determinan la calidad de las materias primas, el tipo de fundente, y sus condiciones de operación.

La fusión del vidrio tiene tres etapas principales:

- La fusión de las materias primas granuladas y de los fragmentos de vidrio, es decir, la conversión de estos materiales en un líquido esencialmente libre de inclusiones cristalinas no disueltas.
- La remoción de burbujas remanentes después de la fusión.
- Homogeneización, la eliminación de las variaciones tanto térmicas como químicas en el vidrio fundido.

En un proceso de fusión continuo, estos tres pasos toman lugar simultáneamente al tiempo que el material se mueve a través del horno. Un paso final, el acondicionamiento, es necesario para obtener una temperatura uniforme más baja para el formado del producto.

La fusión de la materia prima comienza cuando este material frío alcanza una temperatura a la cual las reacciones son rápidas. Debido a que la pila de materia prima es un pobre conductor térmico, la transferencia de calor limita la rapidez de fusión.

La eliminación de las fases cristalinas, ocurre en cuatro pasos que se superponen en términos de tiempo y temperatura:

- Secando y deshidratando las materias primas granuladas.
- Fundiendo las sales y otros ingredientes de bajo punto de fusión (fundentes).
- Descomponiendo algunos de los fundentes, produciendo gases
- Disolviendo la arena sílice y otros materiales refractarios en los agentes fundentes fundidos.

Las burbujas en la materia prima fundida se generan por las reacciones de descomposición durante la fusión y por la reacción del material fundido con los refractarios y metales usados como contenedores y electrodos. Las burbujas se remueven en tres pasos:

- Los gases producidos por reacciones químicas en el material fundido agrandan las burbujas existentes.
- Las burbujas agrandadas alcanzan la superficie y se rompen.
- Las burbujas que no alcanzan la superficie se disuelven durante el enfriamiento.

Las variaciones en composición, llamadas nudos, resultan en defectos permanentes en el producto. Las variaciones en temperatura en el material fundido dan lugar a pérdidas en el formado. La difusión reduce ambos tipos de variaciones. La difusión térmica en la mayoría de los materiales fundidos es rápida, así la homogeneización térmica depende primordialmente en evitar el enfriamiento

excesivo o calentamiento cerca a un punto al cual el material fundido es enviado al formado. En contraste, la difusión de masa es muy lento en silicatos fundidos debido a su alta viscosidad y fuerte enlace a nivel atómico. Por lo tanto, la eliminación de nudos es más difícil.

Los nudos resultan de:

- La segregación durante la fusión de la materia prima.
- La volatilización desde la superficie del material fundido.
- La reacción del material fundido con los refractarios.

2.4.2.1 Procesos adversos .

Estos procesos crean defectos en el vidrio e incrementan el costo de fusión del vidrio. Los más importantes son:

- Corrosión del refractario. Produce piedras y nudos en el producto; limita la temperatura y por lo tanto la rapidez de fusión de el horno; obliga al remplazo periódico del refractario del horno, una operación costosa que produce el paro del horno por varias semanas o mas lo cual requiere una gran inversión de capital. La rapidez de corrosión típicamente se duplica cada 50 o 100 °C.
- Electrodo de corrosión. Contamina el vidrio con productos de corrosión. Estos electrodos están hechos generalmente de metal, grafito y un oxido semiconductor de estaño.
- Reaparición de burbujas. Se refiere a la nucleación y crecimiento de burbujas en un material fundido previamente libre de burbujas. Las burbujas nuclean en partículas de refractario y metal disueltas a través de las paredes del horno.
- Devitrificación. Es la nucleación y crecimiento de cristales en el vidrio fundido al enfriarse. Esta es una fuente importante de piedras y nudos.

2.4.2.2 Hornos para fundir vidrio .

El movimiento del vidrio a través del horno puede ser periódico o continuo. Los hornos tipo crisol y de depósito diario son llenados con una cantidad fija de material. La temperatura es entonces variada para fundir, afinar, homogeneizar, y enfriar el material fundido. Los hornos continuos son llenados constantemente para mantener un nivel fijo de fusión debido a que el vidrio es sustraído continuamente para el formado. La temperatura en cada punto permanece constante, al fluir el material desde la región de llenado de materia prima a través del horno hasta el área de descarga.

El material fundido puede ser contenido en un crisol a prueba de fugas calentado externamente o en un recipiente de bloques de refractario calentados internamente. Los hornos tipo crisol usan crisoles de refractario de una sola pieza o de metal, que son operados periódicamente. Los hornos de tanque son ensamblados con ladrillos o bloques. El material fundido no gotea a través de las uniones de los bloques debido a la baja temperatura mantenida en la superficie exterior del horno.

Los hornos para vidrio se calientan mediante el uso de combustibles y/o por el calentamiento eléctrico, directo o indirecto. Existen hornos de combustión reforzados eléctricamente y hornos totalmente eléctricos.

Los hornos tanque son hornos de reverbero en los cuales las flamas calientan desde arriba un baño poco profundo de vidrio fundido. El gas natural es el combustible preferido. Se utiliza fuel oil cuando el gas no es disponible.

El calor se transfiere por radiación directa de la flama e indirectamente por reflexión y re-radiación de la superestructura de refractario caliente. La rapidez de transferencia de calor y la eficiencia de energía del horno se incrementan al

incrementarse la temperatura. En la figura 2.4 se muestra un esquema de este tipo de horno:

Los hornos eléctricos son calentados haciendo pasar corriente alterna a través de la materia prima entre los electrodos inmersos en el baño de vidrio.

2.4.3 Formado.

Esta sección se enfoca en las operaciones más comunes de formado de vidrio:

- Formado Manual.
- Suministro automático de vidrio caliente.
- Manufactura automática de recipientes.

2.4.3.1 Formado Manual .

Los elementos básicos del formado del vidrio fueron desarrollados hace aproximadamente 2000 años, en donde los artesanos soplaban, prensaban, daban forma y decoraban los artículos de vidrio en forma manual. Muchos procesos actuales son adaptaciones mecánicas de estas operaciones manuales.

La herramienta básica para la fabricación manual de contenedores de vidrio es la caña de soplar o tubo de vidrio soplado. La caña que consiste generalmente una barra hueca de acero resistente a la alta temperatura ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) de aproximadamente 1.5 metros de longitud. Es delgada en el extremo de soplado y se agranda a una forma cónica en el extremo del contacto con el vidrio. El soplador de vidrio coloca el tubo sobre el vidrio fundido en el horno. Cuando el tubo se calienta, se introduce en el vidrio fundido y se gira sobre su propio eje hasta que una cantidad suficiente de vidrio se aglutina en el extremo. Mientras que la rotación continua, el tubo es retirado y se deja enfriar la superficie del vidrio, por lo tanto se forma una película de vidrio de mas alta densidad.

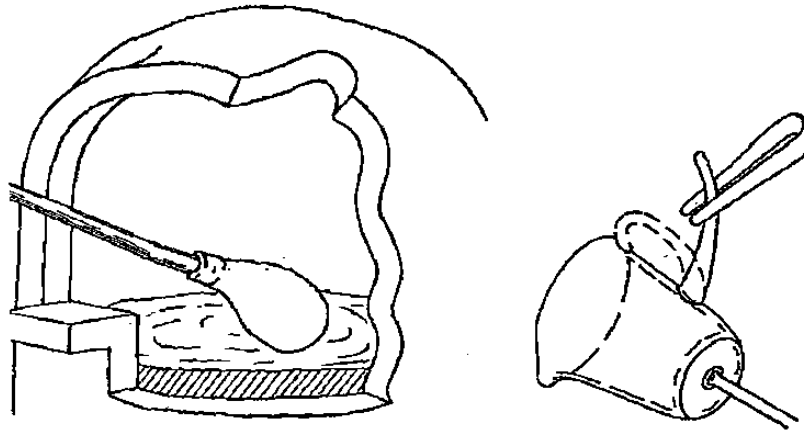


Fig. 2.5 Esquema de la fabricación de vidrio soplado

Con base a su experiencia, el trabajador aprende cuando soplar una pequeña cantidad de aire en el tubo y simplemente desliza su dedo sobre el orificio del extremo de soplado, lo cual permite que el aire introducido se caliente y se expanda, con esto se crea una burbuja dentro del vidrio. Durante la mayoría de los procesos de formado en vidrio se rota para mantener su simetría. Frecuentemente, el vidrio es recalentado para permitir su soplado posterior, trozos de vidrio adicional son agregados para manivelas o bases, y se le da el acabado a la pieza con varias herramientas.

INSERTAR FIGURA 2.4. FIG 4 Y 5 PAG 390

CERAMICS AND GLASSES.

FIG 2.7 INSERTAR FIG 4. PAG. 397

CERAMICS AND GLASSES

2.4.3.2 Suministro automático de vidrio caliente .

Los alimentadores de “velas” son dispositivos que suministran trozos de vidrio preformados de un peso específico en moldes para las operaciones de prensado o soplado. Se les denomina “velas” porque tienen forma cilíndrica y el tamaño aproximado de una vela.

El alimentador, el cual está colocado al final de las canaletas del horno, tradicionalmente consiste de cuatro componentes: pistón, cilindro móvil, chorreador, y cuchillas. En la figura 2.6 se muestra el proceso de suministro de “velas”.

El chorreador limita el flujo de vidrio en virtud del diámetro de su orificio. Un control adicional de flujo del vidrio se logra ajustando el mecanismo que controla la altura del cilindro móvil. Algunos alimentadores rotan el cilindro para incrementar la homogeneidad térmica y física del vidrio. Otras formas de modificar el tamaño de la vela son: variando la rapidez de corte de las cuchillas y/o cambiando la carrera del pistón.

2.4.3.3 Manufactura automática de envases.

Los envases de vidrio de boca angosta (botellas) están generalmente hechos en una máquina de sección individual (IS), esto es, cada botella es completamente manufacturada en una locación, o sección, de la máquina.

La vela se coloca en el primer molde de soplado, y se forma, en posición inversa, en una forma inicial llamada preforma. La operación de formado realmente se inicia con el acabado y cortado de las velas como se describió en el punto anterior. La vela es entonces arrojada al molde de preforma por medio de una canaleta. Una cabeza de soplado sella la parte superior del molde y provee un

soplado de asentamiento, con esto, la vela baja al fondo del molde, donde es invertida de posición, la parte superior de la botella ha sido formada.

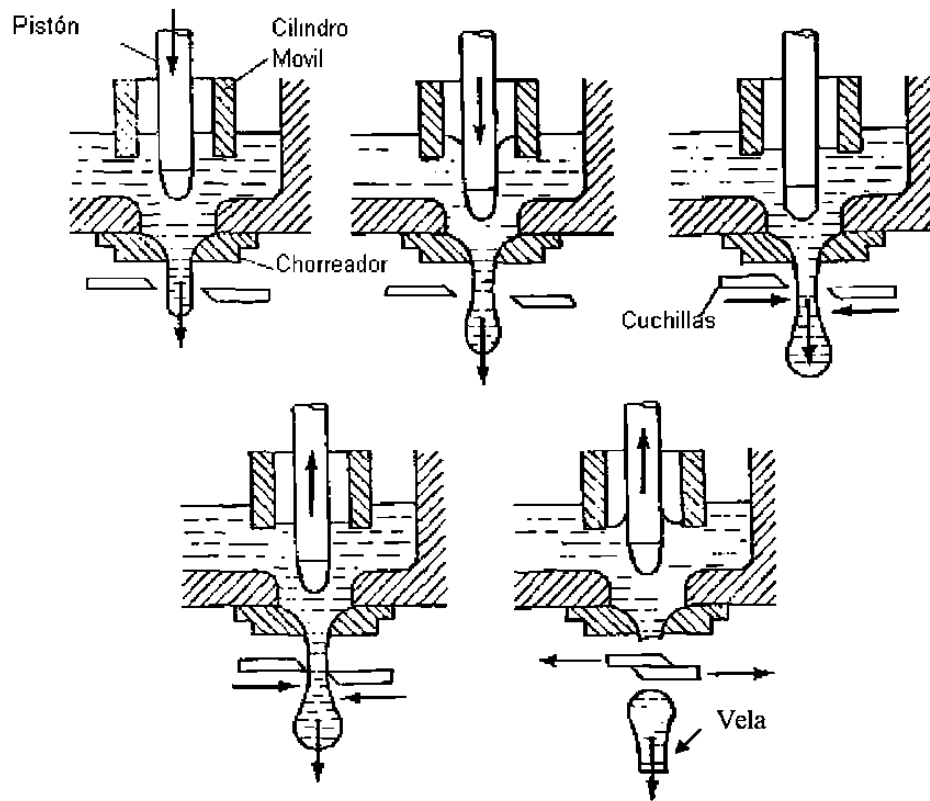


Fig. 2.6 Esquema de la descarga de vidrio

Entonces, del fondo, un soplo en sentido inverso es introducido en el centro de la vela, lo cual crea la parte interior de la botella.

El molde de la preforma entonces se abre y un brazo mueve la preforma 180 ° y lo coloca en un segundo molde de soplado para completar la botella. Debido a que el exterior de la vela fue enfriado durante su contacto con el primer molde, se hace una pequeña pausa en el proceso de formado que permite a la superficie del vidrio recalentarse. Después del recalentamiento, una segunda cantidad de aire se introduce para dar a la botella su forma final. Finalmente, un mecanismo levanta el

contenedor fuera del molde y lo coloca en un transportador. En la figura 2.7 se muestra un esquema de la manufactura de contenedores.

2.5 TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURO DE LA INDUSTRIA DEL VIDRIO.

En los últimos años se ha estado pronosticado un pronunciado descenso en la producción de envases de vidrio a pesar de ser ese el método más usado en la industria de bebidas. Sin embargo, un estudio del Instituto de Envases de Vidrio de los Estados Unidos en 1993, reveló que las ventas de envases de vidrio en este país aumentaron un 4% con respecto al año anterior. Además la industria cervecera embotelladora de Estados Unidos le ha ganado un 1% al volumen de ventas de las latas metálicas, a medida que se acentuó la preferencia de los consumidores por el vidrio.

En contraparte las industrias de bebidas carbonatadas se están apartando rápidamente del vidrio, en favor de envases desechables pequeños hechos de polietileno.

En México se proyecta que el consumo de envases de vidrio retornable bajará en los próximos años de un 76 a un 49% del mercado; y el de envases desechables de vidrio aumentará hasta abarcar 8% comparado con el 2% actual [5]

En la siguiente Tabla se muestra la participación actual y futura del mercado mexicano de bebidas carbonatadas.

Tabla 2.2 Proyección de las ventas de envases.

PARTICIPACION (%) EN EL MERCADO MEXICANO DE ENVASES DE BEBIDAS CARBONATADAS						
	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Retornables de vidrio	76.0	65.0	60.0	55.0	52.0	49.0
Retornables de polietileno	20.0	25.0	26.0	23.0	18.0	15.0
Desechables de vidrio	1.5	3.0	4.0	5.5	7.0	8.0
Desechables de polietileno	1.0	4.0	6.0	10.0	15.0	18.0
Latas	2.5	3.0	4.0	6.5	8.0	10.0

CAPITULO 3

MATERIALES CERAMICOS

3.1 INTRODUCCION

Cerámica es un término que alguna vez sólo se utilizó para referirse al arte de alfarería y a artículos producidos con esta técnica. Actualmente este término es mucho más amplio e incluye tanto a los cerámicos tradicionales (barro, arcillas, ladrillos, cementos, etc.) como a los cerámicos avanzados o de alta tecnología. La etimología del término cerámica se deriva del griego *keramos*, que significa alfarero o alfarería. Sin embargo existe evidencia que este término se deriva del sánscrito que significa "quemar". Así pues, el concepto fundamental contenido en este término es el de un producto obtenido por la acción de "quemar" materiales terrosos.

En nuestros días el uso de materiales cerámicos es muy extenso y se emplea en la mayoría de las industrias actuales, debido principalmente a su capacidad de soportar altas temperaturas, su resistencia al medio ambiente y a agentes corrosivos entre otras características que se tratarán más adelante.

En este capítulo se explicará la definición de cerámica, sus procesos actuales de su formado, su uso como refractario y se dará un especial enfoque a su uso en la industria del vidrio.

3.2 PROPIEDADES Y CLASIFICACION DE MATERIALES CERAMICOS.

3.2.1 Definición.

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante uniones iónicas y/o covalentes. Las composiciones químicas de los materiales cerámicos

varían considerablemente, desde compuestos sencillos hasta mezclas de muchas fases complejas [6].

3.2.2 Clasificación de Cerámicos.

Los cerámicos, una de las tres familias más grandes de materiales, son compuestos cristalinos de elementos metálicos y no metálicos. Estos pueden clasificarse por su aplicación o uso, por su número de fases presentes, por su macroestructura y, por último, como tradicionales o avanzados.

Los cerámicos se pueden dividir por su uso en: refractarios, vidrio, ladrillo, cemento y yeso, abrasivos, porcelanas, ferroeléctricos, ferritas, y aislantes dieléctricos. Hay otros materiales como el carbón y grafito, mica, y asbestos que, estrictamente hablando, no son cerámicos, no obstante son a menudo incluidos en esta familia. También, con frecuencia se incluyen en esta familia a los compuestos intermetálicos, como los aluminuros y beriluros, los cuales están clasificados como metales, y los cermentos, los cuales son mezclas de metales y cerámicos.

Una amplia variedad de elementos metálicos y no metálicos son los ingredientes principales en los materiales cerámicos. Algunos de los metales más comunes son aluminio, silicio, magnesio, berilio, titanio, y boro. Mientras que los elementos no metálicos con los cuales están comúnmente combinados son oxígeno, carbono, o nitrógeno. Los cerámicos pueden ser simples, materiales de una sola fase formados por un solo compuesto, como la Al_2O_3 y MgO , o multifase, consistiendo de la combinación de dos o más compuestos, como la cordierita (alúmina-óxido de magnesio-sílice) y forsterita (óxido de magnesio-sílice).

Macroestructuralmente existen esencialmente tres tipos de cerámicos: cuerpos cristalinos con una matriz vítrea; cuerpos cristalinos, algunas veces referidos como holocristalinos; y vidrios.

Por último, se pueden dividir los cerámicos en dos categorías; en cerámicos tradicionales y cerámicos avanzados. Entre los tradicionales se pueden ubicar los productos de arcilla, la porcelana, los cementos e incluso la alúmina, así como lo que se conoce como vidrio normal para ventanas (vidrio de sosa-cal). Como cerámicos avanzados se consideran los carburos y nitruros de silicio, nitruros de boro, óxidos complejos como el titanato zirconato de plomo y el niobato de plomo magnesio y por último los cerámicos superconductores.

3.2.3 Propiedades físicas de los cerámicos.

Propiedades Mecánicas. Los cerámicos son relativamente frágiles. La resistencia a la tensión observada en materiales cerámicos varía enormemente con rangos que van desde valores muy bajos, menores de 0.7 MPa hasta 7×10^3 MPa para fibras de alúmina (Al_2O_3) preparadas bajo condiciones cuidadosamente controladas. Sin embargo, pocos cerámicos tienen resistencias a la tensión por encima de 170 MPa. Los materiales cerámicos también exhiben grandes diferencias entre la resistencia a la tensión y a la compresión, siendo la resistencia a la compresión normalmente alrededor de 5 a 10 veces más altas que la tensión.

La mayoría de los materiales cerámicos son duros y tienen baja resistencia al impacto debido a sus uniones iónico-covalentes. En los cerámicos con enlaces covalentes, los enlaces entre átomos son específicos y direccionales, haciendo intervenir el intercambio de carga electrónica entre pares de electrones. Así, cuando los cerámicos son tensionados en considerable amplitud muestran una fractura quebradiza debida a la separación de las uniones de pares de electrones, sin que éstas se vuelvan a formar.

La deformación de los cerámicos con enlace predominantemente iónico, como el óxido de magnesio y el cloruro de sodio, es diferente; muestran una

deformación plástica considerable bajo fuerzas compresoras a temperatura ambiente. Sin embargo los cerámicos iónicos policristalinos son frágiles, formándose las grietas en las fronteras de grano.

El fallo mecánico de los materiales cerámicos se da principalmente por defectos estructurales. Las causas principales de la fractura en cerámicos policristalinos son las grietas superficiales producidas durante los procesos de acabado superficial, poros, inclusiones y granos grandes producidos durante el procesamiento [7].

Los poros de los materiales cerámicos frágiles son regiones donde se concentran los esfuerzos, y cuando la tensión en un poro alcanza un valor crítico se forma una grieta y se propaga al no haber en estos materiales procesos que absorban mucha energía como los que se dan en los metales dúctiles durante la deformación. Así una vez que las grietas empiezan a propagarse, continúan creciendo hasta que ocurre la fractura. Los poros también actúan en detrimento de la resistencia de los materiales cerámicos porque disminuyen el área de la sección transversal sobre la que se aplica la carga y por tanto reducen la tensión que un material puede soportar.

En los materiales cerámicos totalmente densos, en los que no hay poros grandes, el tamaño de las grietas está normalmente relacionado con el tamaño del grano. Mayor tamaño de grano implica poca resistencia mecánica, por el contrario, menor tamaño de grano resulta en mayor resistencia mecánica por parte del cerámico.

Propiedades Eléctricas. Los materiales cerámicos se utilizan en gran variedad de aplicaciones eléctricas y electrónicas. Muchos tipos de materiales cerámicos son utilizados como aislantes eléctricos para corrientes eléctricas de alto o bajo voltaje. También encuentran su aplicación en varios capacitores, especialmente cuando se

requiere la miniaturización. Otros tipos de materiales cerámicos son piezoeléctricos, es decir, pueden convertir débiles señales de presión en señales eléctricas y viceversa. Como ejemplos de materiales piezoeléctricos se pueden mencionar al titanato de bario (BaTiO_3), circonato de plomo (PbZrO_3) y el titanato de plomo (PbTiO_3).

Algunos compuestos cerámicos tienen propiedades semiconductoras que son importantes para algunos aparatos eléctricos. Uno de estos dispositivos es el termistor, o resistencia senso-térmica, en la cual la resistencia eléctrica disminuye con el aumento de la temperatura. Los materiales utilizados para esto son los óxidos sinterizados de manganeso, níquel, hierro, cobalto y cobre.

Materiales cerámicos abrasivos. La gran dureza de algunos materiales cerámicos les hace susceptibles de ser usados como abrasivos para cortar, afilar y pulir otros materiales de menor dureza. La alúmina electrofundida y el carburo de silicio son dos de los abrasivos cerámicos más ampliamente usados en la industria.

Combinando zirconia con alúmina, se han obtenido mejores abrasivos, los cuales tienen mayor resistencia, dureza y calidad de corte que los óxidos de aluminio solos. Una de estas mezclas cerámicas contiene 25% de ZrO_2 y 75% de Al_2O_3 y otra, 40% de ZrO_2 y 60% de Al_2O_3 . Como se verá más adelante, estas combinaciones de zirconia con alúmina son utilizadas en la industria del vidrio ya que soportan aceptablemente el contacto con vidrio fundido a temperaturas que oscilan de entre 1100 y 1400 °C.

Propiedades térmicas. En general, la mayoría de los materiales cerámicos tienen bajas conductividades térmicas debido a sus fuertes enlaces iónico covalentes. Debido a su alta resistencia al calor, son utilizados como refractarios, es decir, materiales que resisten altas temperaturas ya sea en contacto con líquidos, gases o sólidos. Los materiales refractarios se utilizan principalmente en las industrias metalúrgica, química, cerámica y del vidrio.

Muchos compuestos cerámicos con altos puntos de fusión como la alúmina y el óxido de magnesio podrían tener aplicación como refractarios industriales, pero son caros y es difícil darles forma. Por lo tanto, la mayoría de los refractarios industriales se hacen de mezclas de compuestos cerámicos. Algunas propiedades importantes de los refractarios cerámicos son su resistencia a bajas y altas temperaturas, al choque térmico, su densidad volúmica, y su porosidad. Muchos cerámicos refractarios tienen densidades en el rango de 2.1 a 3.3 g/cm³. Los refractarios densos con baja porosidad tienen una mayor resistencia a la corrosión y erosión y a la penetración por líquidos y gases. Sin embargo, para refractarios aislantes es deseable una alta porosidad.

Los refractarios industriales se dividen comúnmente en dos tipos ácidos o básicos. Los refractarios ácidos se basan principalmente en SiO₂ y Al₂O₃ y los básicos en MgO, CaO y Cr₂O₃.

3.3 PROCESAMIENTO DE MATERIALES CERÁMICOS.

Existe un gran número de procesos diferentes para el procesamiento y formado de los materiales cerámicos. Pero en general, se siguen tres etapas básicas:

- Procesado de Polvos.
- Procesos de formado (consolidación).
- Procesos de densificación (sinterizado).

3.3.1 Procesado de Polvos.

En el procesado de polvos se deben de considerar los criterios para la selección de polvos, las técnicas para la obtención de los tamaños de los polvos, y la preconsolidación:

Selección de polvos. Se pueden considerar tres factores fundamentales para la selección de polvos: *la pureza*, que influye sobre las propiedades de los materiales cerámicos a altas temperaturas ya que pueden provocar concentración de esfuerzos [8]; *el tamaño de las partículas y reactividad*, normalmente se desea que las partículas produzcan un empaquetamiento cerrado y uniforme, así mismo, si se desean productos altamente resistentes, las partículas deben ser lo más pequeñas posibles (las partículas pequeñas tienen mayor reactividad, pues la energía libre superficial total por unidad de masa es mayor); y por último las *formas polimórficas*, donde usualmente se desea un sólo polimorfo, pues las respuestas de los polimorfos a los diferentes procesos de sinterización son distintas [9].

Tamaños de polvos. Para esto existen un gran número de técnicas entre las cuales se pueden mencionar: las *cribas*, que consisten en superficies que contienen orificios por los cuales se hacen pasar los polvos cerámicos, los orificios pueden ser de diferentes tamaños indicados por el número de malla; *elutriación*, es una técnica basada en la razón de asentamiento de las partículas suspendidas en un medio líquido, en donde las grandes se asientan primero y las pequeñas permanecen suspendidas durante un tiempo mayor; *molino de energía de fluido*, en donde las partículas se impactan unas con otras mientras son transportadas por chorros gaseosos. Otras técnicas que se pueden mencionar son: clasificación por aire, molino de bolas, molino de atrición, molino vibratorio, molino de martillo, precipitación, láser y calcinado.

Preconsolidación. Es el acondicionamiento de los polvos para obtener homogeneidad y evitar defectos que puedan surgir en etapas posteriores. Las

técnicas de preconsolidación más usuales son las siguientes: *aditivos*, en donde se le pueden agregar a los polvos cerámicos ya sea aglomerantes, lubricantes auxiliares del sinterizado, humectantes o defloculantes. *Secado por spray*, en donde los polvos y sus aditivos son arrojados en una cámara cónica por medio de chorros de aire para secarlos y formar aglomerados suaves. *Granulación*, en donde se prepara una mezcla plástica formada por polvos y aditivos con el objetivo de preempacarlos y requerir de un menor volumen durante el formado.

3.3.2 Proceso de Formado.

Las técnicas para la consolidación de polvos y producción de formas son:

Presión.	Formado plástico.
presión uniaxial	extrusión
presión isostática	moldeo por inyección
presión en caliente	moldeo por transferencia
presión isostática en caliente	moldeo por compresión
Vaciado.	Otros.
slip casting	formado en cintas
thixotropic casting	flame spray
vaciado en molde soluble	maquinado en verde

En el proceso de presión se utilizan diferentes aditivos como aglomerantes, los cuales proveen un enlace temporal entre las partículas cerámicas, necesario para que surta efecto la presión, o lubricantes los cuales ayudan en la redistribución de las partículas durante la presión para obtener el máximo empaquetamiento, mejorar el flujo dentro de los dados y minimizar la adhesión a los dados.

En general, el vaciado de cerámicos se efectúa a temperatura ambiente. El fluido consta de partículas cerámicas suspendidas en un líquido y se vacía en un molde poroso que remueve el líquido y deja un compactado particular.

3.3.3 Procesos de densificación (sinterizado).

El sinterizado es la eliminación de poros entre las partículas de la pieza compactada, combinada con el crecimiento y enlace entre las partículas. Para que ocurra el sinterizado debe haber un mecanismo de transporte de materia (difusión, flujo viscoso) y una fuente de energía (normalmente calor) que active dicho transporte. En la tabla 3.1 se muestran los diferentes mecanismos de sinterizado.

Tabla 3.1 Mecanismos de Sinterizado.

Tipo de Sinterizado	Mecanismo de Transporte	Fuerza Motriz
Fase vapor	Evaporación-condensación	Diferencias en presión de vapor
Estado sólido	Difusión	Diferencias en energía libre o potencial químico
Fase líquida	Flujo viscoso, difusión	Presión capilar, tensión superficial
Líquido reactivo	Flujo viscoso, sol.-precipitación.	Presión capilar, tensión superficial

3.4 MATERIALES CERÁMICOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO.

Debido a que este trabajo está orientado a determinar el grado y mecanismos de desgaste de material cerámico en contacto con vidrio de sosa-cal fundido, esta sección se enfocará al comportamiento de algunos materiales cerámicos utilizados en la industria de fabricación del vidrio de sosa-cal.

Existe una amplia variedad de materiales cerámicos utilizados en la industria del vidrio. Todos estos deben cumplir con las siguientes características:

- Resistencia a la corrosión por efectos del vidrio fundido, para así evitar que los productos de la corrosión del refractario entran al vidrio y afectan su calidad inicial.

- Resistencia al choque térmico debido a los altos gradientes de temperatura que ocurren durante el proceso.

En la tabla 3.2 se listan los materiales más utilizados en la industria del vidrio.

Tabla 3.2.

AZS	Alúmina Zirconia Sílice
AS	Alúmina Sílice
HZFC	Alta Zirconia Fused-Cast
ZTA	Alúmina reforzada con Zirconia
PSZ	Zirconia Parcialmente Estabilizada
AZCS	Alúmina Zirconia Sílice Óxido de Cromo
ZGS	Zirconia de grano estabilizado con Rd y Pt
ZAC	Zirconia Alúmina Corundum

Como se puede observar en la tabla anterior los compuestos más utilizados son la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3) y la zirconia (ZrO_2), a continuación, se presenta una breve exposición de las características principales de la alúmina y la zirconia, ya que la sílice fue tratada anteriormente.

3.4.1 Alúmina.

El óxido de aluminio (Al_2O_3) (normalmente conocido como alúmina), es quizá el material más comúnmente utilizado en la producción de cerámicos técnicos. Las razones por su amplia aceptación son muchas; la alumina tiene alta dureza excelente resistencia a la corrosión y al desgaste, y baja conductividad eléctrica. También su manufactura es económica, la cual comprende polvos de alumina de bajo costo.

La microestructura y las propiedades resultantes de los cerámicos de alúmina dependen en gran parte del porcentaje de alúmina presente. Por ejemplo, las alúminas de alta pureza, típicamente presentan una microestructura de granos de alúmina equidimensionales. La alúmina con 96% de pureza exhibe una microestructura más complicada consistente de granos de alúmina (a menudo alargados) en las fronteras de granos rodeados por una fase. Dependiendo del procesamiento, esta fase en las fronteras de grano puede ser amorfa, cristalina, o ambas.

3.4.2 Zirconia.

La zirconia u óxido de zirconio, ZrO_2 cuando es puro, tiene un punto de fusión de aproximadamente 2760 °C, y por esto es uno de los cerámicos más refractarios. Se produce por la reacción de la arena de zircon y dolomita a 1371 °C y sacando por lixiviación los silicatos. El material es utilizado como cerámico sinterizado y para crisoles y ladrillos para hornos.

La zirconia presenta diferentes transformaciones polimórficas. Hasta una temperatura de aproximadamente de 950 °C la zirconia presenta una estructura monoclinica. La forma tetragonal de la zirconia se presenta en el rango de 950-1200 °C. Por último, la tercera forma de la zirconia es la cúbica la cual se presenta a temperaturas superiores a 1200 °C. Existe una cuarta estructura polimórfica de la zirconia y sólo se presenta a grandes presiones. En la figura 3.1 se muestra un esquema de las tres estructuras polimórficas de la zirconia.

La zirconia pura no puede ser fabricada en un cuerpo cerámico totalmente denso utilizando las técnicas de procesamiento convencionales.

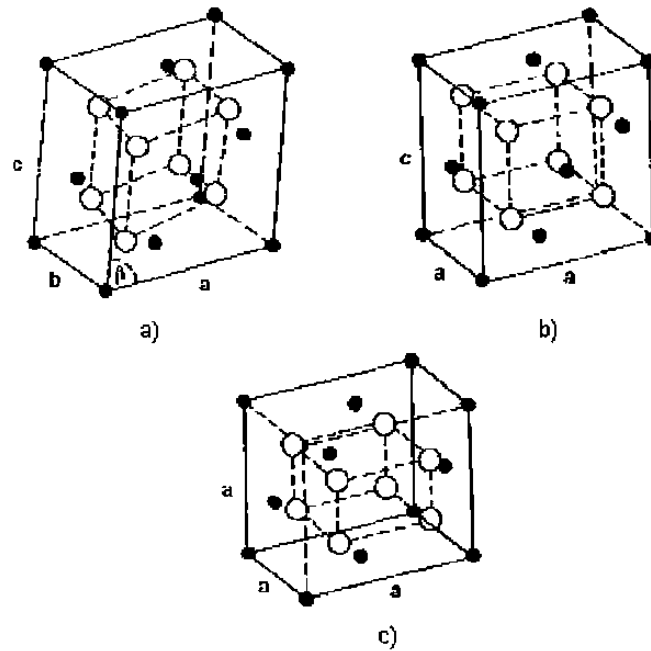


Fig 3.1 Estructuras cristalinas de la zirconia: a) monoclinica, b) tetragonal, y c) cúbica. Círculos pequeños=Zr. Círculos grandes=O.

Un incremento de volumen del 3 al 5% asociado a la transformación de fase tetragonal a monoclinica provoca que cualquier cuerpo de ZrO_2 puro se destruya completamente durante el enfriamiento desde la temperatura de sinterizado. Aditivos como el CaO , MgO , Y_2O_3 , o CeO_2 deben de ser mezcladas con el ZrO_2 para estabilizar el material ya sea en su fase tetragonal o cúbica.

Tabla 3.3 Algunas propiedades físicas de la alumina y la zirconia

Material	Densidad (g/cm^3)	Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Conductividad térmica (W/m K)
Alúmina (Al_2O_3)	3.4-4.0	2050	27
Zirconia (ZrO_2)	5.8	2500	2

Coef. de expansión térmica ($10^{-6}/\text{K}$)	Resistencia tensil (MPa)	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la fractura ($\text{MPa m}^{1/2}$)
8	205-550	385	2.0-3.0
9-10	965-1380	140	6.0-8.0

3.4.3 Refractarios para la fusión de vidrio.

Los materiales refractarios para manejar vidrio fundido se seleccionan, aparte de resistir altas temperaturas, principalmente para reducir los posibles defectos en el vidrio. También, para incrementar la vida de los hornos, y finalmente para reducir costos iniciales. La resistencia a la corrosión de la mayoría de los refractarios resulta de su poca o nula reactividad a altas temperaturas.

El refractario más ampliamente utilizado para contacto con vidrio es el AZS electrofundido. Consiste de cristales de alúmina y zirconia en una matriz vítrea de aluminosilicato. Tiene muy poca porosidad y además el proceso de electrofundido tiene el objetivo de reforzar los puntos débiles y también el de disminuir el desgaste del refractario. Posee excelente resistencia a la corrosión y al esfuerzo térmico, esto se debe a que al entrar en contacto el vidrio fundido de sosa-cal con la fase menos resistente del AZS (corundum, fase vítrea) esta es completamente atacada y disuelta. Y donde la zona de mayor resistencia (zirconia) está aún presente en su forma original cristalina. Esta es una zona bifásica, una fase vítrea rica en alúmina siendo la matriz para la fase cristalina de zirconia. De hecho esta zona bifásica es una barrera química que protege al refractario de AZS contra la corrosión [10].

Este material refractario se utiliza en casi todas las zonas de fabricación del horno incluyendo la zona de descarga (noria, pistón y chorreadores).

Otro refractario que fue desarrollado para la industria del vidrio fue el AZCS. Este refractario es un AZS en el cual una parte de la alúmina es reemplazada por óxido de cromo. La fase vítrea, de la misma naturaleza que la de aquella del AZS, provee las propiedades termomecánicas necesarias para la producción de grandes bloques monolíticos.

Tabla 3.4 Composición química típica de un chorreador de ZAC utilizado en la industria del vidrio

Compuesto	Porcentaje
ZrO ₂	8.5
Al ₂ O ₃	73.0
SiO ₂	18
Fe ₂ O ₃	0.5

Se reconoce generalmente que todos los refractarios que contienen óxido de cromo son muy sensibles a las variaciones térmicas durante servicio, sin embargo, debido a la presencia de la fase vítrea anteriormente mencionada el AZCS es una excepción a esta regla. En general, se ha observado que la fractura térmica en servicio del AZCS no es significativa y es comparable a la al presentada por el AZS, el cual, contiene la misma fase vítrea. Se ha demostrado en pruebas hechas en planta [11] que el AZS con 41% de zirconia se desgasta 2.5 veces más que el AZCS.

Tabla 3.5 Composición química del AZCS

Compuesto	Porcentaje
Cr ₂ O ₃	28.0
ZrO ₂	28.0
Al ₂ O ₃	28.3
SiO ₂	14.5
Na ₂ O	1.1
Solución Sólida	
Cromo-Alumina	52.5
Badeleyita	27.5
Fase vítrea	20.0

A pesar de que se han demostrado las excelentes propiedades tanto térmicas como de resistencia al desgaste del AZCS, paulatinamente este material ha dejado de ser utilizado en la industria del vidrio debido a que estudios realizados

recientemente demuestran que un compuesto formado durante el proceso es un agente cancerígeno.

La alúmina reforzada con zirconia, ZTA, es otro material utilizado en la industria del vidrio, y es el término genérico aplicado a los sistemas alúmina-zirconia donde la alúmina es considerada la fase primaria (70 a 95%). Las adiciones de partículas de zirconia (ya sea en su forma pura o estabilizada) desde un 5 a 30% representan la fase secundaria. La solubilidad del ZrO_2 en Al_2O_3 y de Al_2O_3 en ZrO_2 es despreciable. El ZrO_2 está presente ya sea en su estructura tetragonal o monoclinica. La microestructura y subsecuentes propiedades mecánicas pueden ser ajustada para aplicaciones particulares. Contenidos más altos de ZrO_2 proporcionan un incremento de la resistencia a la fractura y de la resistencia a carga mecánica, con una pequeña reducción en la dureza y en el modulo de elasticidad. Las resistencia al desgaste en algunas aplicaciones son bastante buenas. Estos tipos de composiciones de ZTA han sido utilizados en algunas aplicaciones de corte.

El ZTA también ha sido utilizado en algunas aplicaciones de choque térmico. El uso extensivo de la zirconia monoclinica puede resultar en un cuerpo cerámico severamente microagrietado. Esta microestructura permite que los esfuerzos térmicos sean distribuidos a lo largo de una red de microgrietas donde la energía es empleada o gastada abriendo y/o extendiendo las microgrietas, dejando el cuerpo del cerámico intacto. Este material a pesar de sus excelentes propiedades térmicas, es utilizado sólo en algunas partes del horno en el procesado de vidrio. Generalmente es utilizado en la garganta de los hornos y en los regeneradores [12]. Esto se debe a que otros materiales presentan una mayor resistencia a la corrosión en contacto con vidrio.

Otro material desarrollado para la industria del vidrio es el HZFC (Alta zirconia electrofundida). Este material es utilizado primordialmente para la producción de vidrios especiales, por ejemplo, los vidrios de borosilicato, de potasio y los vidrios

cerámicos. Para estos tipos de vidrio, el HZFC presenta grandes ventajas, en cuestión de corrosión y desgaste, sobre los de AZS. Sin embargo, en el caso del vidrio de sosa-cal el AZS presenta mejores propiedades de resistencia a la corrosión y al desgaste. Esto se debe a que el HZFC no presenta la capa o barrera protectora que presenta el AZS como se mencionó anteriormente [10].

Tabla 3.6 Composición química del HZFC

Compuesto	Porcentaje
ZrO ₂	94
SiO ₂	4.5
Na ₂ O	0.35
Al ₂ O ₃	0.8
Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	< 0.35

Otro material que ha sido desarrollado para el manejo del vidrio fundido es el conocido como ZAC (zirconia-alúmina-corundum), en realidad es un variante del AZS donde la diferencia estriba en su proceso de fabricación. Este es fabricado fundiendo alúmina, zirconia y polvo de sílice (o alúmina y zircon) con electrodos de grafito y vertiéndolo a temperaturas > 1750 °C en moldes de arena. Después de que se ha formado una superficie sólida el molde es removido y el producto resultante es enterrado en polvo aislante y recocido por dos semanas, el enfriamiento lento es necesario para minimizar la fractura. Los bloques son maquinados con diamante para darles forma. Las composiciones típicas del ZAC se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.7 Composición química de bloques de ZAC
utilizados en la industria del vidrio

Compuesto	ZAC	ZAC 1681	ZAC 1711
Al ₂ O ₃	51.0	50.0	46.0
ZrO ₂	33.5	32.5	41.0
SiO ₂	13.0	16.0	12.0
Na ₂ O	1.6	1.1	0.8
Fe ₂ O ₃	0.4	0.05	0.05
TiO ₂	0.1	0.05	0.05
CaO	0.3	-	-
MgO	0.3	-	-

Fases Mineralógicas (%):

Corundum	40-45	50	45-46
Baddeleyita	27-35	30-35	40-42
Fase Vidrio	25-30	18-20	15-18
Densidad g/cm ³	3.45	3.42	3.65

Refractariedad bajo carga:

Ta	>1700	>1700	>1700
----	-------	-------	-------

La microestructura del ZAC consiste de cristales alargados y delgados de Al₂O₃/ZrO₂ rodeados de granos de ZrO₂, granos de corundum y ZrO₂ conteniendo vidrio aluminosilicato. La mayoría de la zirconia ZrO₂ se encuentra en una forma de un esqueleto (eutéctica) el cual es difícil de desalojar mediante la acción de la corrosión y actúa para mantener los productos de la corrosión en su lugar. La fase vítrea es lo suficientemente viscosa a la temperatura para deformar y acomodar los esfuerzos tan grandes asociados con la transformación tetragonal-monoclínica de la zirconia la cual ocurre a 1000-1200 °C en el calentamiento y 1000-800 °C en el enfriamiento. Una mejor resistencia a la corrosión se logra cuando el contenido de ZrO₂ es mayor. Sin embargo, contenidos mayores del 41% de ZrO₂ causan problemas con la distribución de esfuerzos en la transición tetragonal-monoclínica.

La alta resistencia a la corrosión de los ladrillos de ZAC se debe a la morfología eutéctica de la microestructura, a la baja permeabilidad de los densos bloques electrofundidos y la solución de alúmina en el vidrio fundido próximo a las paredes del refractario. La alúmina disuelta en el vidrio crea una capa viscosa próxima al refractario, la cual no puede ser penetrada por el vidrio sin la presencia de alúmina extra [13].

CAPITULO 4

DESGASTE

4.1 INTRODUCCION.

Junto con la fricción y la lubricación, el desgaste es parte de una disciplina relativamente nueva llamada tribología. La tribología fue definida por primera vez como "la ciencia y tecnología de superficies interactuantes en movimiento relativo y las practicas relativas a esto" [14]. La palabra tribología se basa en el término griego *tribos* que significa frotar. Tal como fue descrito en el capítulo 1, el objetivo de esta tesis es el estudio de los rangos y mecanismos de desgaste en ciertos materiales cerámicos en contacto con vidrio fundido. Para esto, en este capítulo se tratarán los aspectos fundamentales del fenómeno de desgaste.

4.2 DEFINICION DE DESGASTE.

Desgaste se define como la pérdida progresiva de sustancia de la superficie operativa de un cuerpo que ocurre como un resultado de movimiento relativo en la superficie de dicho material [15]. Hay dos enfoques generales para esta definición de desgaste: el primero describe los resultados de desgaste, y la segunda se basa sobre la naturaleza física de el proceso. En el primero, términos como picadura (pitting), desgaste superficial (scuffing), estriación (scoring) y fretting son altamente descriptivos de la apariencia de las superficies desgastadas, mientras que el segundo es indicativo del mecanismo de desgaste usando términos como adhesión, corrosión, fatiga, abrasión y erosión. El desgaste, a su vez, se define como el daño a una superficie sólida que generalmente comprende la pérdida progresiva de material que se debe al movimiento relativo entre la superficie y una sustancia o sustancias de contacto. La rapidez a la cual las superficies se gastan depende de las características de cada superficie, la presencia de abrasivos entre la primera y

segunda superficies, la velocidad de contacto, y otras condiciones ambientales. En suma, la rapidez de pérdida de material no es inherente al material.

4.3 TIPOS Y MECANISMOS DE DESGASTE.

Como se acaba de mencionar el desgaste puede ser caracterizado basándose en la apariencia de las partes desgastadas o basado en los mecanismos y condiciones que prevalecen durante la remoción de material. Clasificaciones tales como desgaste suave, desgaste severo, estriación y desgaste superficial están basadas en la observación de las partes desgastadas. Sin embargo, otras terminologías tales como desgaste adhesivo, desgaste por delaminación o desgaste erosivo, están basadas en los mecanismos de remoción de material o las condiciones existentes durante el proceso de desgaste.

Desgaste puede ser clasificado de acuerdo a los mecanismos de desgaste y condiciones [16]. Basados en este criterio los tipos de desgaste son:

- i. Adhesión
- ii. Delaminación
- iii. Erosión
- iv. Abrasión
- v. Fretting
- vi. Desgaste por Impacto
- vii. Fatiga Superficial
- viii. Desgaste Corrosivo
- ix. Desgaste Difusivo

Los primeros siete tipos ocurren por interacciones mecánicas, mientras los últimos dos tipos son influenciados primordialmente por condiciones especiales del medio circundante.

4.3.1 Adhesión.

El desgaste adhesivo es el resultado del deslizamiento relativo entre dos superficies bajo la carga de un contacto normal. Se asume que cuando las asperezas se ponen en contacto, se adhieren fuertemente entre sí y forman uniones entre las asperezas.

La subsecuente separación de las superficies ocurre en la masa o volumen en donde se localizan las asperezas más suaves. Este proceso genera partículas del material mas suave, las cuales se adhiere a la superficie del material mas duro.

4.3.2 Delaminación. (Teoría de Delaminación de Desgaste)

El desgaste por delaminación toma lugar y es el resultado del deslizamiento relativo entre dos superficies bajo una carga de contacto normal [17]. La teoría de delaminación de desgaste describe los siguientes eventos secuenciales, los cuales llevan a la formación de una partícula de desgaste:

1. Cuando dos superficies entran en contacto, cargas tanto normales como tangenciales se transmiten a través de los puntos de contacto mediante acciones adhesivas. Las asperezas más suaves son deformadas y removidas dando lugar a una superficie mas tersa, debido a un mecanismo de desgaste adhesivo.
2. La tracción ejercida por la superficie de las asperezas más duras sobre la superficie más suave induce deformación plástica cizallante la cual se acumula con la carga repetitiva.
3. Al continuar la deformación de la subsuperficie, las grietas nucleon bajo la superficie.
4. Una vez que las grietas nucleon, cargas y deformación posteriores causan que las grietas se extienden y propagan, uniéndose con sus vecinas.

5. Cuando estas grietas finalmente cortan la superficie, partículas largas y delgadas tipo hojuelas se "delaminan" y se desprenden de la superficie, creando así desgaste por delaminación.

4.3.3 Abrasión.

El desgaste abrasivo, como es definido por la ASTM [18], se debe a partículas o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie sólida y se mueven a lo largo de esta.

La abrasión se clasifica típicamente de acuerdo a los tipos de contacto, así como de las condiciones ambientales de contacto. Los tipos de contacto incluyen desgaste de dos y de tres cuerpos. La abrasión también es clasificada como de bajo esfuerzo, alto esfuerzo o ranurado. La abrasión de bajo esfuerzo ocurre cuando el abrasivo permanece relativamente intacto. Abrasión de alto esfuerzo existe cuando las partículas abrasivas son aplastadas. En la abrasión por ranurado, un abrasivo relativamente grande cortará el material con el cual entra en contacto.

Los mecanismos de desgaste abrasivo incluyen: fractura, fatiga y fusión de material. Debido a la complejidad de la abrasión, ningún mecanismo describe todos los tipos de pérdida de material. Estos mecanismos son: microfractura, microfatiga, corte, formación de cuñas y ranurado ó arado.

4.3.4 Erosión.

El desgaste erosivo se origina por el impacto de partículas duras abrasivos en una superficie. Se cree que la erosión ocurre por la combinación de dos mecanismos, principalmente cortado o desgaste abrasivo y desgaste por deformación. La acción de cortado mediante el impacto de partículas abrasivas predomina en ángulos más pequeños; mientras que el mecanismo de deformación

domina a ángulos mas grandes de impacto. La erosión mediante la acción de corte se efectúa de manera similar al proceso de desgaste abrasivo.

4.3.5 Fretting.

El desgaste por fretting se origina cuando las superficies en contacto sufren desplazamiento oscilatorio tangencial de pequeña amplitud. Este tipo de desgaste ocurre por la interacción de diferentes mecanismos de desgaste. El desgaste por fretting se inicializa por adhesión y cuando las partículas de desgaste se oxidan, el desgaste adhesivo se combina con el proceso abrasivo. La corrosión tiene una fuerte influencia en el desgaste por fretting, especialmente en la oxidación de las partículas de desgaste las cuales producen acción abrasiva.

4.3.6 Desgaste por Impacto.

El desgaste por impacto o percusivo se origina por el impacto repetitivo de dos superficies. El desgaste por Impacto difiere del desgaste erosivo en el sentido que el desgaste erosivo ocurre por impacto de pequeñas partículas sólidas en la superficie, mientras que el desgaste por impacto se origina del impacto repetitivo de dos superficies sólidas. El mecanismo mas común del desgaste por impacto es mediante la formación y propagación de grietas subsuperficiales en materiales dúctiles y mediante la formación y propagación de las grietas de la superficie en los materiales frágiles. Este mecanismo es similar al mecanismo de erosión a grandes ángulos de impacto.

4.3.7 Desgaste por Fatiga Superficial.

El desgaste por fatiga superficial se asocia generalmente en superficies las cuales presentan un desplazamiento rotativo o de rolado, donde el coeficiente de fricción es despreciable. El mecanismo de desgaste se lleva a cabo por la formación y propagación de grietas superficiales o subsuperficiales. La nucleación de las grietas subsuperficiales se asocia con las inclusiones localizadas en regiones de máximo

esfuerzo de corte. Especialmente, en contactos sobrecargados la nucleación de las grietas ocurre en la zona de deformación plástica la cual se localiza a una profundidad característica debajo de la superficie. El proceso de nucleación de grietas en el desgaste por fatiga superficial es similar al proceso de delaminación.

4.3.8 Desgaste Corrosivo.

La causa fundamental de esta forma de desgaste es la reacción química entre el material desgastado y un medio corrosivo el cual puede ser ya sea un agente químico, un lubricante reactivo o cualquier material con el cual exista alguna reacción química. Las reacciones químicas superficiales, las cuales son benéficas para prevenir el desgaste adhesivo, dan lugar a una considerable pérdida del material básico [19]. Si un material reacciona para producir una película en su superficie mientras simultáneamente esta sujeto a un contacto deslizante entonces uno de los cuatro procesos siguientes puede ocurrir:

- una película lubricante resistente la cual inhibe corrosión y desgaste a la vez puede ser formada;
- una película débil, de corto período de vida bajo contacto deslizante, puede ser producida. Una alta rapidez de desgaste puede ocurrir debido a la formación y destrucción regular de este tipo de películas. El coeficiente de fricción puede o no puede ser bajo en esta instancia;
- la superficie protectora de las películas protectoras puede ser desgastada (e.g. por picadura);
- los procesos de corrosión y desgaste pueden actuar independientemente para causar pérdida de material, lo cual es simplemente la suma de estos dos procesos juntos.

En general, el proceso de desgaste corrosivo involucra la formación de películas por reacción química en la superficie de los materiales en contacto y la remoción de estas películas, por efectos mecánicos.

4.3.9 Desgaste Difusivo.

Cuando existe contacto real entre los átomos de las superficies opuestas y una interfase a alta temperatura, puede ocurrir una difusión significativa de elementos químicos de un cuerpo a otro. El ejemplo mas conocido de este contacto es el de las herramientas de corte trabajando a alta velocidad. En estas condiciones puede existir difusión de átomos de un material a otro cuya concentración es radicalmente diferente, e.g. tungsteno y carbono. Esto conlleva a que los átomos de tungsteno de la herramienta difundan hacia la pieza de acero sin contenido de tungsteno. Esto da lugar a la fragilización de la herramienta y por lo tanto a su fractura [20].

Tabla 4.1 Mecanismos de Varios Tipos de Desgaste.

Tipo de Desgaste	Tipo de Contacto	Movimiento	Mecanismo
Desgaste Adhesivo	Elástico/Plástico	Deslizamiento	Adhesión
Desgaste por Delaminación	Elástico/Plástico	Deslizamiento	Delaminación
Desgaste por Fretting	Elástico/Plástico	Oscilación	Adhesión, Del., Abrasión
Desgaste Abrasivo	Elástico/Plástico	Deslizamiento	Abrasión, Delaminación
Desgaste Erosivo	Elástico/Plástico	Impacto/Deslizamiento	Abrasión, Delaminación
Desgaste por Impacto	Elástico/Plástico	Impacto	Delaminación (Fatiga)
Desgaste por Fatiga Superficial	Elástico	Rodado	Fatiga
Desgaste Corrosivo	Elástico/Plástico	Cualquier Tipo	Reacción Química
Desgaste Difusivo	Elástico	Deslizamiento	Difusión

4.4 Diseño de las pruebas de desgaste.

Desgaste o resistencia al desgaste no es una propiedad inherente al material sino que más bien es una función del sistema operativo. Adicionalmente, en cualquier sistema tribológico, siempre habrá dos o más mecanismos de desgaste actuando al mismo tiempo.

166305

Debido a lo anterior, el diseño de las pruebas de desgaste tanto a nivel campo como en laboratorio, deben realizarse tomando en cuenta todos los factores que influyen en el sistema tribológico.

Un método sistemático de pruebas debe relacionar los experimentos controlados de laboratorio a situaciones de la vida real. Según Zum Ghar, existen seis diferentes categorías de pruebas tribológicas: de campo, de banco, subsistema, componente, componente simplificado y pruebas modelo [21]. El límite en el cual los datos de desgaste pueden ser extrapolados a las condiciones de servicio decrece desde las pruebas de campo hasta las pruebas modelo. Las pruebas de campo son llevadas a cabo por períodos largos y bajo condiciones reales o muy similares a aquellas que ocurren en la práctica. Las pruebas de campo se realizan bajo condiciones que resultan de simplificaciones del medio ambiente o de las variables de operación. En las pruebas de subsistema, las interacciones de diferentes partes del sistema son reducidas. El medio ambiente, la temperatura, y las vibraciones son substancialmente diferentes de las condiciones de prueba de banco o en las pruebas de campo. Las pruebas de componente, y de componente simplificado representan más simplificaciones en los parámetros del sistema.

Las pruebas modelo son llevadas a cabo en períodos cortos y bajo cargas o velocidades incrementadas para probar el comportamiento tribológico de los materiales bajo condiciones extremas. En las pruebas modelo pueden ocurrir diferentes mecanismos de desgaste y/o rapidez de desgaste. Sólo se pueden transferir los resultados de desgaste de la prueba modelo al sistema real si el mismo mecanismo de desgaste es el predominante. Las desventajas de las pruebas de campo son el alto costo, períodos largos de prueba y la dificultad para controlar las condiciones de operación o el cambio en los parámetros de prueba.

Las pruebas modelo son ventajosas para investigaciones científicas porque los parámetros de prueba son altamente reproducibles y por tanto los resultados de la

prueba son confiables. En una prueba modelo, las condiciones experimentales son fácilmente alteradas. El diseño de la prueba de desgaste deberá considerar cuales son los parámetros más importantes en el sistema. De esta manera se pueden eliminar, minimizar o hacer constantes aquellos que no se consideren substanciales para los objetivos del estudio. De esta forma los rangos de desgaste determinados en las pruebas pueden ser relacionados a las variables de control del experimento, bajo las condiciones a las cuales se realizó dicho experimento.

Para poder realizar comparaciones o extrapolar a la vida real, es necesario que los datos de desgaste se reporten indicando todos los parámetros del tribosistema de prueba.

CAPITULO 5

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCION

Los materiales refractarios que son usados actualmente en la industria del vidrio se caracterizan principalmente por presentar una gran resistencia al desgaste en contacto con vidrio fundido y al choque térmico.

Se pueden realizar pruebas de desgaste para poder predecir la vida útil de estos materiales, las pruebas a realizar pueden ser ya sea de campo, con las desventajas que conlleva hacer este tipo de pruebas (alto costo, periodos largos de prueba, poco control en las variables del sistema). También pueden realizarse pruebas modelo ó de vida acelerada, en donde al menos una de las variables del sistema ha sido aumentada en magnitud para acelerar el proceso de desgaste. En estas pruebas modelo se tiene la ventaja de tener un mejor control de las variables del sistema y un costo menor. Extrapolar los resultados de pruebas modelo a condiciones reales de operación no es siempre fácil y deberá tomarse precaución de no hacer predicciones sin antes considerar todas las posibles variaciones del sistema.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRUEBAS DE DESGASTE.

Para el desarrollo experimental de este trabajo, se consideró lo siguiente:

1. Diseñar un sistema de pruebas de desgaste de materiales cerámicos y/o refractarios en contacto con vidrio fundido a alta temperatura. De tal manera que se "modele" de forma simplificada el deslizamiento del vidrio fundido sobre la superficie de los chorreadores ó bushings.

2. Una vez que el diseño anterior se logre de manera satisfactoria, el segundo objetivo es el de evaluar los rangos y mecanismos de desgaste del material sometido a prueba.

Busby y Turner [22] demostraron que haciendo este tipo de prueba modelo se pueden obtener resultados aceptables y que las perturbaciones térmica y de flujo de material, provocadas por el movimiento relativo del cerámico con el vidrio fundido, son mínimas y despreciables.

5.2.1 Pruebas preliminares.

Se realizaron pruebas preliminares en dos hornos eléctricos con los que se cuenta en los laboratorios del Doctorado de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (DIMAT).

Los hornos utilizados fueron dos hornos eléctricos marca Lindberg, uno de ellos de tipo crisol modelo Molda-Crisol 56343 de 1500 watts, 110 volts y con una temperatura máxima de trabajo de 1100°C, el otro horno utilizado fue de cámara horizontal, modelo 51848 CTD, 1950 watts, 110 volts y con una temperatura máxima de trabajo de 1100°C.

Estas pruebas preliminares se realizaron principalmente con los siguientes objetivos:

- El de explorar la factibilidad de obtener vidrio fundido a 1100°C y proceder a las pruebas de desgaste.
- Ganar experiencia y determinar los parámetros a controlar durante las pruebas de desgaste.

- Determinar el tipo de horno más adecuado para las pruebas de desgaste

El vidrio se fundió a 1000°C. La cantidad de vidrio fundido fue de 50 grs, se utilizó un crisol de baja alúmina de 100 ml. para contener el vidrio.

Después de estas pruebas preliminares se determinó que los parámetros a controlar son: la homogeneidad de la temperatura del horno, la firmeza del crisol que contiene al vidrio, es decir, que el crisol no gire al momento de colocar la probeta dentro de este. Debido a que la temperatura de nuestras pruebas coincidía con la temperatura máxima de trabajo de los hornos, se detectó que los elementos resistivos se deterioraron rápidamente, pudiendo fallar en cualquier momento.

Como resultado de estas pruebas preliminares se contempló la necesidad de adquirir ó fabricar un horno de mayor capacidad.

Entre las opciones de adquirir un horno o el de fabricarlo, se decidió por la segunda alternativa por las siguientes razones:

1. Existía la posibilidad de fabricar un horno en los laboratorios del DIMAT, que satisficiera exactamente los requisitos de nuestras necesidades de prueba (temperatura, tiempo de calentamiento, dimensiones, diseño de puerta, etc.)
2. El trabajo realizado para el diseño y la construcción del horno, no solo enriqueció este trabajo de tesis, sino que ha aportado un conocimiento y experiencia extra al DIMAT.
3. El tiempo invertido en la construcción del horno, fue menor al tiempo de entrega prometido por los fabricantes de hornos.

5.2.2 Componentes del sistema de pruebas modelo de desgaste.

Como se mencionó anteriormente se tomó la decisión de hacer girar la muestra del material cerámico, y no hacer girar el vidrio, porque de lo contrario, el diseño del sistema se complicaría demasiado [22], además esto daría lugar a que el vidrio no haga un contacto total con el cerámico y no se reproduzcan las condiciones de planta, en donde el vidrio fundido siempre esta en contacto directo con el cerámico.

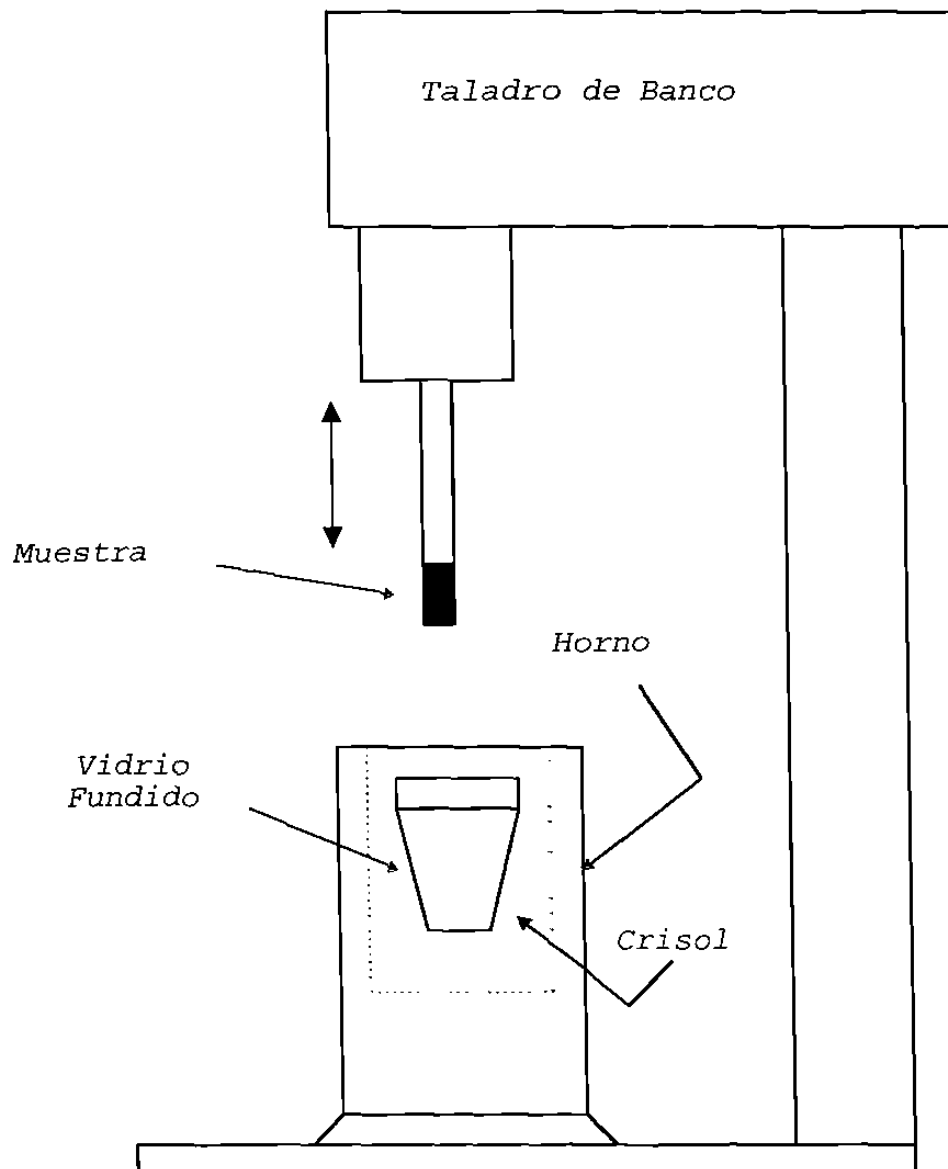


Fig. 5.1 Representación Esquemática del sistema de pruebas de desgaste para material cerámico

El sistema de pruebas de desgaste consta de tres elementos principales:

- Sistema para la rotación de las muestras (Taladro de banco).
- Sistema de sujeción de la muestra.
- Unidad térmica (Horno eléctrico).

En la figura 5.1 se muestra el esquema del sistema para realizar las pruebas modelo de desgaste.

5.2.2.1 Sistema para la rotación de las muestras (Taladro de banco).

Para poder proporcionarle el movimiento rotatorio a la muestra del material cerámico es necesario contar con un sistema con las siguientes características:

- Capacidad para controlar diferentes velocidades de rotación.
- Facilidad de desplazamiento (tanto vertical como horizontal).
- Estabilidad mecánica.
- Capacidad de trabajo para periodos prolongados.

Se tomó la decisión de usar un taladro de banco como sistema de rotación de las muestras, ya que cumple prácticamente con las características requeridas.

El taladro seleccionado fue un taladro Wilton 2530 de 12 velocidades, con un rango que va desde 250 hasta 3100 RPM, con sistema de transmisión por bandas y poleas, 110 Volts, y broquero de 5/8".

5.2.2.2 Sistema de sujeción de la muestra.

Para el diseño del sistema de sujeción de la muestra de material cerámico se tomó la decisión de utilizar un tubo de material que resista las altas

temperaturas de operación y con una resistencia mecánica aceptable. El material elegido para el tubo fue alúmina.

En la figura 5.2 se muestra un esquema del sistema de sujeción. En esta figura se puede apreciar que se maquinaron las muestras para poder insertarlas en el tubo de alúmina. El diámetro al que fueron maquinado fue de 12 mm.

Se utilizó un tubo de alúmina con el diámetro menor al de las muestras con el objetivo de que las muestras quedaran bien sujetas durante la experimentación.

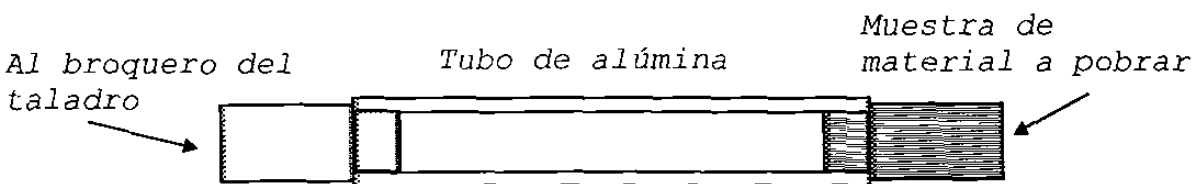


Fig. 5.2 Representación esquemática del sistema de sujeción.

También se puede observar en la figura 5.2 que se colocaron dos muestras en el tubo, una en cada extremo de este. Esto con el propósito de que una de ellas se inserte en el broquero del taladro de banco y la otra, sumergirla en el vidrio fundido, para realizar la prueba. La razón por la cual no se colocó el tubo directamente en el broquero es que el tubo es frágil y no soporta la carga que le aplica el broquero para sujetarlo.

La longitud del tubo de alúmina es de 20 cm y tiene un diámetro interno de 12 mm y un diámetro externo de 18 mm.

5.2.2.3 Unidad térmica (Horno Eléctrico).

Como se mencionó anteriormente se tomó la decisión de fabricar un horno eléctrico para el sistema de pruebas de desgaste. Las características que debe tener esta unidad térmica son las siguientes:

- La cámara del horno debe de ser tipo crisol con un diámetro justo para poder introducir un crisol de una capacidad de 300 ml.
- La temperatura máxima de operación debe de ser mayor a 1100 °C.
- Homogeneidad Térmica.

Para la fabricación del horno se debe contar principalmente con tres elementos:

- Cuerpo del horno, el cual debe de ser fabricado de un material refractario que resista con facilidad temperaturas por arriba de 1100 °C, así mismo, que sea fácil de maquinar, que soporte el choque térmico y que no sea frágil.
- Elementos resistivos, los cuales deben soportar temperaturas de 1100 °C en periodos largos de operación, que sean fácil de formar en espiras (embobinar), para conformar las resistencias eléctrica.
- Aislante térmico, para poder aislar el cuerpo del horno y reducir al mínimo las pérdidas de calor.
- Controlador eléctrico de temperatura, el cual debe regular la cantidad de corriente eléctrica que llega a los elementos resistivos para así poder mantener una temperatura de trabajo preestablecida.

Una vez establecidos los elementos principales con los que debe contar el horno eléctrico los materiales utilizados en cada elemento fueron los siguientes:

Para el cuerpo del horno se utilizaron 10 ladrillos de mulita con dimensiones de 23 X 11,5 X 7,7 centímetros. A cuatro de estos ladrillos se les corto material en forma de media circunferencia con un diámetro de 4½" como se muestra en la figura 5.3. Al rededor de este se hicieron 9 orificios de 5/8" de diámetro, por los cuales se introdujeron las resistencias eléctricas.

Posteriormente se hizo una ranura a lo largo de cada orificio para que el calor producido por las resistencias en forma de radiación llegara a la cámara del horno. El ancho promedio de estas ranuras fue de 1/4".

Estos ladrillos se unieron con mortero, primero en la forma que se muestra en la figura 5.3. y luego, otro par de ladrillos unidos de la misma manera se colocaron encima de los primeros, de tal manera que los orificios coincidieran uno con otro. Ya que la mulita es dura y bastante abrasiva se utilizaron brocas con puntas de carburo de tungsteno. Los diámetros de las brocas utilizadas fueron de 5/8", 1/4" y 1/2".

Los seis ladrillos restantes se utilizaron como la base del horno.

Para el diseño de las resistencias eléctricas se utilizaron las tablas y ecuaciones que se encuentran en el Apéndice I, de donde se obtuvieron el calibre y longitud del alambre.

Los parámetros utilizados en el diseño fueron los siguientes:

- Tipo de alambre, se eligió alambre tipo Aluchrom 'O', ya que su temperatura máxima de operación es de 1350 °C.
- Voltaje 220 V, para que el horno fuera más eficiente y alcanzara la temperatura de operación más rápidamente.

- Potencia de 1900 Watts, lo cual es suficiente para calentar y mantener la temperatura de la cámara del horno, el volumen de vidrio y el crisol durante el tiempo de duración de las pruebas.
- La capacidad de disipación de calor por parte de los elementos resistivos fue considerada como baja, esto para que el calibre de las resistencias resultantes del diseño sean mas grandes y por lo tanto proporcionen un mayor poder calorífico.

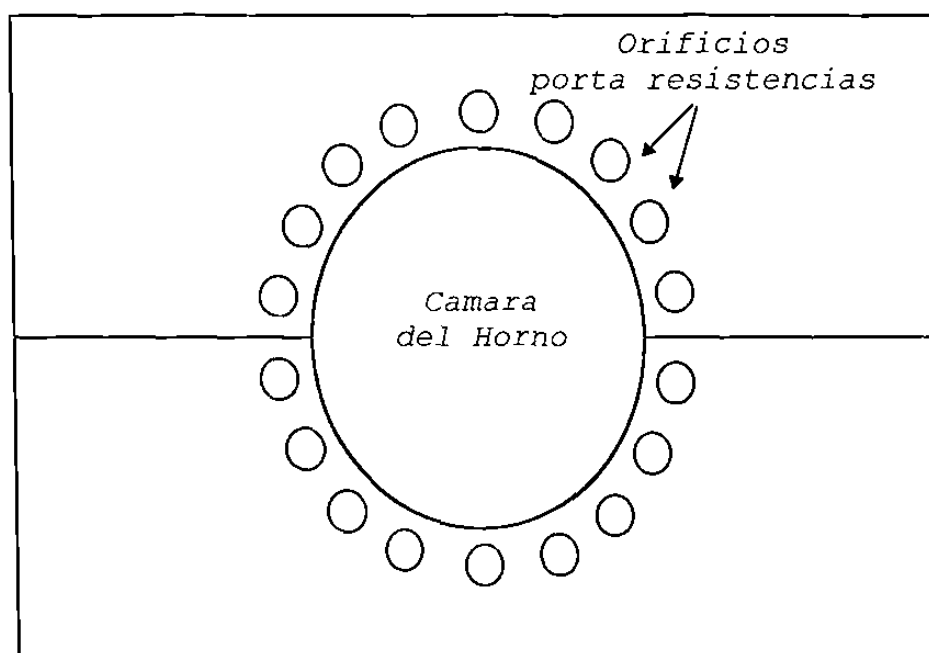


Fig. 5.3 Representación esquemática de la unión de dos ladrillos maquinados para formar el cuerpo del horno.

Se calculó que el calibre y longitud del alambre a utilizar para fabricar los elementos resistivos son: calibre B&S #12 y 3.20 metros de longitud con un diámetro de espira de 7 veces el diámetro del alambre.

Las características y composición química del Aluchrom 'O' se listan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Características y propiedades del Aluchrom 'O'.

Propiedad	
Temperatura de fusión (°C)	1500
Temperatura máxima de operación (°C)	1350
Densidad (g/cm ³)	7.1
Calor Específico (J/g K)	0.46
Conductividad Térmica (20 °C) (W/m K)	13
Modulo de Elasticidad (103 N/mm ²)	210
Resistividad Electrica Específica (Ω mm ² /m)	1.44
Resistencia a la tensión (N/mm ²)	800
Elongación a la fractura (%)	≥15
Tipo de estructura	ferritica
Magnetización	magnetico
Composición química	CrAl 25 5

Para fabricar la resistencia, el alambre fue embobinado utilizando una barra de acero inoxidable de 1/2" y un torno. Se colocó la barra de acero en las mordazas del torno, se sujetó el alambre a la barra de acero y se comenzó a dar vueltas a la barra para que el alambre se enrollara en esta. Se utilizaron 11 metros lineales de alambre para obtener la resistencia embobinada de 3 metros de longitud.

El controlador utilizado fue uno modelo CTDL004, Serie F122, Tipo S94, con termopar tipo K, 220 VAC y 60 Hz. En la figura 5.4 se muestra el controlador

utilizado. El termopar del controlador se instaló en la parte inferior de la cámara del horno y además se le protegió con una capucha.

Como material aislante se utilizó fibra cerámica de alta densidad para cubrir las paredes externas del horno, para aislar el cuerpo del horno de los ladrillos utilizados como base, y como tapa del horno. En la figura 5.5 se muestra el horno recubierto por la fibra cerámica.

Una vez ensamblado el horno se procedió a curarlo. El curado consiste en calentar el horno gradualmente en periodos de tiempo relativamente largos. En la tabla 5.2 se muestran los tiempos y temperaturas de curado del horno.

Tabla 5.2 Tabulación de las temperaturas y tiempos de curado.

Tiempo (Hrs)	Temperatura (°C)
4	200
4	400
2	600
2	800
2	1000

El curado tiene el objetivo de eliminar la humedad de los ladrillos y del mortero utilizado para unir estos, ya que si se intentara alcanzar temperaturas altas (> 1000 °C) sin eliminar la humedad, los ladrillos y/o el mortero podrían fracturarse.

Un parámetro importante a considerar es la homogeneidad térmica del horno. Durante el curado y las pruebas se estuvo monitoreando la temperatura en dos puntos diferentes del horno, uno en la base (que es el termopar del controlador) y otro en la parte superior del mismo (el sistema utilizado en este punto fue el sistema de adquisición de datos desarrollado por el Dr. Rafael

Colás). Los resultados de este monitoreo de temperaturas se reporta en el capítulo siguiente.

El crisol utilizado fue elaborado a partir de un ladrillo de mulita. Las dimensiones de este son: 75X75X110 mm y tiene una cavidad cilíndrica de 50 mm de diámetro por 50 mm de profundidad.

Durante las primeras pruebas se observó que este no reacciona con el vidrio fundido en las condiciones de prueba, así que es válido utilizar este material como crisol.

figura 5.4 y 5.5

5.2.3 Características y dimensiones de las muestras.

Las muestras del material cerámico que será sometido a las pruebas modelo de desgaste son de Monofrax[®] electrofundido tipo CS-5, cuya composición y algunas propiedades físicas se muestran en las tablas 5.3 y 5.5. Las probetas son de forma cilíndrica de un diámetro de 14.3 mm, y una longitud que oscila entre 23.8 y 26.3 mm y peso de 21.1 y 21.9 grs. En la tabla 5.4 se listan las muestras obtenidas con sus respectivos pesos y dimensiones.

Las probetas se obtuvieron a partir de un ladrillo de 170X150X80 mm el cual fue maquinado con un cortador cilíndrico tipo sacabocados con punta recubierta de diamante y con un disco de corte, también con recubrimiento de diamante.

En la figura 5.6 se muestran dos probetas una antes y otra después de maquinar.

Tabla 5.3 Composición química del Monofrax[®] CS-5.

Compuesto	Porcentaje
SiO ₂	12.9
Al ₂ O ₃	45.8
Fe ₂ O ₃	0.1
CaO	0.2
TiO ₂	-
Na ₂ O	1.1
Si ₃ N ₄	-
Cr ₂ O ₃	-
ZrO ₂	39.5
Otros	0.4

Tabla 5.4 Probetas de Material Cerámico.

Muestra No.	Peso (g)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
1	22.9	14.3	24.5
2	22.1	14.3	28.8
3	21.1	14.3	25.8
4	22.0	14.3	27.9

Tabla 5.5 Propiedades Físicas del material cerámico utilizado en las pruebas de desgaste.

Propiedad	Monofrax® CS-5
Temperatura Máxima en la cara caliente. (°C)	1590
Modulo de Ruptura ASTM C133. MPa @ 20 °C	570
Densidad Volúmica ASTM C134. (g/cm ³)	3.94
Porosidad ASTM C20. (%)	1.0
Contracción (Carga Caliente) 50 hrs. a 3.5 (Kg/cm ²)	0.0
Expansión Térmica Coeficiente	7.9
Conductividad Térmica ASTM C202 @ 1477 °K (W/m °K)	3.5
Calor específico @ 1400 °C. (cal/gm °C)	0.24
Cambio volumétrico al recalentamiento ASTM C113 5 hrs a 1400 °C (%)	0.0
Indice de la Resistencia a la Abrasión	0.3
Resistencia a la compresión ASTM C133 (MPa)	1434
Permeabilidad a 25 °C	0.0

5.2.4 Tipo de vidrio utilizado.

Como se mencionó anteriormente el tipo de vidrio a utilizar es el de sosa-cal. La composición química de este es la siguiente:

Compuesto	Porcentaje
SiO ₂	71.0
Na ₂ O+K ₂ O	14.0
CaO+MgO	13.5
Al ₂ O ₃	1.5

En cada prueba se utilizaron 100 gr de vidrio, el cual era cambiado para cada prueba.

5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Como se mencionó anteriormente los experimentos realizados tienen la finalidad de evaluar tanto la resistencia al desgaste de material cerámico como la eficiencia del sistema de pruebas de desgaste.

Se realizan cuatro pruebas de desgaste según la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Plan de pruebas de desgaste.

Prueba No.	Material	Temperatura (°C)	Velocidad (RPM)	Tiempo (hrs.)
1	Monofrax® CS-5	1100	250	12
2	Monofrax® CS-5	1100	250	24
3	Monofrax® CS-5	1100	250	36
4	Monofrax® CS-5	1100	250	48

5.3.1 Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental fue el siguiente:

1. Se enciende el horno y se establece la temperatura de operación de 1100 °C.
2. Se coloca el crisol de mulita dentro del horno, para que este, se caliente y la temperatura dentro de la cámara del horno se homogeneice a 1100 °C.
3. Una vez que la temperatura del horno es homogénea se colocan trozos de vidrio en el crisol. Estos trozos de vidrio se obtuvieron quebrando botellas de refresco, previamente lavadas. Se utilizaron sólo los trozos de vidrio que no estuviesen pintados.
4. Se coloca el sistema de sujeción de la muestra en el broquero del taladro de banco, cuidando que este bien alineado y no se produzca un movimiento de precesión, que provoque que el tubo de alúmina se rompa; o que la muestra del material refractario se suelte o que el vidrio se derrame del crisol y caiga en el fondo del horno afectando al termopar.
5. Se espera a que el vidrio se funda y la temperatura se estabilice. La probeta de cerámico se sumerge en el vidrio cuidando que no entre en contacto el tubo de alúmina con el vidrio fundido.
6. Una vez que la muestra esta sumergida en el vidrio fundido se enciende el taladro para que emplece a girar la probeta. De esta manera se simula el vidrio deslizándose sobre la superficie de los componentes cerámicos durante la descarga.

Los experimentos realizados se llevaron a cabo según se muestra en la tabla 5.6.

CAPITULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUCCION

Los resultados aquí reportados se presentan en dos secciones. La primera es sobre la evaluación del sistema de pruebas, la segunda sobre los resultados de desgaste del material seleccionado.

6.2 SISTEMA DE PRUEBAS DE DESGASTE.

Para el diseño del sistema de pruebas de desgaste se consideran los siguientes parámetros:

Material a ser probado:	Monofrax® CS-5
Vidrio fundido:	Tipo sosa-cal
Temperatura:	1100 °C
Velocidad:	5 m/s
Tiempo:	12, 24, 36 y 48 horas

a) Material a ser probado: Monofrax® CS-5. Este material se eligió debido a que ha sido reportado en la literatura [13] como un material con alta resistencia al choque térmico, resistencia a la corrosión por vidrio fundido y alta resistencia al desgaste.

b) Vidrio fundido: Vidrio tipo sosa-cal. Se determinó usar este tipo de vidrio ya que es el mismo que se usa para la fabricación de envases. El vidrio se obtuvo a partir de botellas para refresco. Las botellas fueron cuidadosamente

lavadas y fraccionadas a pequeños pedazos de aproximadamente 25 mm (1 pulgada). Se tomaron sólo pedazos de vidrio que no presentaron pintura. A fin de no contaminar el baño de vidrio fundido.

c) Temperatura. La temperatura a la cual la vela es formada, está en un rango de entre 1070 °C y 1130 °C dependiendo del tipo de envase a fabricar. Una temperatura promedio, y la más usada es de 1100 °C. Por lo que se decidió usar esta temperatura para las pruebas de desgaste.

d) Velocidad. La velocidad lineal de desplazamiento de vidrio fundido sobre el diámetro interior del chorreador varía según la botella a fabricar. Mediciones hechas por nosotros en una visita hecha a una planta, fueron de unos 0.42 m/seg para una maquina de doble orificio y producción de botellas estándares. Por lo anterior, se consideró que este es un valor medio estándar. Para obtener una prueba que presente un desgaste acelerado decidimos utilizar una velocidad lineal de un orden de magnitud más grande. La velocidad utilizada fue de 5 m/s.

e) Tiempo: 12, 24, 36 y 48 horas. Los resultados preliminares mostraron que con estos tiempos, se podían obtener curvas de desgaste contra tiempo de manera confiable.

Uno de los resultados más interesantes obtenidos en este trabajo fue el diseño, construcción, instrumentación y puesta en operación de un horno eléctrico de resistencias tipo crisol. El reto de lograr construir nuestro propio horno fue uno de los impulsos más fuertes no sólo de este trabajo sino de otros proyectos dentro del DIMAT (gracias a todos los colegas que cooperan en la construcción del horno!). Los resultados obtenidos por este horno sobrepasaron todas nuestras expectativas. El horno ha trabajado satisfactoriamente por más de 650 horas continuas.

Las dimensiones del horno son exactamente las que se requieren para las pruebas que se están realizando. La puerta superior facilita la introducción y nivelación de la probeta en su posición de prueba. Y sobre todo, la estabilidad térmica del horno es muy aceptable. Esto en primer lugar debido a un buen diseño de la configuración de los ladrillos, a la distribución de las resistencias eléctricas y en segundo a un muy buen aislamiento térmico.

Con el sistema de captación de temperaturas diseñado en el Dr. Rafael Colás se monitoreo la temperatura en la parte superior de la cámara del horno. Se encontró una diferencia de temperatura entre el termopar de control, ubicado en la parte inferior de la cámara y protegido con una cápsula de alúmina, y el termopar de monitoreo ubicada en la parte superior de la misma. Esta variación en la temperatura se fue disminuyendo con el tiempo hasta lograr una homogeneización en aproximadamente 100 minutos.

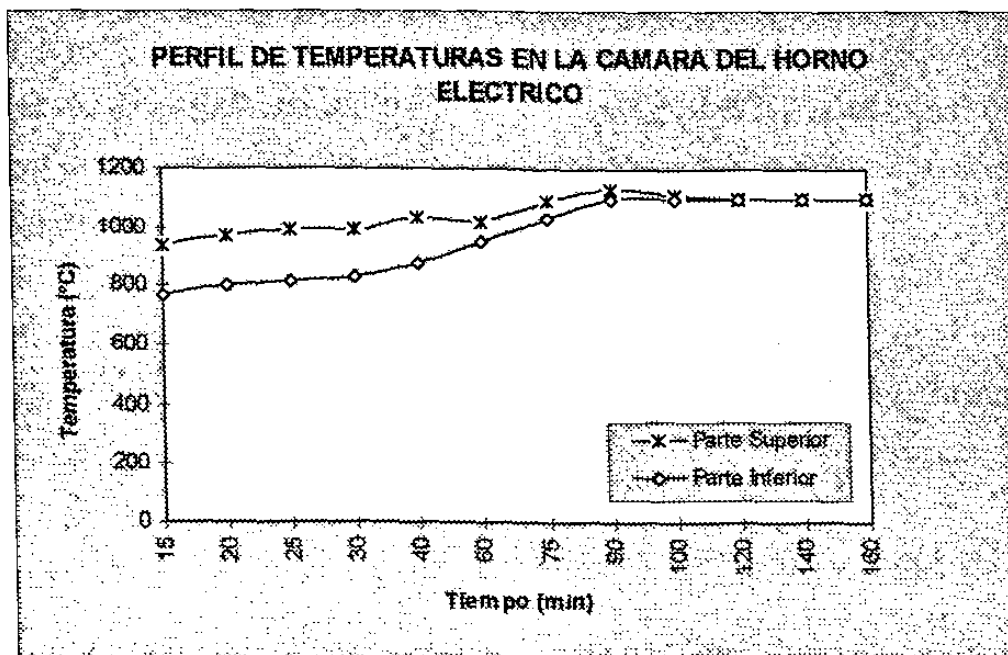


Figura 6.1.

Después de este tiempo no se detectó ninguna variación significativa (± 5 °C) entre las dos lecturas de los termopares. En la figura 6.1 se muestra una gráfica de estas temperaturas.

6.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DESGASTE.

Las probetas fueron dimensionadas y su peso determinado en una balanza analítica antes de cada prueba. La tabla 6.1 muestra las dimensiones y el peso de las probetas.

Tabla 6.1 Probetas de Material Cerámico.

Muestra No.	Peso (g)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
1	20.9	14.3	24.5
2	22.1	14.3	28.8
3	21.1	14.3	25.8
4	22.0	14.3	27.9

Después de cada prueba, las probetas presentaron una pequeña capa de vidrio adherido a la superficie. Sin embargo, fue posible visualizar un perfil de desgaste de la superficie en contacto con el vidrio fundido tal como se muestra en la figura 6.2.

Normalmente la pérdida de material por desgaste se realiza por diferencia en peso antes y después de la prueba. Este método podría conducirnos a datos incorrectos debido a la presencia de la capa de vidrio adherida a la probeta.

Con el fin de eliminar esta fuente de error, se decidió determinar la cantidad de vidrio adherida. Para esto, se determinó, por diferencia de diámetros, el espesor promedio de la capa de vidrio. Con este valor se generó un sólido en revolución alrededor del eje de la probeta para obtener el volumen de la capa de vidrio. Ver figura 6.3. El vidrio de sosa-cal utilizado en estas pruebas

tiene una densidad de 2.49 g/cm^3 . De esta forma el peso de la capa de vidrio presente en las probetas fue determinada. Este valor del peso del vidrio se presenta en la tabla 6.2.

Figura 6.2. Probetas con vidrio adherido a su superficie.

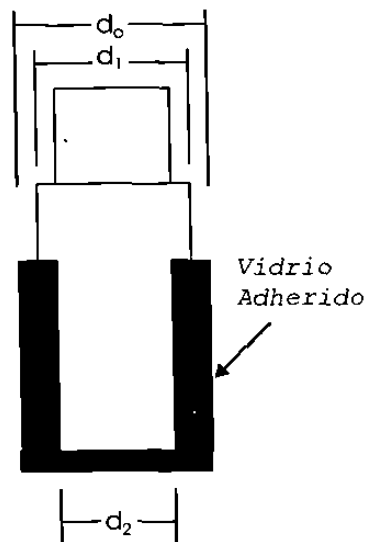


Figura 6.3. Representación esquemática de la sección transversal de una probeta con vidrio adherido a su superficie. El espesor de la capa de vidrio ha sido exagerada.

En esta misma tabla se encuentran los valores del peso inicial de la muestra, el peso después de la prueba y el peso calculado de la muestra después de la prueba. Finalmente se tabula el peso perdido por la muestra de material refractario. El método de cálculo del material perdido nos da un error no mayor a $\pm 5\%$.

Tabla 6.2.

Muestra	Tiempo (hrs)	Peso Original (g)	Peso Total (g)	Peso Vidrio (g)	Peso Real (g)	Peso Perdido (g)
1	48	20.9	20.3	0.46	19.84	1.06
2	36	22.1	21.6	0.54	21.06	1.04
3	24	21.1	20.7	0.50	20.20	0.90
4	12	22.0	22.4	0.55	21.85	0.15

Hay muchas maneras de reportar los valores de desgaste de un sistema tribológico. La manera de expresarlo esta normalmente en función de los parámetros que se fijan como constantes y de las variables del sistema. En este caso, en la figura 6.4 se representan el valor de desgaste, como pérdida en peso (gramos) contra el tiempo (horas) de duración de la prueba. En la figura 6.5 se muestra nuevamente el desgaste en pérdida en peso (gramos) contra la distancia deslizada (metros). En ambas curvas se aprecia que al incrementar el tiempo y/o la distancia deslizada se incrementa el valor de la pérdida en peso. Estas gráficas muestran los rangos del error estimado.

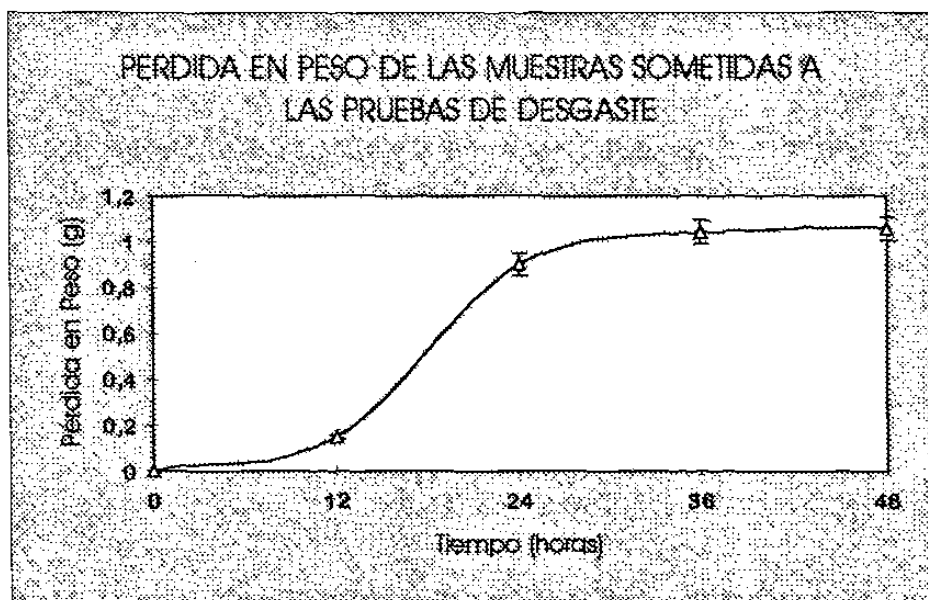


Figura 6.4.

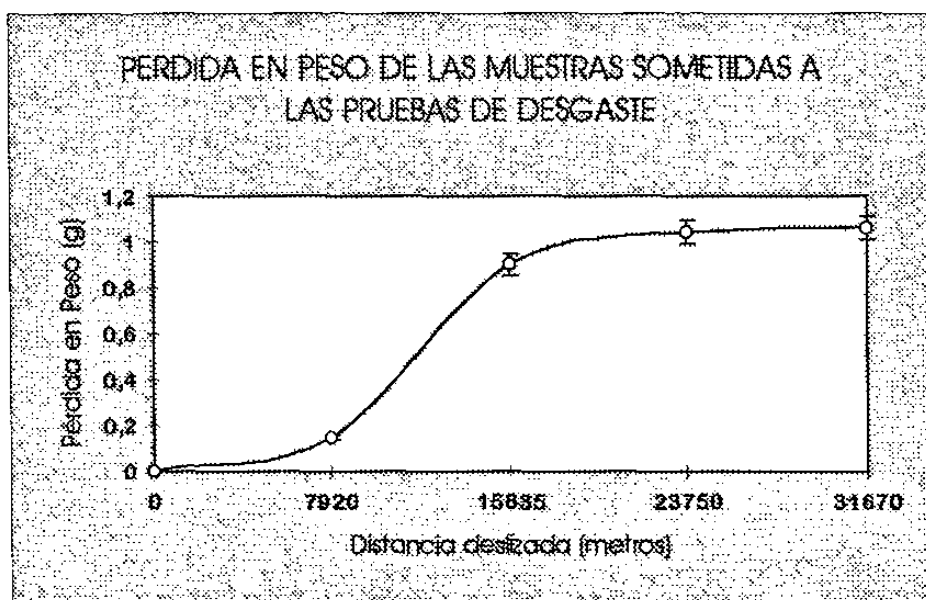


Figura 6.5.

La apariencia de la superficie gastada de las probetas muestra un desgaste de tipo abrasivo fino. No se encontró ninguna evidencia de desgaste corrosivo severo, aunque se requieren más análisis para determinar si hay reacción química entre el vidrio y el cerámico. Tampoco se encontró evidencia de desgaste abrasivo severo, erosivo, o por agrietamiento.

Desafortunadamente No se pudieron determinar las constantes de desgaste K , tal como propone Archard [23] debido a que la fuerza de contacto P entre las dos superficies en contacto es demasiado pequeño en nuestras pruebas. Como una alternativa a la constante K , se propuso el uso del factor de desgaste: peso perdido por unidad de tiempo o bien peso perdido por unidad de distancia deslizada, lo cual será discutido en el siguiente capítulo.

CAPITULO 7

DISCUSION

7.1 SISTEMA DE PRUEBAS DE DESGASTE.

En la ejecución de pruebas tribológicas en general de desgaste en particular, el investigador se encuentra a menudo con la incertidumbre de que si el sistema tribológico diseñado para las pruebas de laboratorio podrá modelar algunos para metros de operación encontrados en la vida real. La forma más sencilla dilucidar esto, es haciendo comparaciones directas entre los resultados de laboratorio y los resultados en planta. Sin embargo, como a menudo ocurre, no se cuenta con información del proceso industrial y/o es difícil su obtención. Aunado a esto, el material evaluado aquí es un material que se espera pueda substituir a los materiales existentes, de los cuales poca o nada de información existe. Así pues, muchas veces el investigador tiene que recurrir a comparaciones cualitativas más que cuantitativas. Este es el caso de esta investigación. La falta de datos sobre desgaste del proceso y materiales actuales, así como la poca información sobre este tema en la literatura especializada no nos han permitido hacer comparaciones directas.

Pese a todo lo anterior, consideramos que hemos diseñado un sistema de pruebas de desgaste de materiales cerámicos y refractarios a altas temperaturas, (en contacto con vidrio) el cual cumple satisfactoriamente con el objetivo principal de este trabajo, o sea, la evaluación de un material candidato a sustituir materiales convencionales.

En este diseño de pruebas se uso el número más alto de parámetros iguales a los del sistema real. El vidrio fundido es de tipo sosa-cal. La temperatura se fijó a 1100 °C ya que es una de las temperaturas más usadas en la fabricación de envases. Con esto sólo nos quedan tres parámetros independientes: El material a probar, que se seleccionó el CS-5. La velocidad relativa entre vidrio y cerámico. Y finalmente el tiempo de duración de las pruebas.

La revisión bibliográfica de diferentes materiales candidatos a sustituir los materiales convencionales nos llevó a sólo un material disponible, el Monofrax[®] CS-5. Así que sólo se realizaron pruebas en este material.

Para realizar una prueba acelerada decidimos que el parámetro a extrapolar fuera la velocidad de desplazamiento entre el vidrio fundido y la superficie del cerámico.

Como primer paso debimos analizar que velocidad se podría usar que fuese más alta que la usada en el proceso real, pero que no fuese tan alta que produjera un flujo turbulento dentro del baño de vidrio fundido. La velocidad medida en planta fue de 0.42 m/s. Por lo que decidimos que se usara una velocidad de alrededor de 4.2 m/s que es exactamente un orden de magnitud más grande que la velocidad real en planta. Lo anterior nos proporciona una prueba de vida acelerada sin llegar al flujo turbulento que se desea evitar ya que genera otros tipos de mecanismos de desgaste que no se presentan en el proceso industrial. Nuestras pruebas se realizaron a 5.0 m/s que fue la velocidad resultante de giro a 250 r.p.m.

En todas las nuestras pruebas no se detectó flujo turbulento lo que nos indica que la velocidad de 5.0 m/s es aceptable para nuestro sistema de prueba.

Finalmente, los tiempos de prueba se determinaron a 12, 24, 36 y 48 horas ya que con pruebas preliminares se obtuvieron niveles de desgaste cuantificables a estos tiempos.

El horno fabricado para este proyecto trabajó en forma muy satisfactoria. La estabilidad térmica quedó comprobada en la figura 6.1 donde después de 100 minutos, el termopar de control y el termopar de verificación, colocados en la parte inferior y superior del horno respectivamente, mostraron la misma medición de temperatura $\pm 5\%$.

7.2 RESULTADOS DE DESGASTE.

Los resultados de desgaste fueron mostrados en las figuras 6.4 y 6.5 como pérdida en peso (g) contra tiempo (horas) y contra distancia deslizada (metros), respectivamente. En ambos casos se observa que el peso perdido entre 12 horas o 7920 metros es de solo 0.15 gramos. Entre 12 y 24 horas (15835 metros) hay un marcado incremento en el peso perdido, pero a partir de 24 horas (15835 metros) el incremento en la pérdida en peso es casi imperceptible.

Ha sido ampliamente reportado que en pruebas de desgaste se encuentran dos estados [15]. El estado de asentamiento (running-in) y el estado estable (steady state). Normalmente el asentamiento toma lugar en las primeras horas de la prueba y esta caracterizado por un elevado desgaste.

En cambio el estado estable se presenta después del asentamiento y se caracteriza por bajos niveles de desgaste. A. Pérez [15] reportó un comportamiento similar en pruebas de desgaste en alúmina policristalina al 95% de pureza. En las figuras 6.4 y 6.5 se observa que el asentamiento toma lugar entre 0 y 24 horas (0-15835 metros) de la prueba. Después de 24 horas (15835

metros) aparece el estado estable y continua hasta las 48 horas (31670 metros). Este resultado es de importancia para el diseño de las piezas de material refractario a nivel industrial. Se puede predecir en que periodo de tiempo se presentan cada estado y una vez que el estado estable se ha establecido, se puede extrapolar a la vida útil de la pieza.

un aspecto importante que aparece en las figuras 6.4 y 6.5 es que la pérdida de peso a 12 horas (7920 metros) es muy bajo. Esta aparente contradicción con lo mencionado anteriormente se puede explicar debido al comportamiento de los materiales de la familia ZAC electrofundidos (ver sección 3.4.3). La alta resistencia a la corrosión del ZAC se debe a la morfología eutéctica de la microestructura, a la baja permeabilidad del material electrofundido y a la solución de alúmina en la superficie en contacto con el vidrio fundido.

La alúmina disuelta en el vidrio crea una capa viscosa sobre la superficie del refractario ZAC, el cual ya no puede ser penetrado por el vidrio fundido [18].

lo que se observa en las figuras 6.4 y 6.5 es que entre 0 y 12 horas no ha habido el suficiente tiempo para formar esta capa protectora rica en alúmina disuelta. Esta capa se forma entre 12 y 24 horas de prueba. El incremento en el peso perdido se debe a la solución de la alúmina del refractario para formar la capa protectora. Una vez que la capa protectora se ha formado, el valor de desgaste decrece de tal forma que casi es imperceptible el incremento de material perdido después de 24 horas.

La figura 7.1 muestra los valores del factor de desgaste (peso perdido/distancia deslizada) contra el tiempo de la prueba. Los motivos de representar los valores de desgaste de esta forma se deben a la homologación de resultados siguiendo la ley de Archard [23] donde el desgaste se representa

como material perdido contra unidad de longitud deslizada. La otra razón es la de ver gráficamente el comportamiento de las curvas de desgaste normalizado.

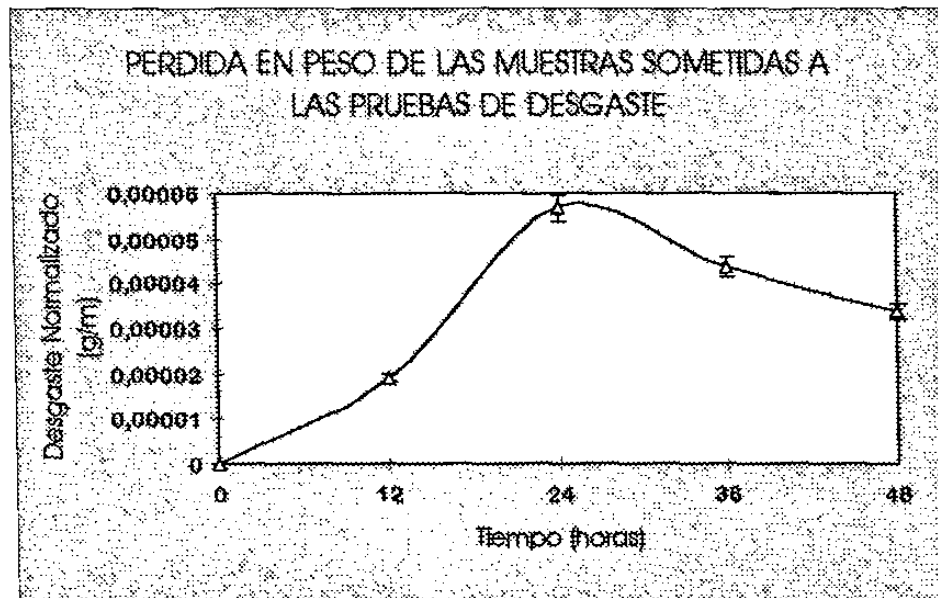


Figura 7.1

En otra figura se observa que entre 0 y 24 horas el factor de desgaste (g/m) se incrementa debido al estado de asentamiento. Después de 24 horas el factor de desgaste se reduce.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

1. Se diseñó un sistema de pruebas de desgaste para materiales refractarios en contacto con vidrio fundido a alta temperatura, el cual ha mostrado producir resultados acordes a lo esperado según las teorías de desgaste, y a lo reportado para materiales similares.

2. Se diseñó, fabricó, instrumentó y se puso en operación un horno eléctrico tipo crisol para realizar las pruebas de desgaste. La estabilidad térmica del horno ha sido muy satisfactoria.

3. El material analizado Monoflax CS-5 presentó un desgaste relativamente alto al principio de las pruebas. Este tipo de desgaste fué asociado con el estado de asentamiento. Una vez que el estado de desgaste estable se estableció, el desgaste disminuyó.

4. Este material forma una capa protectora de alúmina disuelta en la superficie. La formación de esta capa fué la causa de un relativamente alto factor de desgaste al principio de la prueba y explica el estado de asentamiento. Una vez que la capa protectora es formada, el rango de desgaste disminuye y se establece el estado de desgaste estable.

5. Este material puede ser usado como material alternativo para chorreadores convencionales o para nuevos diseños de chorreadores, tal como el prototipo que esta diseñándose en el DIMAT.

6. Para fines de diseño de chorreadores, es de mucha utilidad para la industria del vidrio conocer las gráficas de desgaste de este material. Una vez que se forma la capa protectora de alúmina disuelta se puede conocer el factor de desgaste y poder predecir la vida del chorreador.

CAPITULO 9

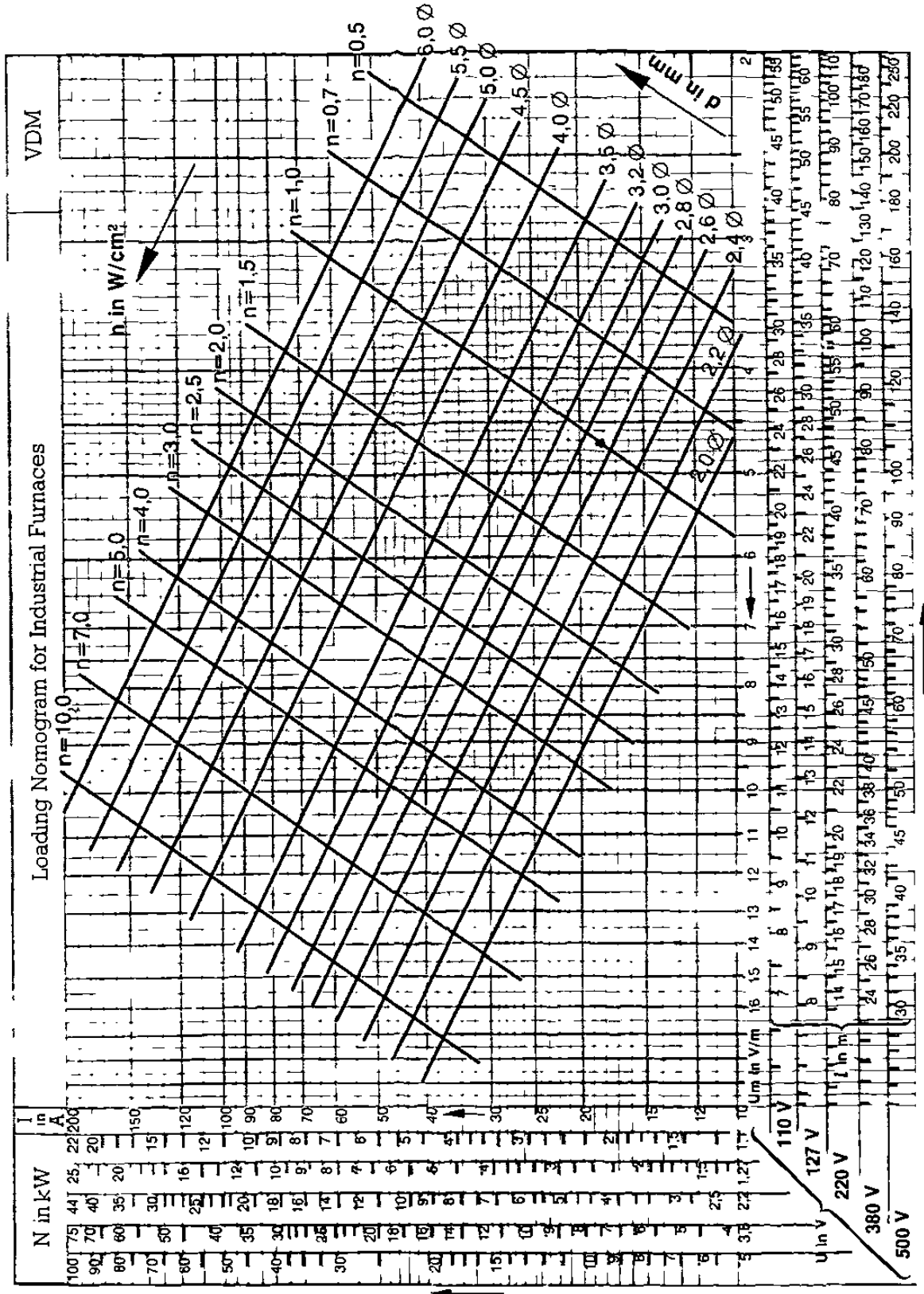
SUGERENCIAS PARA FUTURO TRABAJO

1. Realizar más pruebas de desgaste a diferentes temperaturas y a tiempos más largas.
2. Analizar la capa de vidrio que contiene alúmina disuelta formada en la superficie del refractario, con el fin de corroborar su composición, la reactividad con otros componentes estructurales del refractario y su adherencia.
3. Analizar a fondo la cinética de formación de esta capa protectora.

APENDICE

En la ingeniería eléctrica moderna las resistencias y los elementos calentadores son partes vitales para muchas aplicaciones y dispositivos. Los metales son principalmente utilizados para la manufactura de estos componentes; estos metales se clasifican como materiales para resistencias y elementos calentadores. Las principales características de estos materiales son su resistividad eléctrica, y su coeficiente de resistividad con la temperatura, temperatura máxima de trabajo permisible, y sus propiedades mecánicas. Además, para aplicaciones especiales, la resistencia a la corrosión y resistencia al creep.

Considerando todas estas propiedades físicas de los materiales utilizados para la fabricación de resistencias eléctricas además de las características deseadas del horno eléctrico (ver capítulo 5), en la tabla de la siguiente página se obtuvo el diametro adecuado de las resistencias eléctricas para la fabricación del horno.



REFERENCIAS

- [1] Donald L. Kinsey, Overview of traditional and advanced Glasses.
Ceramics and Glasses, ASM, 1991, p. 21-23
- [2] Harry H. Holscher, The glass primer.
Magazines for industry, 1972. p. 2-10
- [3] George S. Brady, Materials Handbook.
Mc. Graw-Hill, 1989, p. 354-360
- [4] Lawrence Van Vlack, Elements of Materials science and Engineering.
Addison Wesley, 1990, p. 116
- [5] Havis Dawson, Reportero Industrial.
Octubre 1994, p. 5-6
- [6] W. D. Kingery, Introduction to Ceramics.
John Wiley & Sons, 1976, p. 10-15
- [7] A.G. Evans, Journal of American Ceramic Society.
65: 127, 1982
- [8] D.W. Richerson, Modern Ceramic Engineering properties, using, and design.
Marcel Dekker, 1990, p. 120-135
- [9] W. D. Kingery, Introduction to Ceramics.
John Wiley & Sons, 1976, p. 10-15

- [10] M. Gardiol, High zirconia fused-cast refractories: A solution to defect and corrosion problems in special glasses.
Ceramic Engineering Science Procedure. 12 [3-4], 1991, 496-517
- [11] M. Gardiol All-Electric Fused-cast AZS chrome-bearing refractory materials for all electric furnaces.
Ceramic Engineering Science Procedure. 11 [3-5], 1991, 330-339
- [12] Edward R. Begley, Throat construction: A review of design, refractory and cooling alternatives.
Ceramic Engineering Science Procedure. 12 [3-4], 1991, 482-495
- [13] William E. Lee, Ceramic Microstructures.
Chapman & Hall. 1994, p. 506-508
- [14] Department of education and science. Lubrication (tribology) education and research. A report on the present position and industry's needs.
Department of education and science, H.M. stationary office, london UK, 1966.
- [15] A. Pérez. Wear resistance of pearlitic rail steels.
(Tesis) University of Leicester, 1992.
- [16] S. Jahanmir. On the wear mechanisms and the wear equations.
Fundamentals of Tribology, 1981, p. 455-468
- [17] F.T. Barwell. Wear of machine elements.
Fundamentals of Tribology, 1981, p. 401-440

- [18] Standard terminology relating to wear and erosion, annual book of standards.
Vol 03.02, ASTM, 1987, p. 243-250

- [19] G.W. Stachowiak. Engineering tribology.
Elsevier, 1993, p. 637-640

- [20] E.M. Tren, Metal Cutting.
Butterworths, 1997

- [21] K.H. Zum Gahr. Microstructure and wear of materials.
Tribology series No. 10. Elsevier, Amsterdam, 1987.

- [22] T.S. Busy. The development of a rotating corrosion test for glass contact refractories.
Glass technology Vol. 22 No. 1. February 1981.

- [23] J.F. Archard and W. Hirst. The wear of metals under unlubricated conditions.
Proc. R. Soc., A236, 1956, p. 397-410.

