

14 *20* *Fel*
20 *20*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

**"EL VIDRIO Y SU UTILIZACION EN LA INDUSTRIA
QUIMICA"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R A Q U I M I C A
P R E S E N T A :
MARIA SANDRA VAZQUEZ ANGELES

ASESOR: IOM. RAFAEL SAMPERE MORALES.

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1998.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

260658



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

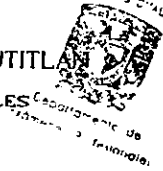
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

ATN: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la tesis:

" El vidrio y su utilización en la industria química "

que presenta la pasante: María Sandra Vázquez Angeles.
con número de cuenta: 8958743-4 para obtener el TITULO de:
Ingeniera química.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 14 de Octubre de 1997

PRESIDENTE Q. Jesús Fernández Madrigal

VOCAL I.Q.M. Rafael Sampere Morales

SECRETARIO I.Q. Ana Leticia Fernández

1er. SUPLENTE Q. Ocelia Vega Vázquez

2do. SUPLENTE I.Q. Gilberto A. Anaya Ventura.

[Firma de Jesús Fernández Madrigal]
[Firma de Rafael Sampere Morales]
[Firma de Ana Leticia Fernández]
[Firma de Ocelia Vega Vázquez]
[Firma de Gilberto A. Anaya Ventura]

DEDICATORIAS.

A Dios, cuya infinita bondad me permite existir.

A mi padre el Sr. Reyes Vázquez Cruz, por reconfortar mi alma con su cálida sonrisa, su cariño y comprensión.

A mi madre la Sra. Virginia Angeles Hernández, por enseñarme a no desistir de mis objetivos, por ser la fuerza invisible que mantiene unida a la familia.

A mis hermanos y amigos, por su apoyo incondicional, su afecto y compañerismo.

A los ingenieros: Rafael Sampere, Everardo Solano, Raúl Conde y Eva Bonilla, por su ayuda, su confianza, pero sobre todo por su amistad.

Sinceramente:

Sandra Vázquez A.

OBJETIVOS GENERALES.

A).-Proporcionar los elementos necesarios que permitan a la gente interesada en el tema, adquirir un conocimiento general acerca de la naturaleza, estructura, propiedades y usos del vidrio.

B).-Conocer las principales aplicaciones que tiene el vidrio dentro de la industria química.

INDICE.

PAGINA.

INTRODUCCION	3
I.- LOS MATERIALES EN INGENIERIA.	
1.1. Enlace químico.	5
1.2. Estructura de los materiales.	10
1.3. Determinación de la estructura cristalina: difracción de rayos X.	12
1.4. Transformaciones alotrópicas.	12
1.5. Clasificación de los materiales en ingeniería.	13
II.- EL VIDRIO.	
2.1. Breve historia sobre el vidrio.	16
2.2. Definición.	18
2.3. Formación.	19
2.4. Estructura.	24
2.5. Pruebas de la existencia de una red construída al azar.	25
2.6. Diversas estructuras vitreas.	26
2.7. El vidrio como líquido sobreenfriado.	34
2.8. Cristalización o desvitrificación.	36
III.- TIPOS DE VIDRIOS.	
3.1. Vidrios de silicato.	40
3.2. Vidrios especiales de silicato.	44
3.3. Vidrios cerámicos.	47
3.4. Vidrios metálicos.	50
3.5. Fabricación del vidrio.	51
3.6. Viscosidad.	55
3.7. Temperatura de transición del vidrio.	59
IV.- PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL VIDRIO.	
4.1. Propiedades mecánicas.	62
4.2. Endurecimiento del vidrio.	65
4.3. Propiedades térmicas.	68
4.4. Propiedades ópticas.	71
4.5. Resistencia al ataque químico.	74
4.6. Reacciones químicas.	75

V.- UTENSILIOS DE LABORATORIO.

5.1. Recipientes volumétricos.	82
5.2. Llaves de paso.	83
5.3. Tuberías.	84
5.4. Utensilios esmeritados.	84
5.5. Recipientes porosos.	86
5.6. Termómetros.	87
5.7. Composición del vidrio utilizado en la fabricación de utensilios de vidrio.	89

VI.- ENVASES DE VIDRIO.

6.1. Historia.	91
6.2. Necesidad de un envase de vidrio.	92
6.3. Tipos de envases.	93
6.4. Composición del vidrio para envases.	94
6.5. Proceso de fabricación de un envase.	94
6.6. Pruebas para envases de vidrio.	96

VII.- ESMALTES VÍTREOS.

7.1. Definición.	106
7.2. Historia.	106
7.3. Clasificación.	107
7.4. Constitución.	108
7.5. Composición y estructura.	109
7.6. Propiedades.	110
7.7. Proceso de esmaltado.	112
7.8. Usos.	115
7.9. Revestimientos vítreos contra revestimientos orgánicos.	115

VIII.- APLICACIONES GENERALES DEL VIDRIO EN LA INDUSTRIA QUIMICA.

8.1. Ventajas que ofrece el vidrio para su uso en la industria química.	118
8.2. Tubería de vidrio.	119
8.3. Intercambiadores de calor.	120
8.4. Transferencia de calor a través de vidrio.	122
8.5. Torres.	124
8.6. Bombas.	125
8.7. Instrumentos de medición.	125

IX.- CONCLUSIONES.

X.- BIBLIOGRAFIA.

RESUMEN GENERAL.

Capítulo I .- Se establece la clasificación de los materiales en ingeniería en cuatro grupos: metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos, de acuerdo a sus propiedades.

Dicha clasificación se justifica en función de la naturaleza de los elementos que los forman, del tipo de enlace que los une y el arreglo o disposición atómica que tengan.

Capítulo II .- Se ubica al vidrio como uno de los materiales más antiguos en la historia de la humanidad, tanto que no es posible precisar con certeza la fecha de su descubrimiento, se comenta su naturaleza de líquido cuya alta viscosidad le permite ser considerado un sólido para propósitos prácticos, se mencionan además los diversos métodos para su formación, así como las características que deben tener los materiales para ser llevados a su forma vítrea. Se discuten también las teorías propuestas para describir su estructura de material amorfo.

Capítulo III .- Se proporciona una clasificación de los diferentes vidrios de acuerdo a su composición química, ahondando en los vidrios de silicato, los cuales presentan la mayoría a nivel comercial, también se describen los vidrios de reciente desarrollo como son las cerámicas vítreas y vidrios de aleaciones metálicas.

Capítulo IV .- Se intenta presentar un resumen lo más completo posible acerca de las propiedades físicas y químicas del vidrio, las cuales son comparables a las de los materiales cristalinos, pero con un comportamiento único, el cual impone límites y ventajas al utilizarlo como material de ingeniería.

Capítulo V .- El vidrio es famoso desde hace mucho tiempo por su extraordinaria resistencia al ataque de casi todos los compuestos químicos, de ahí el uso tan extenso de este material en los laboratorios de química y biología. Como resultado de su estabilidad se tiene una línea de utensilios de vidrio de formas clásicas y medidas normalizadas para diversos usos en el laboratorio, dichos utensilios se describen en este capítulo.

Capítulo VI .- Aunque en la actualidad existe una gran variedad de materiales destinados a la elaboración de envases, el vidrio sigue siendo uno de los más importantes debido al conjunto de propiedades que ofrece a los productos envasados en él, por lo que se hace una revisión de los tipos de envases hechos de vidrio y los requisitos que deben cumplir para el proceso de envasado.

Capítulo VII .- En este capítulo se describe la composición, clasificación, ventajas y usos del esmalte vítreo como un revestimiento protector y decorativo.

Capítulo VIII .- Se hace una revisión sobre las ventajas en el uso del vidrio dentro de la industria química y se menciona algunos elementos de vidrio utilizados en procesos químicos como son columnas, bombas, intercambiadores de calor e instrumentos de medición.

INTRODUCCION.

Todos los ingenieros manejan cotidianamente los materiales, éstos se manufacturan y procesan; con ellos se diseñan y construyen componentes o estructuras, se seleccionan y analizan sus fallas o simplemente se preve su adecuado funcionamiento.

Por ello es necesario que los ingenieros tengan conocimiento de los diferentes tipos de materiales con los que trabaja , que conozca la estructura que los lleva a presentar propiedades características, que comprenda sus limitaciones y ventajas para que pueda llevar a cabo una selección acertada de ellos.

La información acerca de algunos grupos de materiales como son los polímeros y metales ha sido ampliamente difundida, ya sea por las ventajas que ofrecen, o bien porque como en el caso de los metales se les considera los materiales típicos de la ingeniería.

Así, dentro del grupo de materiales cerámicos, se encuentra el vidrio, el cual reviste una gran importancia para el área de la industria química, y aún cuando es conocido desde hace miles de años y utilizado cotidianamente, poco se ha difundido acerca de su naturaleza, estructura, factores que lo afectan, la enorme gama de aplicaciones que tiene, así como las propiedades que lo convierten en un material insustituible para los procesos químicos.

Por lo anterior en el presente trabajo de tesis se busca proporcionar los elementos que permitan adquirir un conocimiento general del vidrio y sus principales aplicaciones en la industria química, ya que este material ha mantenido su importancia , aún con la presencia de nuevos materiales, dada su versatilidad en su utilización parece estar asegurada en un futuro próximo.

CAPITULO I
LOS MATERIALES EN LA INGENIERÍA

I.- LOS MATERIALES EN INGENIERIA QUIMICA.

1.1 ENLACE QUIMICO.

El tipo de enlace entre los átomos y grupos de átomos es muy importante en la clasificación de los materiales de ingeniería, ya que las diferencias existentes entre las propiedades de cada uno de ellos tienen su origen en las diferencias básicas que hay en el enlace químico.

Ahora bien, existen cuatro mecanismos por medio de los cuales se enlazan o unen los átomos, y en tres de ellos la unión se lleva a cabo cuando los átomos llenan sus niveles externos s y p.

A continuación se mencionarán en forma sencilla los tipos de enlace y cómo conducen a las diferencias en las propiedades de los materiales.

1).-ENLACE METALICO. Una característica común a los elementos metálicos es que tienen valencias bajas, es decir presentan solamente uno, dos y tres electrones en su último nivel de energía, ésto es la clave para la formación del enlace metálico, porque ceden sus electrones para formar una nube de electrones con ellos, la cual rodea a los átomos del elemento; por ejemplo: un átomo de Aluminio cede sus tres electrones de valencia cuando se une a otro átomo de aluminio, dejando un cuerpo central positivo; los electrones de valencia ya no están asociados a ningún átomo en particular, se mueven libremente en la nube de electrones y se unen a los centros positivos, éstos se mantienen unidos por atracción mutua hacia el electrón produciendo de ésta forma la fuerte unión metálica.

Es importante mencionar que los enlaces metálicos no son "direccionales" es decir, los electrones que mantienen ligados a los átomos no están fijos en una posición, por ello cuando se dobla un metal, los átomos intentan cambiar la relación entre ellos, la dirección del enlace simplemente se desliza en lugar de romperse, ésto explica la ductilidad o capacidad de deformarse sin fractura de los metales.

electrónica se moverán con gran facilidad y constituyen una corriente que fluye si el circuito no está interrumpido.

El comportamiento metálico se encuentra principalmente en los elementos de los grupos I y II A, y los elementos de los grupos III, IV y V B.

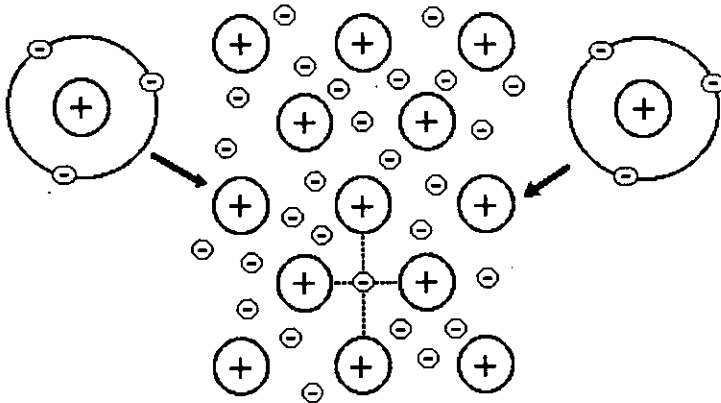


Fig. 1. Enlace metálico.

2). **-ENLACE COVALENTE** .Presente en muchos materiales cerámicos y poliméricos. En este tipo de enlace los electrones están firmemente sostenidos y son compartidos en forma equitativa por los átomos participantes. Por ejemplo: un átomo de silicio, que tiene valencia cuatro, completa ocho electrones en su capa externa cuando comparte sus electrones con otros cuatro átomos vecinos. Cada punto de unión que se comparte representa un enlace covalente, de modo que cada átomo de Silicio está unido a cuatro átomos vecinos por medio de cuatro enlaces covalentes.

Para formar las uniones covalentes los átomos de Silicio deben acomodarse de manera que los enlaces tengan una relación " direccional" , fija entre ellos. En el caso del silicio lo anterior produce un tetraedro, con ángulos de 109° aproximadamente entre los enlaces covalentes.

Como las uniones covalentes son muy fuertes, los materiales así enlazados tienen poca ductilidad y escasa conductividad eléctrica, por ello cuando se dobla una barra de silicio, los enlaces se rompen porque los átomos de este elemento van a cambiar permanentemente su relación, de la misma manera para que un electrón se mueva y forme una corriente eléctrica el enlace deberá romperse para liberar al electrón, requiriéndose temperaturas muy altas o voltajes muy elevados.

De esta manera los materiales formados por enlaces covalentes son frágiles en vez de dúctiles, comportándose como aislantes eléctricos y no como conductores, muchos materiales cerámicos y poliméricos están completa o parcialmente unidos por enlaces covalentes, lo que explica el porque el vidrio se rompe cuando es golpeado y por que los ladrillos son buenos aislantes del calor y la electricidad.

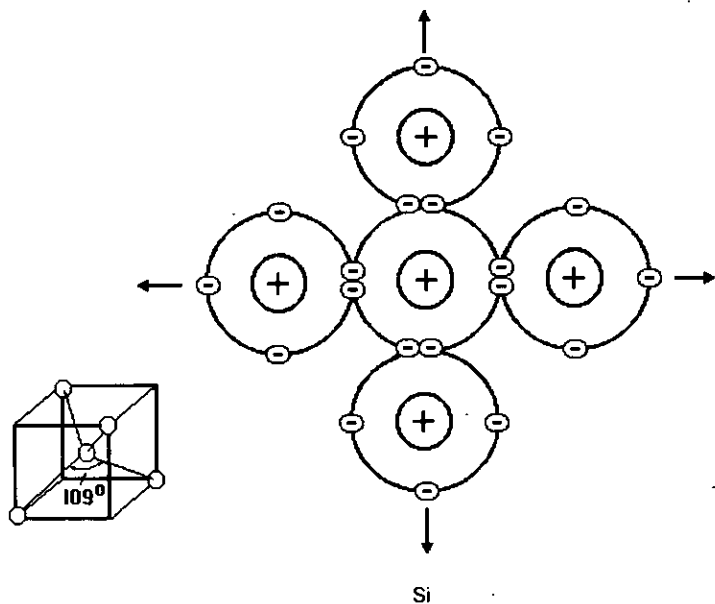


Fig. 2. Enlace Covalente.

3).-**ENLACE IONICO.** Este tipo de unión ocurre entre elementos metálicos y no metálicos, químicamente sabemos que los elementos no metálicos contienen un mayor número de electrones en su nivel exterior que en caso de un elemento metálico, por lo que al unirse habrá pérdida y ganancia de electrones, por ejemplo, la capa externa de un átomo de cloro tiene siete electrones y existe una fuerza muy grande para atraer un electrón y formar así un elemento estable de ocho electrones, cuando reacciona el Sodio, el cual cuenta con un electrón en su capa externa, lo cede para formar una capa exterior estable con el Cloro, ambos tienen ahora un nivel energético externo lleno o vacío, por lo tanto han adquirido carga eléctrica, comportándose como IONES. El átomo que cede los electrones adquiere una carga neta positiva (catión), en tanto el átomo que acepta los electrones adquiere una carga neta negativa (anión), los iones con cargas opuestas se atraen mutuamente produciendo la unión iónica, sin embargo cuando se aplica una fuerza a un cristal de Cloruro de Sodio, se rompe el equilibrio eléctrico entre los iones., por ello los materiales unidos iónicamente se comportan como frágiles. La conductividad eléctrica del sólido es menor en varios órdenes de magnitud que la de los metales, debido a que los electrones no están libres en una nube de electrones, sino firmemente sostenidos en su lugar, y la carga eléctrica debe ser transferida por el movimiento de iones enteros, los cuales no se desplazan tan fácilmente como los electrones.

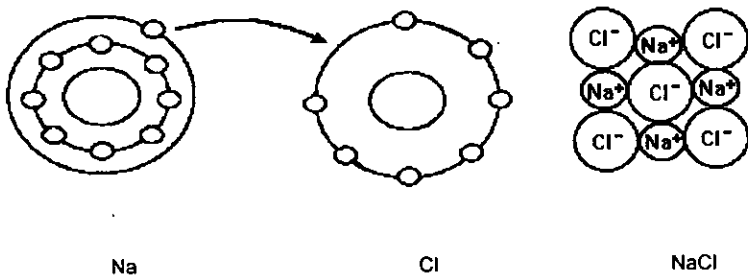


Fig. 3. Enlace Iónico.

Muchos materiales cerámicos y minerales están unidos, al menos en parte, por enlaces iónicos, de hecho, en todos los materiales, incluso los metales, se unen mediante una combinación de los tres mecanismos primarios de enlace atómico. Por ejemplo aunque el hierro está principalmente unido por enlaces metálicos, también interviene la unión covalente entre sus átomos y el silicio, unido principalmente por enlaces covalentes tiene también algunas características de los enlaces metálicos y iónicos.

4).-ENLACES DE VAN DER WAALS. Los enlaces de Van der Waals unen moléculas o grupos de átomos mediante atracciones electrostáticas débiles. Muchos plásticos, cerámicos, micas, el agua y otras moléculas están permanente o instantáneamente " polarizadas", esto es, una porción de la molécula tiende a adquirir una carga positiva, mientras otra porción de la misma molécula está cargada negativamente. La atracción electrostática entre las regiones positivas de una molécula y las regiones negativas de una segunda molécula unen débilmente a las dos. El enlace de Van der Waals es un enlace débil entre átomos o moléculas polarizadas instantáneamente. Es una unión secundaria, pero los átomos dentro de la molécula o grupos de átomos, están unidos por fuertes enlaces covalentes o iónicos. Las uniones de Van der Waals modifican radicalmente las propiedades de los materiales. Puesto que por lo común los polímeros tienen uniones covalentes podríamos esperar que el cloruro de polivinilo (PVC) fuera muy frágil, sin embargo contiene muchas y largas moléculas encadenadas. Dentro de cada cadena la unión es covalente, pero las cadenas individuales se unen por enlaces de Van der Waals, de modo que el cloruro de polivinilo puede ser deformado de manera significativa rompiendo solamente las uniones de Van der Waals y haciendo deslizar las cadenas unas sobre otras.

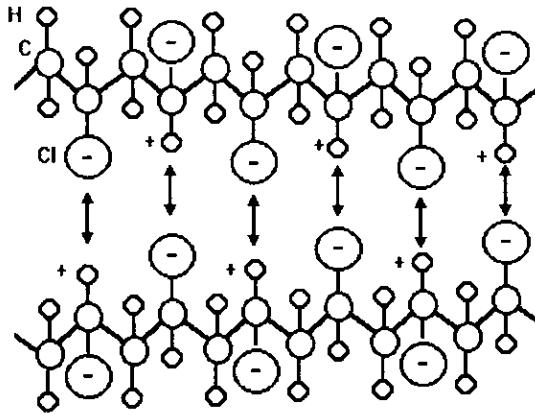


Fig. 4. Enlaces de Van der Waals.

1.2.- ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES.

CELDA UNITARIAS. El arreglo o disposición de los átomos determina la microestructura y el comportamiento de un material. Por ejemplo en los metales el ordenamiento atómico permite una excelente ductilidad, en tanto en otros materiales como en los cerámicos produce fragilidad y en los polímeros como el caucho, el polietileno y al epóxido le confiere propiedades elásticas

Los átomos son la unidad fundamental de toda estructura, sin embargo resultaría difícil describir la organización de varios millones de átomos (10^{10} millones), que constituyen un grano de material. Resulta más sencillo describir una unidad básica en la estructura de los materiales: la Celda Unitaria, la cual se puede definir como la menor división de una red que mantiene las características de ésta. Se consideran catorce tipos de celdas unitarias o redes de Bravais, agrupadas en siete estructuras cristalinas. Los puntos reticulares están en las esquinas de las celdas unitarias, y en algunos casos en el centro de cada una de las caras o de toda la celda, como se observa en la siguiente figura:

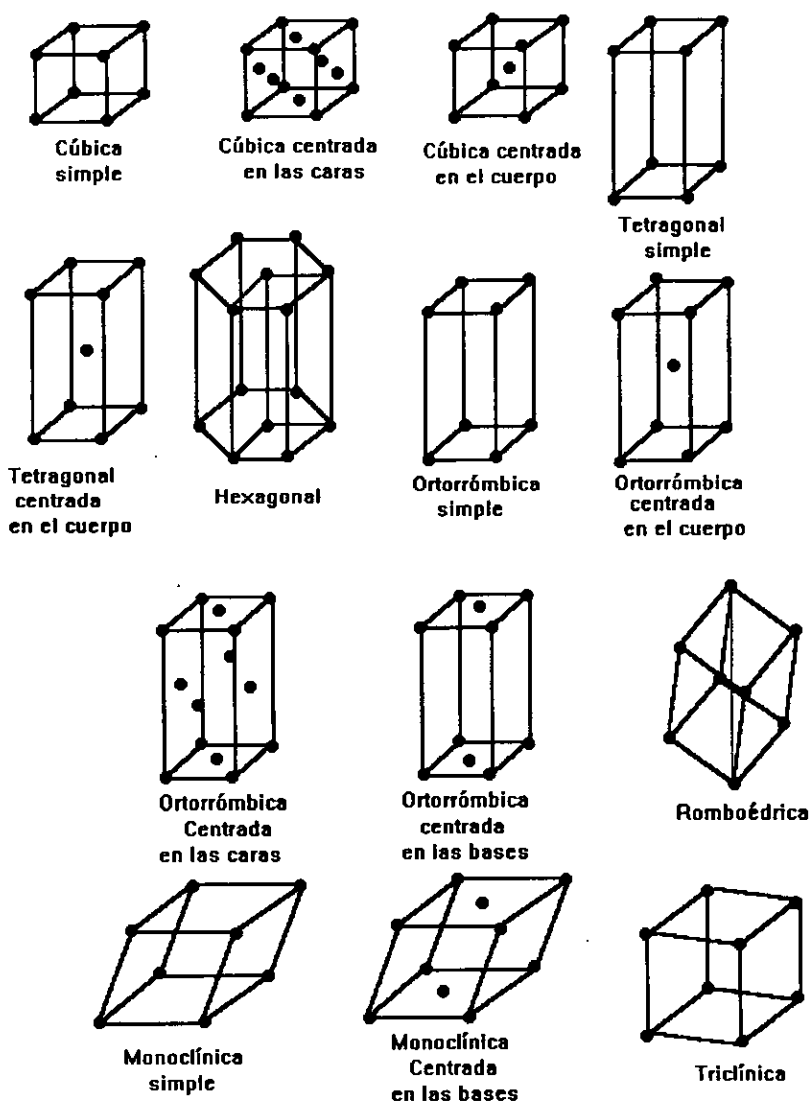


Fig. 5. Celdas Unitarias.

En la mayoría de los metales se localiza un átomo en cada punto de la red, de modo que el número de átomos es igual al número de puntos reticulares. Las estructuras de las celdas unitarias, cúbica centrada en las caras (CCC), cúbica centrada en el cuerpo (CC) y hexagonal compacta (HC), con átomos por punto de red, son características de los metales, estructuras más complicadas se encuentran en cerámicos y materiales compuestos, donde muchos y aún cientos de átomos pueden estar asociados en cada punto de la red, formando celdas unitarias muy complejas.

1.3. DETERMINACION DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA: DIFRACCION DE RAYOS X.

Las características de las diferentes celdas unitarias se han determinado mediante el uso de rayos X, los cuales se utilizan en la microsonda electrónica, para determinar la microestructura y para identificar materiales desconocidos. El método de difracción de rayos X no mide directamente las posiciones de los átomos individuales, mide las distancias entre los planos de átomos.

La técnica de difracción de los rayos X consiste en hacer incidir sobre una muestra en forma de polvo del material un haz de rayos X de longitud de onda conocida. El haz de rayos X se difracta a un ángulo específico en relación con el haz incidente, de acuerdo con la ley de Bragg:

$$\lambda = 2d \text{ Sen } \theta.$$

Donde λ es la longitud de onda conocida, θ es el ángulo de difracción y d la distancia interplanar. Si se fija la longitud de onda, los átomos en un plano en particular ocasionan que los rayos X se difracten en un ángulo en especial. El haz difractado de rayos X intercepta e impresiona una película fotográfica que rodea a la muestra. Analizando la película y calculando el ángulo 2θ , se puede determinar la distancia interplanar y con ello la microestructura que presenta el material.

1.4 TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS.

Los materiales que tienen más de una estructura cristalina se denominan alotrópicos, por ejemplo el hierro y el titanio presentan más de una estructura cristalina. A temperaturas bajas el

Hierro tiene estructura CC , pero a temperaturas mayores el hierro se transforma en una estructura CCC. La alotropía proporciona la base para los tratamientos térmicos del hierro y titanio.

La sílice, bajo condiciones de equilibrio y presión atmosférica se encuentra en tres formas alotrópicas : cuarzo, tridimita y cristobalita; todas constituidas por tetraedros SiO_4 ordenados de diferentes forma.

Existe un cambio brusco en las dimensiones del cristal cerámico durante las transformaciones de fase; grandes esfuerzos e incluso agrietamiento, acompañan a estos cambios volumétricos en la sílice. Los cambios de fase son en extremo lentos debido a la alta viscosidad que presenta. Si la sílice se enfría rápidamente no se obtiene una forma cristalina sino un *vidrio* .

1.5 .CLASIFICACION DE LOS MATERIALES EN INGENIERIA.

Todos los ingenieros manejan cotidianamente los materiales, dichas sustancias se manufacturan y procesan, con ellas se diseñan y construyen componentes o estructuras, se seleccionan y se analizan sus fallas, con el fin de preveer su adecuado funcionamiento.

Los materiales en ingeniería se clasifican en cuatro grupos según su uso : metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos.

1).- METALES: En éste grupo se encuentran ubicados los metales y aleaciones metálicas (Acero, Aluminio, Magnesio, Zinc, Hierro fundido, Titanio, Cobre, Níquel entre otros), dicho grupo se caracteriza por una buena conductividad térmica y eléctrica, alta resistencia mecánica y al impacto, rigidez y ductilidad, son especialmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga, se emplean en forma de aleaciones, que se fabrican para mejorar ciertas propiedades mecánicas y químicas.

2).- POLIMEROS : En el grupo se incluye al caucho (o hule), los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Se producen generando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas del petróleo o productos agrícolas, en un proceso conocido como polimerización. Los polímeros tienen baja conductividad eléctrica y térmica, escasa resistencia mecánica y no se recomiendan para aplicaciones en temperaturas elevadas, sin embargo algunos polímeros (termoplásticos) presentan buena ductilidad, conformabilidad y resistencia al

impacto. Los polímeros son ligeros y normalmente cuentan con una excelente resistencia a la corrosión.

3).- CERAMICOS: Los materiales cerámicos, como los ladrillos, el *vidrio*, la loza, los aislantes y los abrasivos, tienen escasa conductividad eléctrica y térmica, aunque pueden tener buena resistencia y dureza, no son dúctiles, ni resistentes al impacto. Por lo anterior son menos usados que los metales en aplicaciones estructurales. No obstante, presentan en su mayoría una excelente resistencia a las altas temperaturas y a ciertas condiciones de corrosión, más aún, muchos tienen propiedades ópticas y térmicas excepcionales, como el vidrio el cual es motivo del presente trabajo.

4).- MATERIALES COMPUESTOS. : Como su nombre lo indica están constituidos por dos o más materiales, cuya combinación genera propiedades no obtenibles mediante un sólo tipo de material.

Con los materiales compuestos se logran otros más ligeros, resistentes o dúctiles, que podrían obtenerse de otra manera. Por ejemplo: la fibra de vidrio es un material compuesto que contiene fibras de vidrio rígidas, resistentes, en una matriz polimérica más blanda. ^(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

CAPITULO II
EL VIDRIO

II.-EL VIDRIO.

2.1 BREVE HISTORIA SOBRE EL VIDRIO.

El vidrio ha sido utilizado por el hombre desde los tiempos más antiguos, tanto es así que el origen de su descubrimiento se ha perdido en las páginas de la historia. Antes de que el hombre fuera capaz de fabricarlo, ya lo utilizaba para elaborar con él puntas de flecha y otros utensilios rudimentarios, valiéndose del vidrio de origen volcánico conocido como obsidiana de color negro, rojo, castaño y translúcido, dependiendo de su contenido de impurezas. (27)

La elaboración del vidrio está vinculada con el fuego, por ello quizá los primeros vidrios se produjeron accidentalmente por la fusión de la arena con la sosa en una playa abierta, como lo relata Plinio, o tal vez, por la fusión natural de arena y cenizas a consecuencia del incendio provocado por un rayo; de lo que se ha podido demostrar hasta el día de hoy, es que, el primer vidrio fundido apareció en Egipto en el año 7000 A.C. y de hallazgos recientes se sabe que comenzó fundiéndose dentro de lingoteras en vasijas cilíndricas. (28)

De los Egipcios probablemente, el vidrio pasó a Asia, en donde se han encontrado tablas con escritura cuneiforme, que ya traducidas, proporcionan los nombres de diversos tipos de vidrio, sus formulaciones y las instrucciones para su fabricación.

Durante muchos siglos el vidrio fue utilizado exclusivamente en la elaboración de ornamentos y joyería, ya que debido a la dificultad de su manufactura, se consideraba de igual valor que las gemas naturales. Posteriormente éste fue procesado en vasijas, copas y escudos.

En los primeros siglos de la era Cristiana, la estabilidad comercial del Imperio Romano facilitó el desarrollo de la fabricación y uso de utensilios de vidrio que se amplió considerablemente, debido en gran parte a la invención de la caña para el vidrio soplado, de esta manera la manufactura del material floreció en todos los países conquistados por Roma.

Los vidrieros de esta época fueron maestros en casi todos los procesos técnicos de la fabricación y decoración del vidrio, logrando desde una gran variedad de utensilios, hasta vidrio

para ventana de buena calidad. Pompeya destruida (79 D.C.) muestra los vestigios de los avances logrados en esta época.

A la caída del Imperio Romano, el vidrio fabricado en occidente fué llevado a lugares apartados, y su arte continuado en Bizancio, cuando en el año 330 D.C, el emperador Constantino mudó a los artesanos del vidrio a Constantinopla. Los artesanos de Bizancio desarrollaron vidrio de diferentes colores, haciendo su aparición en este período (969 - 988) los vitrales con representaciones bíblicas.

Después de las cruzadas, el centro de fabricación del vidrio fué llevado a Venecia para su resurgimiento, por los años 1300.

En esta ciudad se perfeccionó el vidrio, obteniéndose por primera vez un material absolutamente incoloro, transparente , capaz de ser soplado a finuras extremas y trabajado en casi todas las formas, al que le dieron el nombre de "Cristello" (siglo XVI). De Venecia el vidrio pasó a toda Europa, en donde se convirtió de un lujo a una necesidad

Sin embargo, todos los avances obtenidos hasta antes de 1900, acerca del vidrio, fueron hechos empíricamente, utilizando el sentido común y la práctica como guía de experimentación y de trabajo.

La aplicación de bases científicas al perfeccionamiento en la elaboración y usos del vidrio ha ocurrido en las últimas décadas del siglo XX, con el advenimiento de una revolución mecánica, así como el establecimiento de la investigación científica en la industria, lo que se ha traducido en una serie de avances en el conocimiento del material y su elaboración, mismos que no parecen haber terminado aún, abriendo una nueva era en la historia del vidrio.

De entre los avances logrados en el presente siglo acerca del vidrio se tiene lo siguiente:

- 1) En 1915, se producen por primera vez los famosos vidrios de borosilicato resistentes al choque térmico.
- 2) En 1920 el Departamento de tecnología del vidrio en Inglaterra lleva a cabo la medición de las propiedades , tales como la densidad, conductividad eléctrica, resistencia química, viscosidad y expansión térmica de una amplia variedad de vidrios comerciales

- 3) En 1931 se lleva a cabo la fabricación de bloques de vidrio para ser utilizados en la construcción, además de fibra de vidrio.
- 4) En 1932 se propone un modelo para describir la estructura del vidrio, el cual es aceptado hasta nuestros días.
- 5) En 1939 se fabrica el vidrio de sílice de 96%, con el coeficiente de expansión más bajo en relación a los vidrios existentes hasta ese momento.
- 6) En los años de 1940, aparecen ciertos vidrios de silicato los cuales contienen ingredientes capaces de formar imágenes fotográficas permanentes en vidrio, cuando se someten a la acción sucesiva de rayos X o ultravioleta y un tratamiento térmico, llamados " vidrios fotosensibles".
- 7) En 1957 se lleva a cabo una cristalización controlada del vidrio dando origen a los vidrios cerámicos o cerámicas vítreas.
- 8) En los años de 1960, se puede considerar como " la edad de oro en la ciencia del vidrio", por la útil aplicación durante este período de los principios científicos al entendimiento del vidrio en términos de su naturaleza, estructura y composición.

En los últimos años del presente siglo la ciencia del vidrio se ha enfocado a aspectos como son fases de separación, difusión, conductividad electrónica, fátiga estática, intercambio de iones, así como la formación de vidrios a partir de sustancias orgánicas, aleaciones metálicas e implementar nuevos métodos obtención y mejorar los ya conocidos. ⁽¹⁰⁾

2.2 . DEFINICIÓN DE VIDRIO.

La palabra vidrio deriva de la raíz Indo-Europea " brillante", aunque el término también se asocia a las palabras " luz" y "resplandeciente" ⁽¹⁰⁾, en este sentido, el vidrio es un material transparente y brillante, con un alto rango de ablandamiento, sustancialmente insoluble en agua y solventes orgánicos, además de ser no inflamable. ⁽¹¹⁾

Desde el punto de vista técnico la ASTM (American society for Testing Materials) ha definido al vidrio como " Un producto de fusión inorgánico, el cual se ha enfriado a una condición rígida sin cristalización". ⁽¹¹⁾

Por otro lado Goerge W. Morey ⁽³⁸⁾ describe a este material como " Una sustancia inorgánica en una condición tal que es continúa y análoga al estado líquido de esa sustancia, pero por haber sido enfriada rápidamente desde su condición fundida, alcanza tan alto grado de viscosidad que para todo propósito práctico es rígida ".

En un criterio más general G. O. Jones ⁽³⁹⁾, considera al vidrio " Como un material formado por enfriamiento del estado líquido , el cual se ha transformado más o menos rígido a través de un incremento progresivo en su viscosidad".

En las definiciones anteriores se enfatiza el hecho de que el vidrio no es un cristal, si no un material amorfo, es decir, no presenta regularidad en su arreglo molecular a largo alcance, lo cual le origina una versatilidad de unidades estructurales en una desordenada red cristalina. ⁽³⁰⁾

Resulta importante hacer algunas aclaraciones a los criterios que se proponen para definir al vidrio, tales como: el vidrio no es exclusivamente una sustancia de origen inorgánico, ya que, si bien es cierto que la mayor parte de vidrios que se producen a nivel comercial pertenecen a este grupo, recientemente se han desarrollado polímeros vítreos y vidrios provenientes de líquidos orgánicos. Así mismo se han implementado nuevos procedimientos para la obtención de vidrios, además del enfriamiento del estado líquido; por lo que deja de ser un producto único de fusión, hoy en día, capas de vidrio pueden ser depositadas del vapor o solución líquida de algunas sustancias.

El vidrio se presenta como una continuación del estado líquido sin discontinuidades en su arreglo estructural, al cual en termodinámica formal se denomina "líquido sobreenfriado", es decir, el vidrio es un líquido de viscosidad extremadamente grande, que fluye con extraordinaria lentitud, lo que le proporciona un aspecto de sólido y al cual comúnmente se ha llamado " estado vítreo", para caracterizarlo por no poseer un punto de fusión o solidificación, sino un rango de ablandamiento y endurecimiento.

2.3. FORMACION DEL VIDRIO.

La formación de vidrio puede llevarse a cabo a través de los siguientes métodos:

a).- Por enfriamiento del estado líquido, lo suficientemente rápido para evitar la cristalización, siendo esta la forma más común y tradicional para la obtención de vidrios.

b).- Por condensación del vapor sobre un sustrato frío, en este método el material evaporado entra en contacto con un sustrato frío y la energía térmica es extraída de sus átomos antes de que puedan emigrar para formar una configuración cristalina; es el método alternativo más usado y efectivo para materiales que son difíciles de formar como sólidos no cristalinos.

c).- Por electrodeposición, materiales como Ta₂O₅, Ge y ciertas aleaciones de Ni-P son algunos de los materiales que han sido preparados por este procedimiento.

d).- Por reacción química, es un método especialmente efectivo para estructuras enlazadas con Hidrógeno, en medio acuoso, el producto obtenido de la reacción es un gel no cristalino, por ejemplo:



A continuación se muestra una tabla con los materiales que han sido hechos vidrios por alguno de los procedimientos anteriores.

A).- VIDRIOS FORMADOS POR ENFRIAMIENTO DEL LIQUIDO.
1).- Elementos: S, Se, P,
2).- Oxidos: B ₂ O ₃ , SiO ₂ , GeO ₂ , P ₂ O ₅ , As ₂ O ₃ , Sb ₂ O ₃ , In ₂ O ₃ , Ti ₂ O ₃ , SnO ₂ , PbO ₂ , SeO ₂ .
3).- Sulfuros: As ₂ S ₃ , Sb ₂ S ₃ .
- Varios compuestos de: B, Ga, In, Te, Sn, N, P, Bi, CS ₂ .
4).- Selenuros.
Varios compuestos de Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Si, P.
5).- Haluros: BeF ₂ , AlF ₃ , ZnCl ₂ , Ag(Cl, Br, Y), Pb(Cl ₂ , Br ₂ , I ₂)
6).- Nitratos:
KNO ₃ , Ca(NO ₃) ₂ , y muchas otras mezclas conteniendo nitratos alcalinos y alcalinotérreos
7).- Sulfatos: KHSO ₄ , y otras mezclas binarias.
8).- Carbonatos: K ₂ CO ₃ - MgCO ₃
9).- Compuestos orgánicos simples:
O-Terfenil, tolueno, 3-metil hexano, 2,3-dimetil cetona, dietil éter, etilen glicol, al metílico, glucosa, etc.
10).- Compuestos de polímeros orgánicos:
Polietileno (- CH -) _n , y muchos otros.
11).- Soluciones acuosas:
Acidos, bases, cloruros, nitratos etc.
12).- Aleaciones metálicas por enfriamiento por salpicadura: Au ₄ Si, Pd ₄ Si, Te ₃ - Cu ₂₅ - Au ₅

Tabla 1. Materiales formados como vidrios por enfriamiento del líquido.

B) VIDRIOS FORMADOS POR DEPOSICIÓN O REACCIÓN DEL VAPOR.

1).- Elementos: Boro, silicio, germanio, bismuto, galio.

2).- Oxidos: Tantalio, niobio.

3).- Otros compuestos: Carburo de silicio, varias combinaciones de silicio o germanio, con oxígeno, azufre, selenio y telurio. Magnesio con antimonio o bismuto, Níquel, cobalto o hierro con fósforo o azufre.

Tabla 2: Materiales formados como vidrios por deposición o reacción del vapor.

Aunque en la actualidad se han desarrollado nuevos métodos para la formación del vidrio, el enfriamiento del estado líquido sigue siendo el método más común e importante. Dentro de la lista de materiales preparados por este método, los óxidos son los que presentan mayor facilidad para ser llevados al estado vítreo. En consideración a esto, Zachariasen, estableció que un óxido puede ser transformado en vidrio si "Forma redes extendidas en tres dimensiones, carentes de periodicidad y con una energía contenida, comparable a la correspondiente red cristalina", de lo cual se han derivado cuatro reglas que permiten elegir óxidos formadores de vidrios:

- 1.- Cada átomo de oxígeno debe estar unido a no más de dos cationes.
- 2.- El número de átomos de oxígeno rodeando al catión debe ser pequeño (no más de cuatro).
- 3.- Los poliedros de oxígeno comparten entre sí vértices, no aristas o caras.
- 4.- Al menos deben estar compartidos tres vértices de cada poliedro de oxígeno (una red tridimensional).

Los óxidos A_2O , o AO , en cuales A es un átomo metálico, no satisfacen estas reglas y los óxidos A_2O_3 , satisfacen las reglas 1, 3 y 4, si los átomos de oxígeno forman triángulos alrededor de cada átomo de A. Los óxidos AO_2 ó A_2O_5 , satisfacen también las reglas si los átomos de oxígeno forman un tetraedro alrededor de A. Elementos con un número de coordinación más alto, son excluidos por la regla 2. Partiendo de lo anterior Zachariasen predijo que los siguientes óxidos deberían ser formadores de vidrio: B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , As_2O_5 , P_2O_3 , As_2O_3 , V_2O_5 , Sb_2O_5 , Nb_2O_5 , y Ta_2O_5

En el tiempo de la investigación de Zachariasen, algunos de estos óxidos ya habían sido transformados en vidrio, sin embargo en la actualidad, otros óxidos han completado y aún aumentado esta lista como se muestra en la tabla 1.

Stanworth ⁽⁴¹⁾ estableció otras correlaciones útiles para poder elegir los óxidos que formarán vidrios con relativa facilidad :

- 1).-La valencia del catión es 3 o mayor.
- 2).-La tendencia a formar vidrio aumenta cuando disminuye el tamaño del catión.
- 3).-La electronegatividad deberá estar entre 1.5 y 2.1 en la escala de Pauling.

En base a los criterios de Zachariasen y Stanworth los óxidos que se pueden encontrar en el vidrio se clasifican en tres grupos de acuerdo a sus características y función que desempeñen:

- a).-Oxidos formadores de la red vítrea, son aquellos en los cuales el ion metálico es pequeño, con una valencia mayor o igual a tres y con frecuencia vitrifican por simple enfriamiento del estado líquido, formando poliedros de triángulos o tetraedros, por ejemplo: B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , As_2O_3 , P_2O_5 , entre otros.
- b).-Oxidos intermedios o co-formadores de la red, no forman vidrios, por sí mismos, pero pueden tomar parte en la red vítrea, iniciada por otro elemento (Si, B, P), ocupando posiciones equivalentes a los formadores de la estructura, razón por la cual mantienen el estado vídrio del material, por ejemplo el óxido de plomo.
- c).-Oxidos modificadores de la red, son elementos de valencias bajas y de mayor tamaño, no forman enlaces covalentes direccionales con el Oxígeno y su número de coordinación generalmente es mayor que cuatro. La incorporación de estos óxidos rompe la continuidad de la red por adición de Oxígenos, lo que debilita la estructura y disminuye las temperaturas de fusión del material, facilitando el procesamiento del mismo. Por ejemplo los óxidos de Na y K.

A continuación se proporciona una tabla con los cationes de óxidos pertenecientes a cada uno de los grupos mencionados anteriormente:

	CATION	VALENCIA	No. DE COORDINACION
Formadores de la red	B	3	3
	Si	4	4
	Ge	4	4
	Al	3	4
	P	5	4
	V	5	4
	As	5	4
	Sb	5	4
Intermedios	Ti	4	6
	Zn	2	2
	Pb	2	2
	Al	3	6
Modificadores	Be	2	4
	Li	1	4
	Na	1	6
	K	1	9
	Rb	1	10
	Cs	1	12
	Cd	2	6
	Mg	2	6
	Ca	2	8
	Ba	2	8
Sr	2	8	

Tabla 3.: Valencia de cationes y su número de coordinación.

La formación de vidrio a partir de un sólo óxido como componente es poco común, y sólo el vidrio de sílice tiene importancia a nivel comercial, la mayor parte de la producción de vidrio contiene un formador de vidrio (como la sílice , generalmente) y dos o más modificadores.

Una segunda categoría en los vidrios formados por enfriamiento del estado líquido son los llamados calcogeniuros, los cuales contienen elementos del grupo V, particularmente arsénico y antimonio, combinados con elementos del grupo VI tales como azufre y telurio, algunas veces con adiciones de halógenos y otros elementos, los cuales han despertado gran interés debido a su peculiar semiconducción y propiedades eléctricas, así como por su relativamente baja temperatura de reblandecimiento y buena transmisión de la radiación infrarroja.

Otra categoría es la de los vidrios iónicos halógenos, nitratos, sulfatos y carbonatos, los tres últimos son completamente similares porque forman vidrios solamente como mezclas binarias o multicomponentes.

Otras categorías son los compuestos orgánicos simples, polímeros orgánicos y aleaciones metálicas, aunque los metales exhiben un orden de alto grado en el estado cristalino y por lo tanto son mucho más difíciles de retener en forma vídriosa. Se requieren velocidades de enfriamiento muy rápidas desde el estado líquido, normalmente de 10^5 a 10^8 °C / s , para obtener un metal amorfo, lo anterior sólo puede lograrse por fundición centrífuga de gotitas (enfriamiento por salpicadura), o alimentando un fino hilo de metal líquido sobre el borde de un disco que gira rápidamente. El producto obtenido de cualquiera de estas dos técnicas es necesariamente muy delgado, usualmente de 40 μm (0.040 mm).

Es indudable que esta lista de materiales esta siendo ampliada, ya que día a día se descubren nuevas técnicas para el enfriamiento rápido de las masas fundidas o se desarrollan y perfeccionan métodos alternativos para la formación en vidrios de nuevos materiales a fin de cubrir necesidades más específicas.

2.4. ESTRUCTURA.

Determinar la estructura del vidrio a temperaturas inferiores a la desvitrificación ha sido el objeto de estudio de las últimas décadas del presente siglo en lo que se refiere a este material , estudios que han llevado a proponer las siguientes teorías:

1).- Teoría de las cristalitas. Las semejanzas observadas en los picos de las bandas de difracción de rayos X, de los vidrios y de sus cristales correspondientes, llevaron a suponer que estaban constituidos de cristales muy pequeños denominados *cristalitas*. Por ejemplo el pico de la banda de difracción de la sílice vítrea, se presenta en el mismo ángulo que la línea principal de la imagen de la cristobalita (forma cristalina de la sílice), lo cual llevó a los primeros investigadores en este campo a sugerir que el *vidrio* de sílice estaba formado por cristales de cristobalita o cristalitas, sin embargo, en trabajos posteriores el tamaño de estas cristalitas se estimó en un valor entre 7 y 8 Å , en tanto que el tamaño de una celda unitaria de cristobalita es también de 8 Å , por lo que resultaría impropio llamar cristal a una estructura que tiene como extensión una celda unitaria,

considerándose así, insostenible la teoría de las cristalitas para explicar la estructura del vidrio. La coincidencia del pico de la banda de la sílice vítrea y la cristobalita se atribuye a que las distancias interatómicas en ambas estructuras son aproximadamente las mismas.

2- Teoría de una red al azar. Propuesta en 1932 por Zachariassen ⁽⁴⁰⁾, quien en su trabajo describió a la estructura del vidrio como "una red tridimensional, carente de simetría y periodicidad, en la cual ninguna de sus unidades se repite a intervalos regulares. Una red que no posee la periodicidad o la simetría de un cristal, pero con cierta cantidad de orden a corta distancia, análoga a la del cristal correspondiente". La teoría de una red al azar permite explicar las semejanzas en estructura y energía interna entre la cristobalita y el vidrio de sílice

Ahora bien, esta teoría fué duramente criticada al principio, pero sólo dos años después de su publicación Warren y sus colaboradores consiguieron demostrarla experimentalmente a través del método de difracción de rayos X en vidrios de diferentes óxidos. Por lo que esta teoría ha sido aceptada como la mejor descripción acerca de la estructura del vidrio y desde el momento en que fué propuesta por Zachariassen a la fecha, ha sido demostrada, definida y ampliada como se verá a continuación.

2.5. PRUEBAS DE LA EXISTENCIA DE UNA RED VITREA CONSTRUIDA AL AZAR.

1) La resistencia, la rigidez y otras propiedades mecánicas del vidrio sólido son comparables en límites y temperatura a las propiedades correspondientes a los cristales. La rigidez y ausencia de migración de átomos, indican que dichos átomos en el vidrio sólido están estrechamente ligados unos a otros y sólo pueden oscilar alrededor de posiciones de equilibrio, dispuestas de alguna manera fija y algo ordenada.

2) La cantidad de cristalización es pequeña en los vidrios comerciales, esto indica que la energía del vidrio sólido "no es mucho mayor" que la del estado cristalino correspondiente. Con energías no muy diferentes, parece probable que el vidrio tenga un grado elevado de orden en la disposición de sus átomos aunque no tenga el orden perfecto de la red ideal de los cristales que proporcionan a éstos periodicidad y simetría.

3) Las elevadas viscosidades de las sustancias vítreas, indican una fuerte tendencia a unirse y a formar en el líquido estructuras atómicas de corto alcance y dinámicamente cambiantes. A medida que disminuye la temperatura, esta unión, formación de la estructura y ordenamiento irán aumentando, aunque el enfriamiento sea lo suficientemente rápido, como para impedir el ordenamiento perfecto del estado cristalino.

4) Una estructura reticular en la que ninguna unidad de la estructura se repite idénticamente a intervalos regulares y por consiguiente tiene un carácter no simétrico ni periódico; lo que explica las propiedades extraordinarias del vidrio sólido, como son la no cristalinidad, reblandecimiento o endurecimiento gradual, proporciones no estequiométricas en los vidrios de varios componentes y conductividad electrolítica a temperaturas elevadas.

5) Las imágenes de difracción de rayos X de los vidrios sólidos consisten en unos cuatro anillos anchos, difusos, semejantes a los observados en los líquidos, en contraste con el espectro de líneas bien definidas de la difracción de los sólidos cristalinos. Lo anterior ha llevado a suponer que la estructura del vidrio es la de un líquido sobreenfriado, sin embargo no se ha avanzado lo suficiente en las teorías de los líquidos, en particular a las que se refieren a soluciones concentradas, para llegar a modelos cuantitativos de su estructura atómica.

Aunque una estructura de corto alcance es la característica del vidrio, existen ciertas diferencias en ella, originadas por la naturaleza propia del material del cual este formado, por lo que se describirá la estructura de los diferentes tipos de vidrio de manera particular.

2.6. ESTRUCTURAS VITREAS.

1).- VIDRIOS DE SILICE: La unidad básica en todos los silicatos cristalinos, es un tetraedro en cuyo centro se localiza un átomo de Si, rodeado por cuatro átomos de Oxígeno a una distancia de 1.6 \AA , consideraciones de valencia requieren que cada átomo de Oxígeno esté enlazado directamente a dos átomos de Silicio, en consecuencia éstos son compartidos por dos tetraedros adyacentes, construyéndose así, la red cristalina con la repetición periódica de estas unidades, como se observa en la siguiente figura:

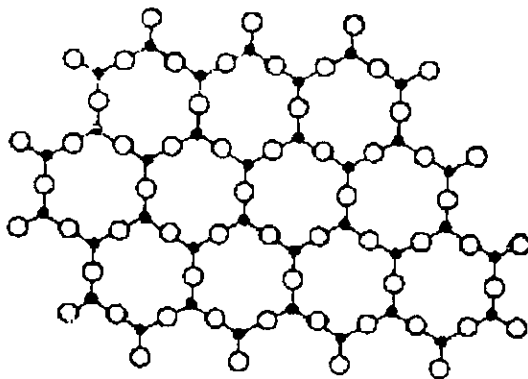


Fig. 6. Estructura de la cristobalita.

Para el vidrio de sílice los tetraedros existen precisamente como en las formas cristalinas, pero únicamente a distancias cortas de 20 a 30 Å⁰, correspondientes a 3 o 4 anillos. Posteriormente se presentan distorsiones locales en la estructura, lo que origina la gradual destrucción de la simetría y periodicidad de la red, como se observa en el siguiente esquema.

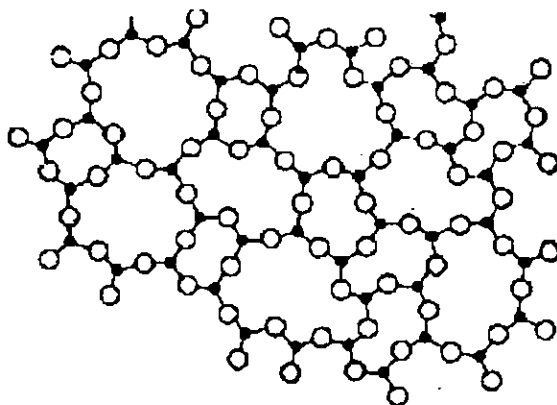


Fig. 7. Estructura de la sílice vítrea.

2).- VIDRIOS DE OXIDO DE BORO: La tendencia del óxido de boro a adquirir el estado vítreo es tan grande que su forma cristalina fué desconocida hasta 1933, en que se obtuvo por calentamiento prolongado al vacío.

La estructura vítrea de este compuesto está constituida por triángulos de BO_3 , unidos en un anillo planar de seis miembros denominado grupo *boroxil*, en el cual se alternan átomos de boro y oxígeno a una distancia de 1.39 \AA y un ángulo de 120° .

Los anillos se encuentran unidos en una red tridimensional por enlaces boro-oxígeno-boro, con un ángulo aproximado de 130° , la unión irregular de estas unidades en el líquido, hacen virtualmente imposible que puedan formar una red cristalina al disminuir su temperatura.

La estructura formada por la red vítrea del óxido de boro es diferente a la red formada por tetraedros en los vidrios de sílice, debido a que existe un espacio de aproximadamente 10 \AA entre los anillos que la forman, originando una unión más débil y disminuyendo en consecuencia su viscosidad en relación a otros formadores de vidrio como la sílice y el Germanio.

3).- VIDRIOS DE PENTOXIDO DE FOSFORO: Como en el óxido de boro el pentóxido de fósforo forma vidrios fácilmente, es decir es muy resistente a la cristalización.

La unidad estructural de los vidrios de fósforo es el grupo PO_4 , dispuesto tetraédricamente, pero en contraste con los formadores de vidrio tetravalentes como la sílice, sólo tres de los cuatro oxígenos están enlazados a un segundo átomo de fósforo, debido a la formación de un enlace doble entre el fósforo y uno de los oxígenos que le rodean. Por esta razón los tetraedros de PO_4 encuentran enlazados sólo a otras tres unidades y no a cuatro como en la sílice vítrea, así el vidrio de P_2O_5 es estructuralmente más débil, teniendo una menor temperatura de fusión y elevada expansión térmica, así mismo, es muy reactivo químicamente y forma fácilmente vidrios con óxidos básicos y con Alúmina.

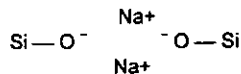
4).- VIDRIOS DE OXIDO DE GERMANIO: El vidrio de GeO_2 está formado por tetraedros de GeO_4 con un ángulo de enlace entre ellos de 138° , en una red al azar muy parecida a la del vidrio de sílice, debido a la semejanza entre las estructuras cristalinas de germanatos y silicatos.

La estructura al azar del GeO_2 vítreo, aparentemente es resultado de una distribución al azar de los ángulos de un tetraedro con respecto a otro.

5).- VIDRIOS DE OXIDOS MULTICOMPONENTES.

Vidrios de sílice: Los óxidos modificadores de la red de sílice son de naturaleza iónica, es decir el enlace que se forma entre el catión y el oxígeno no es direccional permanente, manteniendo a los átomos unidos por fuerzas electrostáticas de modo que cuando son agregados a la sílice proporcionan iones oxígeno libres, incrementándose la relación numérica de oxígeno/silicio a un valor mayor de dos del SiO_2 , rompiendo la red tridimensional, con la formación de oxígenos enlazados individualmente a átomos de silicio. Como estos oxígenos no participan en la red, algunos tetraedros tendrán un ángulo no compartido y se dice que en esos ángulos " los oxígenos no forman puente", a diferencia de los oxígenos de los ángulos compartidos que enlazan los tetraedros o " forman puentes " con ellos.

El conjunto adquiere una carga negativa y el ión metálico del óxido modificador encuentra un lugar en un hueco de la red donde está situada la carga negativa excedente. La estructura global se debilita y el punto de fusión disminuye. En el vidrio de sosa-sílice, cada molécula de Na_2O , transforma un enlace Si-O-Si , en :



Como se observa el catión modificador introduce una ligadura no dirigida y débil entre él y unos seis átomos de oxígeno en promedio. Lo que origina una red como la que se muestra en la figura 8.

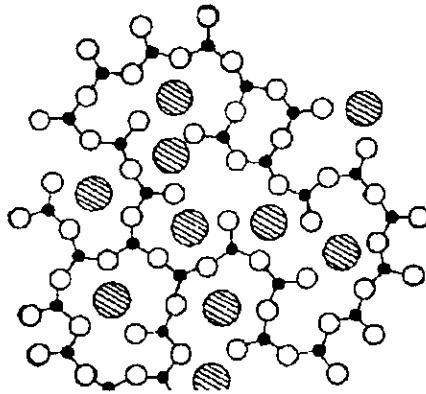


Fig. 8 . Estructura del vidrio de sodio silicato.

El hecho de que los átomos de sodio se encuentren presentes como iones que no están enlazados direccionalmente posibilita su movimiento a través del retículo y por ello el vidrio llega a ser un conductor eléctrico en menor grado.

El vidrio de potasa-silice tiene en general, una estructura semejante a la del vidrio sosa-silíce, pero como el átomo de potasio es mayor que el del sodio está rodeado por diez átomos oxígenos, y por lo tanto ensancha el retículo más que el sodio, haciendo disminuir en consecuencia la densidad, la viscosidad, y el índice de refracción; aumentando el coeficiente de expansión. Así mismo, el mayor tamaño del átomo de potasio hace más difícil su desplazamiento a través del retículo de silicio-oxígeno, por lo cual, el vidrio de potasa posee una conductividad eléctrica menor que el vidrio de sosa.

El espectro de difracción de rayos X del vidrio de sosa-cal-silíce, mostró que las posiciones ocupadas por los átomos de calcio son muy semejantes a las de los átomos de sodio, salvo que los calcio están rodeados generalmente por ocho átomos de oxígeno en tanto que el número usual para los sodios es de seis.

La mayor afinidad de los cationes divalente por el oxígeno tiene un efecto sobre las propiedades físicas del vidrio. Cuando rempazan al sodio, reducen el coeficiente de expansión y en el caso de los dos de menor tamaño, magnesio y calcio, aumentan incluso la densidad.

En general, la sustitución de un catión modificador del retículo por otro del mismo tamaño pero mayor valencia aumenta la densidad, la viscosidad y el índice de refracción y hace disminuir la conductividad eléctrica, de hecho, los iones divalentes no parecen emigrar a través de la estructura del silicato.

En el vidrio de boro y silicio la red se compone de tetraedros de boro-oxígeno, triángulos de boro-oxígeno y tetraedros de silicio -oxígeno. Por otro lado, el catión Al^{+3} , cuando está en porcentajes no demasiado grandes en un vidrio de silicato, es parte de la red con cuatro oxígenos ligados tetraédricamente. Los tetraedros de boro y aluminio son de un tamaño diferente que los SiO_4 y, por consiguiente, producen alguna deformación de la red. Sin embargo, una cantidad limitada de dicha deformación contribuye a aumentar la estabilidad de la red y producen en consecuencia vidrios resistentes al ataque químico, al choque eléctrico y altos rangos de ablandamiento.

6).- VIDRIOS CALCÓGENIUROS : Son vidrios que contienen elementos del grupo V, particularmente arsénico y antimonio combinados con elementos del grupo VI tales como azufre, selenio y telurio, algunas veces con adición de halógenos

Primeramente se describirán las estructuras básicas de los vidrios de azufre y selenio, seguidas de los vidrios binarios y multicomponentes.

Muchas de las formas del azufre sólido y líquido han sido ya objeto de estudio, así se sabe que del punto de fusión en $160^{\circ}C$ el azufre líquido está formado por anillos moleculares de S_8 . Arriba de $160^{\circ}C$ los anillos se rompen formando largas cadenas de aproximadamente 10^6 átomos de azufre y en temperaturas muy altas las cadenas se rompen, originando un decremento en la viscosidad, así que los vidrios pueden ser formados por enfriamiento del azufre líquido en arriba de $160^{\circ}C$ a $-30^{\circ}C$

Estos vidrios contienen cadenas entrelazadas de del líquido, con largas cadenas, dependiendo de la temperatura a la cual fué enfriado. Algunos anillos de S_8 también están presentes en el vidrio.

El selenio forma vidrio por enfriamiento del estado líquido, arriba de su punto de fusión de $217^{\circ}C$. Nuevamente su consiste en largas cadenas de átomos de selenio, muy similar al azufre

vítreo, ya que la longitud de las cadenas también es determinada por la temperatura a la cual fue formado, algunos anillos de Se_8 se encuentran también presentes en el vítreo, pero en menor cantidad que con el azufre.

En los vidrios de azufre-selenio están formados con cadenas de azufre dispuestas al azar o átomos de selenio, de manera similar a los copolímeros orgánicos, mezclados con anillos de S_8 y Se_8 .

En el vidrio de trisulfuro de arsénico, los átomos de arsénico están unidos a tres átomos de azufre, formando una estructura de cadenas entrecruzadas o anillos enlazados de arsénico-azufre-arsénico.

7).- POLIMEROS ORGANICOS : Una gran variedad de polímeros orgánicos simples que se conocen están formados por cadenas lineales C-C cuya longitud depende de sus condiciones de preparación. En la fusión las cadenas pueden ser enredadas unas con otras, por movimientos brownianos de sus extremos libres o bien pueden ser unidas por fuerzas de Van der Waals, en puntos o regiones determinadas. Si la fusión es enfriada rápidamente las cadenas no serán capaces de orientarse una con respecto a otra, de manera uniforme y el resultado es un vidrio rígido con pequeñas regiones vítreas en una matriz de enredadas cadenas.

Las cadenas pueden ser atadas dentro de una red tridimensional, si los sustituyentes en sus extremos son capaces de reaccionar y formar enlaces covalentes. Esta unión cruzada lleva a sustanciales cambios en las propiedades del polímero, tales como un incremento en la viscosidad y temperatura de ablandamiento.

8).- VIDRIOS DE SALES IONICAS : Los vidrios también pueden ser formados a partir de compuestos enlazados iónicamente, por ejemplo, los haluros BeF_2 y ZnCl_2 , presentan estructuras especiales que permiten su formación como vidrio.

Las estructuras cristalinas del BeF_2 , son totalmente parecidas a las de la sílice. La unidad estructural básica de estos cristales es un tetraedro de Berilio-Flúor, en el cual cada berilio se encuentra unido a cuatro átomos de flúor. En la estructura vítreo los tetraedros son unidos en una

red tridimensional carente de periodicidad y simetría, de igual manera que en los vidrios de sílice; además el tamaño de los iones Be y F son casi el mismo que del Si y O.

La viscosidad del BeF_2 , arriba de su punto de fusión es totalmente alta, por lo que es reducida con la adición de fluoruros alcalinos y alcalinotérreos en analogía con los silicatos.

El ZnCl_2 también forma un vidrio, aunque éste es mucho menos estable que el vidrio de BeF_2 . Los iones Zinc están rodeados por cuatro iones Cl, en coordinación tetraédrica, originando una estructura de red parecida a la del BeF_2 y los silicatos, aunque el enlace Zn-Cl no es tan fuerte como el enlace Be-F o Si-O.

Mezclas binarias de nitratos, carbonatos y sulfatos también forman vidrios cuando un ion metálico en la mezcla es monovalente y el otro divalente, ya que la diferencia en su electronegatividad lleva a un "apiñamiento" de iones que inhiben la cristalización.

Soluciones acuosas de ciertos ácidos y bases pueden ser enfriadas para formar vidrios; su estructura incluye indudablemente la hidratación de los iones y el rompimiento del hidrógeno enlazado aunque los detalles del arreglo son todavía inciertos.

9).- LIQUIDOS ORGANICOS : Cierta número de líquidos orgánicos simples, como los que se enlistaron en la tabla forman vidrios. La mayoría de ellos tienen moléculas asimétricas y enlaces débiles, así que la estructura de los vidrios probablemente consiste en un arreglo al azar de moléculas sin muchas interacciones entre ellas, esencialmente "un líquido congelado".

10).- VIDRIOS METALICOS : Una variedad de aleaciones metálicas han sido preparadas como vidrios por técnicas de deposición o enfriamiento rápido del estado líquido.

La difracción de rayos X, sobre vidrios de aleaciones metálicas, mostraron una estructura con un orden de corto alcance mayor que el encontrado en los líquidos metálicos puros. Lo anterior resulta congruente con el modelo estructural propuesto por Bernal, el cual está basado en un denso empaquetamiento al azar de átomos metálicos y no metálicos, que se mantienen fuertemente unidos por interacciones entre ellos. La fig 9 muestra el modelo de la estructura propuesta para un metal amorfo, el cual se produce dibujando líneas entre los centros de los átomos adyacentes. Los

poliedros resultantes son de forma irregular, carentes de un apilamiento repetitivo y comparables a los que ilustran la estructura de frontera de grano.

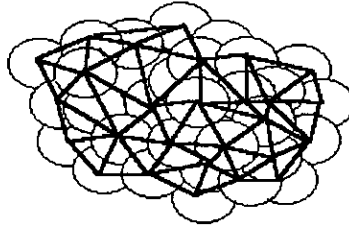


Fig. 9. Estructura de un metal amorfo.

2.7 EL VIDRIO COMO LIQUIDO SOBREENFRIADO.

Para caracterizar al vidrio como un líquido sobreenfriado se tienen las siguientes evidencias:

- Características no cristalinas del vidrio sólido: El vidrio es un sólido amorfo, a temperatura ambiente no adopta nunca formas geométricas, cuyas figuras de difracción de los rayos X correspondan a las de un cristal.

El vidrio no tiene diferencias direccionales en la conductividad eléctrica, en la rapidez de disolución, en la dureza o en reacciones químicas, además presenta singulares características de fractura, no da aviso de ésta, ya que se produce antes de que sea perceptible algún cambio de forma causado por los componentes de rotura de la fuerza aplicada. Esta característica ha hecho pensar que el vidrio no es flexible, pero en realidad éste se dobla aproximadamente tres veces más que el acero para las mismas tensiones deformadoras y aumenta si el vidrio tiene forma de fibra fina o cinta delgada. Es importante mencionar que el vidrio moderno es técnicamente frágil en lo que respecta al

carácter de su fractura, pero no en el sentido fiel de la palabra. La fractura se debe siempre a esfuerzos de tracción, la fractura por compresión o cortadura se debe a la raja que se inicia y continua por los componentes de tracción del esfuerzo. La fractura depende en gran medida en el estado en que se encuentre la superficie del vidrio.

-No presenta puntos de transición de cambio de fase definidos. El vidrio no tiene punto de solidificación ni punto de fusión definidos. El estado vítreo tiene ciertas propiedades que son completamente diferentes a aquellas de los metales y aleaciones, por ejemplo en el caso de un metal puro, cuando el líquido se enfría hasta el punto de solidificación, se precipita un sólido cristalino, sin embargo en un material como el vidrio, a medida que el líquido se enfría, se vuelve más y más viscoso, luego se convierte en un sólido plástico y blando y finalmente se vuelve duro y quebradizo.

-El vidrio puede cristalizar. Esto no es nuevo, hace ya algún tiempo que se sabe que las composiciones que se encuentran fuera de ciertos límites proporcionan vidrios que cristalizan (se desvitrifican) en mayor o menor grado cuando se enfría la masa fundida. Morey ⁽⁴⁾ y colaboradores realizaron estudios del equilibrio de fases de los vidrios de Silicato y con ellos demostraron que puede hacerse cristalizar casi todos los vidrios si se mantienen largo tiempo en el intervalo de temperaturas correspondientes a la desvitrificación.

-Los vidrios son una mezcla. Si se exceptúan los vidrios de un sólo compuesto, por ejemplo: SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 y As_2O_3 , el vidrio es una mezcla de varios compuestos cuyas proporciones varían considerablemente.

-Imágenes de difracción de rayos X. Las imágenes de difracción de rayos X producidas por los vidrios sólidos son anillos anchos y difusos muy semejantes a los de los líquidos ordinarios, y no como en el caso de los sólidos cristalinos que presentan imágenes de anillos bien definidos.

-Cristalización sin desvitrificación. En los vidrios especiales de Silicato es posible obtener una precipitación controlada de ingredientes secundarios a temperaturas inferiores a las de desvitrificación, por ejemplo: partículas cristalinas metálicas submicroscópicas de algunos vidrios

de color rubí y de vidrios fotosensibles, así como de cristales que dan carácter a los vidrios opalinos.

2.8 CRISTALIZACION O DESVITRIFICACION.

La desvitrificación es un problema familiar a todos los fabricantes de vidrio. En la mayoría de los casos consiste en cristales formados accidentalmente en las superficies o en las interfases entre el vidrio fundido y los materiales con los que se encuentran en contacto. Estos cristales involuntariamente formados dañan la calidad óptica y mecánica del material.

Aunque los fabricantes de vidrio vigilan siempre que no ocurra en el material una cristalización fortuita, que pudiera conducir incluso a la fractura de la pieza elaborada, en otros casos se propicia lo que parece contradictorio; la cristalización del vidrio. Esto inició con propósitos ornamentales en los vidrios opalinos, cuya apariencia deriva de la luz dispersada por cristales internos, resultado de una fusión incompleta o de cristales que crecen en el vidrio cuando éste es enfriado y ha llevado al desarrollo de vidrios uniformemente cristalizados o *vidrios ceramicos*, los cuales presentan propiedades muy superiores al común de los materiales vítreos, tales como una alta resistencia al impacto, baja reactividad química, menor coeficiente de expansión térmica y una línea de propiedades ópticas que van desde transparente a completamente opaco o blanco, dependiendo del tamaño de los cristales formados.

Virtualmente todos los vidrios cristalizarían de modo espontáneo si llegaran a alcanzar su equilibrio termodinámico a temperatura ambiente, sin embargo en los vidrios comerciales el proceso de cristalización uniforme no se lleva a cabo de manera significativa debido indudablemente a las siguientes causas:

a) .-Velocidades de nucleación y cristalización mínimas: La velocidad de nucleación y crecimiento de los cristales son tan bajas en las sustancias formadoras de vidrio que aún para tiempos muy largos de enfriamiento no se forma una cantidad apreciable de material cristalino.

b) .- Viscosidades muy altas : Otro factor determinante en la no cristalización del vidrio es la alta viscosidad que exhiben las sustancias vítreas, aún en el estado fundido o líquido; lo que

ayuda a evitar el rearrreglo molecular cristalino. Lo anterior puede observarse fácilmente en la siguiente tabla que muestra los valores de viscosidad para diferentes sustancias.

Material	Viscosidad (poises)	Temperatura (°C)
Aire	0.00018	20
Pentano	0.0025	20
Agua	0.01	20
Fenol	0.1	20
Almibar (60% azúcar)	0.56	20
Aceite lubricante	1 a 6	20
Polímeros	10^8 a 10^{13}	
Vidrio de ventana	10^7	700
Vidrio de borosilicato	10^7	900
Vidrio de sílice fundida	10^{13}	1000

Tabla 4. Viscosidad de algunos materiales

Es un hecho que de las causas anteriores, el factor crítico que impide la cristalización del vidrio es su velocidad de nucleación extremadamente lenta, ya que una vez que se lleva a cabo una nucleación uniforme en el material los cristales crecen a velocidades apreciables, a temperaturas apropiadas, de modo que se han utilizado una variedad de compuestos para formar núcleos que lleven a cabo una cristalización uniforme en el vidrio, a dichos compuestos se les denomina agentes de nucleación.

La adición de agentes de nucleación tales como dióxido de titanio, pentóxido de fósforo, dióxido de zirconio y fluoruros a ciertos vidrios lleva a aumentar la velocidad de la nucleación cristalina uniforme, aunque el mecanismo es aún incierto. Se siembran finas partículas de metales como platino, oro, plata y cobre son sembradas en el vidrio en concentraciones de 0.001 a 0.1% para actuar también como centros de cristalización. El metal puede ser agregado puro o en forma de compuestos, los cuales se descomponen durante la fusión del vidrio formando una fina dispersión de partículas metálicas con un diámetro típico de 50 \AA^0 . Las partículas de metal puro pueden ser también nucleadas por luz ultravioleta o rayos X, por ejemplo, el óxido de cerio en el vidrio favorece la nucleación fotosensible del metal puro.

Algunos criterios para una correcta selección de los agentes que han de llevar a cabo la nucleación del vidrio son:

a) El catalizador debe ser fácilmente soluble a las temperaturas de fusión y poco soluble en el vidrio a bajas temperaturas.

b) Los iones o átomos del catalizador han de difundirse rápidamente a bajas temperaturas en comparación con los componentes mayores del vidrio.

c) La estructura cristalina y los parámetros de red del catalizador y de la fase cristalina nucleada han de ser muy semejantes.

El método para producir un artículo de vidrio uniformemente cristalizado consiste no solamente en utilizar un agente de nucleación adecuado, sino también incluye un tratamiento térmico cuidadoso para que pueda llevarse a cabo el crecimiento de los cristales ya nucleados.

CAPITULO III
TIPOS DE VIDRIO

III. TIPOS DE VIDRIOS.

Los vidrios se clasifican de acuerdo a su composición química en: vidrios de silicato, orgánicos, metálicos, calcogeniuros, de óxido de boro, de pentóxido de fósforo, etc. sin embargo, los vidrios que no son de silicato representan una minoría a nivel comercial, ya que se utilizan para fines muy específicos y no se trabajan aún en gran escala, así que en el presente trabajo se hace incipiente en los vidrios de silicato y de los que no se incluyen en este grupo, sólo se hará una mención muy breve de ellos.

3.1.- VIDRIOS DE SILICATO.

El vidrio de Sílice (hecho sólo con óxido de silicio puro) es ideal en casi todas sus propiedades, sin embargo presenta algunos inconvenientes para su fabricación, uno de ellos es su elevada temperatura de fusión (alrededor de 1650°C), dicho material resulta demasiado costoso y poco práctico. Además el vidrio resultante es tan viscoso, que resulta difícil de moldear y hay necesidad de homogenizar perfectamente la masa vítrea para extraerle las burbujas atrapadas en su interior. Una forma de reducir su temperatura de fusión, es agregar uno o varios óxidos modificadores como el sodio, potasio, calcio, magnesio, zinc, bario, aluminio y plomo, dando una amplia gama de vidrios de silicatos.

Los vidrios de silicato se clasifican en seis tipos de acuerdo a su composición química: a) vidrio sódico-cálcico, b) vidrio de plomo, c) vidrio de borosilicato, d) vidrio de aluminosilicato, e) vidrio con 96% de sílice y f) vidrio de sílice, mencionándolos en orden creciente de su contenido de sílice y algunas propiedades como la temperatura de reblandecimiento, resistencia química, propiedades eléctricas, costo y dificultad para darle forma.

a) Vidrio sódico cálcico. Representa la mayor parte del vidrio incoloro y transparente común, por lo que se fabrica en grandes cantidades. Las materias primas empleadas en su elaboración son las menos costosas, se funde y da forma con relativa facilidad. Aunque están constituidos básicamente por tres componentes (SiO_2 , Na_2O y CaO), en la realidad podríamos considerarlos

como vidrios multicomponentes, porque sus materias primas presentan algunas impurezas o bien se les agregan otros componentes en pequeñas cantidades tales como : Al_2O_3 , MgO , y en ocasiones BaO , BO , CaF_2

Por su temperatura de reblandecimiento baja y poca resistencia a los cambios bruscos de ella, su utilidad está restringida a temperaturas elevadas, aunque en los últimos años se ha mejorado su resistencia química, aumentado la proporción de sílice en su composición y disminuyendo la de los óxidos de calcio y sodio. Estos vidrios se adaptan muy bien para la elaboración de botellas, tarros, artículos baratos para cocina, focos, bloques para construcción, ventanas, aisladores eléctricos ordinarios.

b) Vidrio de Plomo. Como su nombre lo indica, se fabrica agregando PbO , en lugar de una parte, o la totalidad del óxido de calcio, que funde y estabiliza la sílice y el álcali.

Los vidrios de plomo son ligeramente más caros que los de sosa y cal, pero se funden con igual o mejor facilidad, además que son más fáciles de moldear, tallar o grabar, aunado a un alto índice de refracción que los hace presentar un brillo único, por lo que se utilizan para elaborar artículos finos de mesa con el nombre de "cristal", comparados con los vidrios sódico-cálcicos tienen una temperatura de fusión más baja.

Este tipo de vidrio es preferido para la fabricación de tubos de luz fluorescente o para gases nobles, ya que tiene una ventaja muy importante, la de soldarse a un metal.

El elevado contenido de plomo hace que aumente la absorción de rayos X, por lo que los vidrios de plomo se utilizan en forma de láminas para ventanas y escudos moldeados, para tubos de rayos X, con el fin de proteger al personal que los utiliza.

c) Vidrios de Borosilicato. Contienen óxidos de boro, algo de alúmina, cantidades pequeñas de álcali y ningún óxido de calcio o cuando más 1%. El contenido de sílice es mayor que en los vidrios sódico-cálcico y de plomo. Dificiles de fundir y de trabajar, tienen temperaturas de reblandecimiento a las, que los dos tipos anteriores, pero sobre todo una excelente resistencia a las variaciones bruscas de temperatura, debida a su bajo coeficiente de expansión térmica que suele ser inferior a otros tipos de vidrio.

El borosilicato ha hecho posible el uso del vidrio en utensilios de cocina para el horno, utensilios de laboratorio muy resistentes al calor y a los choques térmicos, tuberías, recipientes y otros artículos para la industria química ya que se utiliza en aquellos procesos con cambios repentinos en la temperatura de trabajo. El coeficiente de dilatación térmica de un vidrio de borosilicato para usos generales usado en tuberías de marcas comerciales y en artículos de laboratorio es de $33 \times 10^{-7} \text{ cm/cm / } ^\circ \text{C}$.

d) Vidrio de aluminosilicato : Su elevado contenido de alúmina produce un vidrio de alta temperatura de ablandamiento, bajo coeficiente de expansión , siendo más difícil de trabajar. Puede utilizarse en temperaturas más altas que los vidrios de borosilicato, con una resistencia al choque térmico, se utiliza para utensilios de cocina y aplicaciones similares.

e) Vidrio con 96% de sílice (Vycor), se elabora utilizando vidrio de borosilicato, relativamente suave y con un alto contenido de B_2O_3 . En la primera fase de su fabricación, se funde y se le da forma de manera usual, transformándolo en el artículo requerido, pero de dimensiones mayores a las deseadas. Se somete más tarde a un tratamiento térmico, transformándose en dos fases vítreas entremezcladas. Una de ellas rica en álcali y óxido de boro, soluble en ácidos minerales calientes, en tanto que la otra fase contiene 96% de sílice y 3% de B_2O_3 y es insoluble. En la segunda fase del proceso, el artículo se sumerge en un ácido caliente para extraer la parte soluble. La fase resultante con un alto contenido de sílice queda en estado poroso, se lava el vidrio para eliminar el ácido bórico y las sales disueltas en el interior de los poros. Posteriormente se pone a secar el artículo y en la última parte del proceso el artículo de vidrio poroso se calienta a 1200°C , contrae aproximadamente 14% en sus dimensiones. La estructura porosa se consolida completamente, debido al alto contenido de sílice. Esta estructura porosa es muy refractaria y con un control adecuado, la contracción se produce sin que se observe una deformación considerable en el artículo. Los gases contenidos en el interior de los poros son expulsados y el vidrio adquiere una forma perfectamente transparente y hermética al vacío.

Los vidrios así obtenidos tienen una gran estabilidad y temperatura de reblandecimiento tan elevada (1500°C), que soportan durante largo tiempo un uso continuo a temperaturas hasta de

900° C . A temperaturas mayores, se llega a producir alguna desvitrificación, llevando a un enturbiamiento de las superficies. Dado que su coeficiente de dilatación térmica es muy pequeño ($7.5 \times 10^{-7} \text{ cm} / \text{cm} / ^\circ \text{C}$) este material absorbe cambios de temperatura bruscos, como la inmersión repetida en agua de hielo, estando al rojo , sin que se raje, ni sufra algún otro defecto. Por sus características, se utiliza para la fabricación de artículos de laboratorio de una gran resistencia al calor como : crisoles, revestimientos de hornos, lámparas germicidas, filtros ultravioleta, aisladores eléctricos de muy alta frecuencia, etc.

e) Vidrio de Silice (99.8% de silice). Se obtienen fundiendo cristales de cuarzo puro. Como no se utiliza ningún óxido como fundente, la temperatura requerida para su reblandecimiento es muy alta (1750°C), por lo que se hace necesario emplear métodos de fusión especiales. El vidrio fundido es sumamente viscoso, por lo que es difícil lograr su homogeneidad y eliminarles las burbujas. Esto impone límites a las dimensiones y formas de los artículos elaborados de este material. En cuanto a sus características, presenta el coeficiente de expansión térmica más bajo ($5.5 \times 10^{-7} \text{ cm} / \text{cm} / ^\circ \text{C}$), de todos los vidrios anteriormente mencionados, así como el punto de reblandecimiento más alto (1650°C), aunque su uso es prácticamente el mismo que para el inciso anterior. A continuación se muestra una tabla con las composiciones de los principales vidrios comerciales de silicatos. ^(19, 20)

VIDRIO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	PbO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
Silice fundida	99.8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
96% de silice	96	-----	-----	-----	-----	3	-----	-----
Borosilicato	73-82	3-10	0.4 - 1	0-1	0-10	5-20	2-3	-----
De plomo	53-68	5-10	1-10	0 - 6	15-40	-----	0-2	-----
Sódico-cálcico	70-75	12-18	0-1	5-14	-----	-----	0.5-2.5	0- 4
Aluminosilicato	57	1	-----	5.5	-----	4	20.5	12

Tabla 5. Composiciones de vidrios comerciales de silicato.

3.2 VIDRIOS ESPECIALES DE SILICATO.

1).- Vidrios de color. Se obtienen agregando pequeños porcentajes de pigmento (por lo general óxidos metálicos), a las mezclas utilizadas para los vidrios incoloros. La adición del agente colorante, no ejerce normalmente, ningún efecto importante sobre las propiedades químicas y mecánicas del vidrio.

El color en el vidrio ha estado presente desde la antigüedad debida a impurezas en las materias primas, o bien debido a residuos en los crisoles empleados para fundirlo, de hecho no se consiguió un vidrio incoloro y transparente, hasta el siglo XVI , en Venecia.

El arte de colorear el vidrio ha sido muy importante desde muchos años y sus productos fueron muy apreciados, tanto como las gemas naturales para usos ornamentales. Así mismo también ya en la antigüedad se utilizaban algunos de los agentes colorantes que se emplean actualmente, por ejemplo: Oxido de hierro, Manganeso, Cobre y Cobalto. Sin embargo en la época moderna las investigaciones realizadas en el área de fabricación han sido muy importantes por lo siguiente : Los vidrios de color, ya no se requieren solamente con fines ornamentales, para realzar el aspecto de envases u otros artículos, sino para una gran variedad de aplicaciones técnicas, en donde se requieren vidrios coloreados con exactitud. Por ejemplo para la fabricación de filtros y lentes de color para sistemas de señales de los transportes, para vidrios que transmitan o absorban una gran parte de la luz ultravioleta, o aquellos vidrios necesarios para transmitir o impedir la parte infrarroja del espectro visible. El color en el vidrio se debe a una de las siguientes causas:

a).- Colores de solución. Se producen por bandas de absorción características de los óxidos metálicos disueltos en los vidrios, para ello se utilizan los óxidos de los del grupo de metales de transición como: Titanio, Vanadio, Cromo, Manganeso, Hierro, Níquel, Cobre y Plata. En otras ocasiones se utilizan también, el Uranio y las tierras raras.

b).- Colores por partículas coloidales. Producidos por partículas submicroscópicas suspendidas en el vidrio. El color de éste depende de la concentración y tamaño de las mismas. Por ejemplo en los colores rubí de oro, cobre y amarillo de plata, las partículas son cristales de metal.

c).- Colores producidos por partículas mayores que se originan cuando el vidrio contiene demasiado metal, o se le ha aplicado un tratamiento térmico especial, lo cual provoca que las partículas se precipiten. Las partículas cristalinas incoloras no metálicas, con índice de refracción diferente al vidrio transparente que sirve de base, producen vidrios translúcidos, opalinos, lechosos y alabastrinos

2).- Vidrios ópticos. Lo importante en éstos materiales es el grado de homogeneidad física y química, requerida para obtener la calidad óptica deseada.

Los vidrios ópticos usados para la elaboración de lentes y prismas de los instrumentos ópticos de mejor calidad y cámaras fotográficas tienen que estar exentos de imperfecciones, sin importancia alguna para el vidrio ordinario como son estrías, color imperfecto o ligeros esfuerzos de tensión. Las burbujas muy pequeñas (semillas), están rigurosamente limitadas en tamaño y número. Aún más, los vidrios ópticos deben de tener combinaciones concretas de índices de refracción y de poder dispersivo de la luz : Estos rigurosos requerimientos llevan a una selección de materias primas de la mayor pureza posible. Por ejemplo la arena para vidrio óptico no debe contener Fe_2O_3 o agentes colorantes como Cromo, Manganeso, Vanadio, Cobre y Cobalto. En la fabricación de este tipo de vidrio se usan crisoles especiales para la fusión con el fin de reducir al mínimo la contaminación del material y se hace necesario agitar una vez que se funde la masa vítrea para conseguir su homogeneidad. Posteriormente se deja enfriar y se seleccionan los trozos de vidrio con mejores características para volverlos a calentar a fin de darles la forma aproximada de las lentes a prismas que se requieren.

Los vidrios normales de sosa-cal (crown) y de plomo (flint) han proporcionado desde hace tiempo los vidrios ópticos ordinarios. Sin embargo se han elaborado un gran número de vidrios

ópticos con otras sustancias como: óxido de boro, óxido de bario, óxido de zinc y flúor. En los últimos años, se han elaborado otros vidrios ópticos sin silicatos, en especial tipos a base de tierras raras , pero la mayor parte de la producción es todavía como ya se mencionó anteriormente del tipo de silicato.

Finalmente, los vidrios ópticos, tienen temperaturas de fusión bajas, son menos duros mecánicamente, con mejores índices de refracción y poder dispersivo, que los vidrios ordinarios.

3).- Vidrios fotosensibles . Vidrios que contienen ingredienntes capaces de formar imágenes fotográficas permanentes en vidrio cuando se someten a la acción de rayos X , ultravioleta o tratamientos térmicos. La fotosensibilidad puede comunicarse a la mayoría de los vidrios de silicato, agregando a la mezcla de fusión cantidades mínimas de compuestos con metales fotosensibles(oro, plata y cobre, solos o con paladio), sensibilizadores ópticos (particularmente compuestos de Cerio) y agentes termorreductores (compuestos de estaño o antimonio).

Actualmente se tienen vidrios sensibles a radiaciones distintas de las visibles para fines de reconocimiento de radiaciones.

4).- Vidrios eléctricos. Todos los vidrios comerciales de silicatos son buenos materiales dieléctricos y buenos aislantes eléctricos, aunque unos mejores que otros. En este sentido los vidrios de silicato con propiedades eléctricas se clasifican:

a).- Aislantes . Para aislantes ordinarios de líneas telefónicas y de transmisión de energía, se utilizan vidrios de silicato sódico-cálcico. Los vidrios de plomo con una resistividad eléctrica mayor se requieren para aislantes especiales. Los vidrios de borosilicato por su resistencia mecánica y térmica, se utilizan para construir pararrayos de las líneas de transmisión de energía, tubos de alto voltaje para rayos X, columnas aceleradoras de partículas y en aquellos casos en los cuales se justifique el costo mayor, los vidrios con 96% de sílice y la sílice fundida proporcionan la resistividad máxima y el factor de pérdida más bajo.

b).- Dieléctricos. Un tipo especial de vidrio, rico en plomo se utiliza en forma de cinta de un espesor de aproximadamente 200 micras para hacer condensadores electrónicos , este vidrio presenta las mismas propiedades de la mica de alta calidad.

c).- Conductores. Dentro de los vidrios de silicato ninguno presenta una conductividad eléctrica considerable en tanto no se eleva su temperatura hasta unos 500° C, sin embargo ha aparecido en la actualidad un vidrio cubierto con una película conductora, adherente, al cual se le da el nombre de vidrio conductor. Dicho material es un vidrio de borosilicato al cual se le aplica por medio de calor, una película transparente de un óxido metálico como el SnO₂, cuyo espesor es del orden de 2.54×10^{-6} m.

Este vidrio se usa para hacer paneles radiantes de calefacción, que son fuentes eficientes y de gran superficie de rayos infrarrojos de onda larga. También puede usarse, para parabrisas sobre los cuales no se forma hielo y ventanas que proporcionan protección electrostática.

5).- Vidrios para juntas.

a).- Juntas para fusión de vidrio contra vidrio. Requeridos cuando hay que unir dos vidrios cuyos coeficientes de expansión son muy diferentes, por lo que se emplean varios vidrios con coeficientes intermedios para obtener una buena junta gradual.

b).- Juntas para fusión de vidrio con metal. Se usan vidrios normales para hacer juntas, aunque algunas exigen el empleo de vidrios especiales, que se fundan con el metal, por ello se han creado aleaciones especiales para el cierre con vidrios de coeficientes de expansión bajo que tengan la resistencia deseada al calor y propiedades eléctricas superiores.^(9, 12, 13)

3.3 VIDRIOS CERAMICOS.

De entre los materiales de reciente desarrollo se encuentran los vidrios cerámicos o cerámica vítrea, que como su nombre lo indica, combinan la naturaleza de las cerámicas cristalinas con el vidrio.

Los artículos de cerámica vítrea son formados como utensilios relativamente ordinarios de vidrio y mediante un tratamiento térmico cuidadosamente controlado, más del 90% del material cristaliza y la pequeña cantidad de fase vítrea residual llena el volumen de la frontera de grano llevándolo de ésta manera a una estructura libre de poros.

Los vidrios que cristalizan fácilmente tienen por lo general una proporción relativamente alta de óxidos modificadores, los cuales debilitan la red por introducción de iones oxígeno no enlazados, haciendo posible el rearrreglo atómico necesario para la cristalización.

La cristalización del vidrio es un proceso iniciado por nucleación en la frontera de fase de alguna impureza. Para un vidrio ordinario en estado de fusión la cristalización tiende a llevarse a cabo en pocos puntos aislados, a lo largo de la superficie del recipiente que lo contiene, sin embargo la microestructura resultante de este proceso es "burda" y no uniforme, por tal motivo, para los vidrios cerámicos se debe llevar a cabo un proceso de "cristalización controlada", el cual incluye la adición de agentes nucleantes como el TiO_2 , ZrO_2 y CaF_2 , o partículas metálicas coloidales de Pt, Au, Ag y Cu. Además se requiere de un tratamiento térmico adecuado, para producir una microestructura uniforme de grado fino característica del material.

El tratamiento térmico necesario para transformar al vidrio en un cerámico cristalino se lleva a cabo en dos etapas. En la primera el objeto previamente formado se calienta hasta una temperatura óptima para que se lleve a cabo una nucleación homogénea (T_n). Esta temperatura generalmente se encuentra alrededor de $100^\circ C$ arriba de su temperatura de recocido y se mantiene un tiempo que varía de unos cuantos minutos a horas, dependiendo de las características del material.

En la segunda etapa después del período de nucleación, la temperatura del vidrio se incrementa a una velocidad de $5^\circ C/ min.$ hasta alcanzar la temperatura adecuada para el crecimiento de los cristales (T_c), aproximadamente $100^\circ C$ más que T_n .

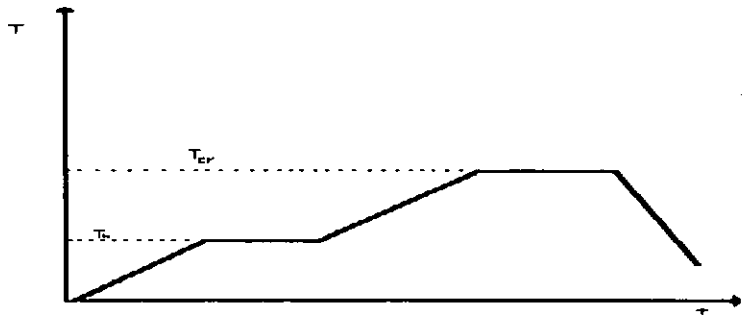


Fig. 10. Tratamiento térmico de un vidrio cerámico

La microestructura resultante consiste en cristales muy finos de entre 0.1 a $1 \mu m$, uniformemente dispersos, en una concentración de 10^{12} núcleos/ mm^3 de vidrio. Un calentamiento prolongado reduce el número de cristales y aumenta su tamaño.

El proceso de cristalización es acompañado por cambios ópticos de un vidrio de transparente a un material policristalino opaco, sin embargo cuando los cristales son muy finos, los vidrios cerámicos pueden ser translúcidos y aún transparentes.

Los vidrios cerámicos se caracterizan por su resistencia a los impactos debido en gran medida a la ausencia en su estructura de poros concentradores de esfuerzos, su dureza y resistencia al rayado es mucho mayor que la de los vidrios comunes y a la mayoría de las cerámicas, además conservan su rigidez a temperaturas más altas que los vidrios usuales a causa de su estructura cristalina. Algunos tienen temperatura de reblandecimiento de hasta $2462^\circ C$. Su coeficiente de expansión térmica van desde valores negativos a cero, según su composición química y la estructura cristalina que forme. Esta característica los hace prácticamente inmunes a la

rotura por choque térmico. Presentan también buena resistencia a agentes químicos y son clasificados como aislantes eléctricos.

Los vidrios cerámicos son utilizados para la elaboración de recipientes para cocinar, tuberías, intercambiadores de calor, bombas centrífugas, cojinetes y aislantes en las cúpulas de protección de antenas de radar para proyectiles dirigidos de alta velocidad.

La siguiente tabla muestra la composición típica de cerámicas vítreas de importancia comercial:

Sistema	SiO ₂	Li ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	B ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₃
Li ₂ O- Al ₂ O ₃ -SiO ₂	74	4	16	-----	-----	-----	6	-----
MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	65	-----	19	9	-----	-----	7	-----
Li ₂ O- MgO-SiO ₂	73	11	-----	7	-----	6	-----	3
Li ₂ O-ZnO- SiO ₂	58	23	-----	-----	16	-----	-----	3

Tabla 6. Composición de cerámicas vítreas comerciales.

3.4 VIDRIOS METALICOS.

Los vidrios metálicos de interés comercial son aleaciones metal-metaloides, las cuales combinan diversas cantidades de Fe, Ni y Co, con un porcentaje que va del 15 al 30% de elementos como B, Si, C, y P. Por ejemplo: Fe₈₀P₁₇C₃, (Fe, Co, Ni, Mo, Cr)₇₅P₁₆Al₃, Fe₈₀B₁₇Si₃.

Debido a que la naturaleza de las estructuras metálicas cristalinas, son por lo general, sencillas, éstas pueden formarse fácilmente, por ello es necesario que los metales líquidos sean enfriados muy rápido para evitar la cristalización requiriéndose de velocidades de enfriamiento extremadamente rápidas tales como 1^o C por microsegundo. Alcanzar estas velocidades es un

proceso costoso, pero útil debido a las propiedades únicas de estos materiales. Por ejemplo, la uniformidad de la estructura no cristalina elimina las estructuras de frontera de grano asociadas con los metales policristalinos típicos. Lo que da como resultado resistencias mecánicas muy altas, así como una excelente resistencia a la corrosión.

Los vidrios metálicos tienen importantes aplicaciones tecnológicas como capas protectoras, catalisis, y debido a su alta resistividad eléctrica y ausencia de fronteras de grano los vidrios metálicos basados en el hierro son excelentes materiales magnéticos para núcleos de transformadores, motores, cabezas magnéticas y otros dispositivos electrónicos.^(14, 15, 17)

3.5 FABRICACIÓN DEL VIDRIO.

El proceso de elaboración de vidrios por enfriamiento del estado líquido, sigue siendo el más utilizado a nivel comercial, debido a que en otros procesos producen vidrios muy específicos y en un menor volumen. Este proceso de fabricación consiste en general de las siguientes etapas:

1).- Mezclado: Consiste en formar la mezcla conteniendo la composición requerida para cada tipo de vidrio, seca y pulverizada. La mezcla también contiene una proporción apreciable de vidrio sobrante de una fusión anterior o de desecho con la misma composición, además de otros materiales como colorantes, decolorantes, opacificantes y agentes de refinación que ayudan a liberar los gases no disueltos en la masa de vidrio fundido.

2).- Fusión: En la fusión se calienta la mezcla preparada, formándose un líquido viscoso, se producen burbujas y la masa se hace transparente y homogénea a temperaturas próximas a 1500°C.

Las materias primas junto con el vidrio de desecho, se alimentan al horno por un extremo, en tanto que el vidrio fundido es retirado continuamente por el otro extremo, de modo que el nivel del vidrio en el horno permanece constante. El flujo es controlado de manera que hay tiempo suficiente para la fusión completa y refinado de la masa vítrea, la cual presenta una viscosidad de cercana a los 100 Poises.

3).- **Formado** : Después de la sección de refinado el vidrio fundido pasa lentamente al espacio de trabajo; mientras está entre los límites de viscosidad de 10^4 y 10^7 Poises, puede trabajarse fácilmente de muchos modos para darle forma : prensado, soplado, soplado en moldes, estirado, laminado, vaciado.

El *laminado* se emplea en la producción de vidrio para ventanas y vidrio plano. Las materias primas se funden en un extremo de un horno largo denominado horno-tanque y el líquido fluye hacia el otro extremo durante cierto tiempo para permitir que las burbujas se eliminen. La temperatura en el extremo donde están situados los rodillos se controla de modo que el vidrio tenga la viscosidad correcta para pasar por los rodillos y formar una lámina. Para el vidrio ordinario de ventanas el material laminado es utilizable en su forma original, pero para las planchas de vidrio se requiere de un proceso térmico adicional llamado de recocido.

Un nuevo método para formar vidrio en planchas consiste en hacer fluir el vidrio desde el horno de fundición dentro de un baño de flotación de estaño líquido. El baño de flotación está cubierto por un techo refractario, manteniéndose una atmósfera caliente para evitar la oxidación. En la cámara de flotación ambas superficies del vidrio adquieren la pulidez de espejo; luego la plancha pasa un horno de recocido que tiene rodillos muy lisos para evitar que se dañe el acabado. Este método reemplaza las costosas operaciones de esmerilado y pulimento del antiguo método de laminado.

El *estirado* de la tubería de vidrio se consigue de modo semejante al laminado. El vidrio de adecuada viscosidad fluye directamente desde el horno de fundición alrededor de un tubo cerámico o mandril tirado por rodillos cubiertos de asbesto. El aire que se sopla a través del mandril evita que el tubo se deforme después de pasar por éste. Al igual que para el vidrio plano el recocido se hace necesario.

El *soplado y prensado* es otro método importante de conformación del vidrio y se utiliza para producir objetos tales como botellas y bombillas para focos. Las máquinas automáticas retiran una cantidad del tamaño apropiado del vidrio fundido y lo soplan dándole la forma deseada en un molde dividido. La presión del vidrio se lleva a cabo, haciendo descender sobre él un émbolo, de tal modo

que quede confinado en un molde de hierro colado. La presión utilizada para la producción de mitades de ladrillos huecos de vidrio, corresponde más exactamente a la forja en prensa hidráulica de los metales.

El *vaciado* se lleva a cabo vertiendo el líquido en un molde: Un caso famoso es el vertido de un disco de telescopio de 5 m de diámetro.

El método de prensado y soplado se utiliza mucho para fabricar recipientes, en este proceso se alimenta un molde con un pedazo de vidrio fundido y se le presiona. Luego se quita la parte inferior del molde, sustituyéndolo por un molde con la forma final. La operación de soplado le da el contorno deseado. La mayoría de los artículos de vidrio están ahora, siendo formados por máquinas complicadas, aunque, en ciertos casos, el método viejo de soplado a mano ha sobrevivido. ⁽³²⁾

Después de formado, el artículo de vidrio de uso común se enfría y puede ya utilizarse. Sin embargo aquellos artículos que requieran de propiedades específicas se someten posteriormente a tratamientos de endurecimiento que pueden ser térmicos, como el templado y recocido, o químicos como el intercambio de ion y esmaltado, o llevar a cabo una cristalización uniforme y controlada para la formación de la cerámica vítrea o vidrios cerámicos.

El método para la fabricación de fibra de vidrio, un producto tan importante en la actualidad, consiste en la refusión de bolas de vidrio que fluyen a través de una plancha calentada de platino con orificios, por los cuales salen los filamentos y se ejerce la tracción rotando el tubo de enrollamiento a velocidades en su superficie hasta 61 m / s. Luego se clasifica el material por grosores para separarlo y se le aplica un lubricante a las fibras a medida que se van enrollando. ⁽⁶⁾

Entre las nuevas tecnologías para una fabricación más rápida del vidrio y cerámicas, se encuentra el procesamiento de *sol-gel* ya que es una técnica muy versátil para la preparación de vidrios especiales, cerámicas vítreas y cerámicas. Permite la formación de partículas uniformes y finas de alta pureza a temperaturas relativamente bajas. Estos polvos pueden ser sinterizados subsecuentemente con densidad muy alta y buenas propiedades mecánicas. En esta técnica la cualidad esencial es la formación de una solución organometálica. La fase dispersa *sol* es

convertida después en un *gel* rígido, el cual, a su vez, es reducido a su composición final mediante varios tratamientos térmicos ⁽³⁴⁾.

Las especificaciones para los productos de vidrio varían ampliamente, dependiendo del uso final. Para el vidrio de ventanas y en planchas, los requisitos principales son: superficie plana, transparencia y ausencia de burbujas y esfuerzos indeseables que generen no sólo rupturas sino que también causen la distorsión.

Generalmente es importante para los recipientes la exactitud en el volumen. En los utensilios para manejar sustancias químicas es necesario asegurar composiciones que no sufran corrosión. En los casos en los cuales el choque térmico es de consideración, el coeficiente de expansión es importante, necesitándose vidrios de sílice o alto contenido de la misma. El índice de refracción es el más importante en los vidrios para usos ópticos, mientras que en los vidrios empleados en la industria eléctrica, es de gran importancia la constante dieléctrica.

Una variación del vidrio óptico se utiliza en las fibras ópticas, en donde la luz que entra en un extremo de una fibra de vidrio y pasa a lo largo de la superficie con muy pocas pérdidas. La superficie de la fibra está recubierta con otro vidrio con un índice de refracción más bajo, lo cual evita que la luz transmitida se escape. Aunque los cables de fibra óptica se han utilizado durante varios años en aplicaciones donde la luz debe doblarse en las esquinas, se han comenzado a utilizar más recientemente en lugar del flujo de electrones en los alambres metálicos, para transmitir señales de pulso. Variando la configuración del pulso y la selección de diferentes longitudes de onda dentro del espectro de la luz, se puede transportar una gran cantidad de información en una sola fibra. La baja pérdida de luz a través de distancias considerables hacen el sistema muy eficiente.

El interés en el reciclado de los materiales se ha aplicado también a los productos del vidrio. Por ejemplo en la elaboración de recipientes de este material, los fabricantes prefieren iniciar con un "prealeado", es decir, con un vidrio que tenga ya, una composición química y la viscosidad controlada. En vez de empezar con sílice natural y agregar otros componentes para reducir su punto de ablandamiento, así únicamente se necesita refundir el vidrio reciclado y darle la nueva forma requerida, con la consiguiente reducción en el costo del proceso ⁽³⁵⁾.

3.6. VISCOSIDAD.

1).- Definición : La viscosidad en el vidrio es una de las propiedades técnicas más importantes, ya que determina las condiciones de fusión, recocido, las temperatura de trabajo y de uso, así como la velocidad de cristalización del material. La viscosidad de los diferentes vidrios varía enormemente con la composición de éstos y es fuertemente influenciada por la temperatura.

Definiendo; cuando una fuerza cortante es aplicada a un líquido, el flujo y la viscosidad son una medida de la relación entre la fuerza y la velocidad de flujo.

Si dos planos paralelos de área A, separados una distancia d, son sujetos a una fuerza tangencial F, la viscosidad η , se expresa como :

$$\eta = \frac{F \cdot d}{A \cdot u}$$

Donde u, es la velocidad relativa de los dos planos. La unidad de viscosidad es g / cm seg., la cual es conocida como Poise y para los fluidos más comunes como son el agua y líquidos orgánicos su valor es de centésimas de Poise, a diferencia de el vidrio que es mucho más viscoso, por lo que adquiere valores exponenciales (10^4 , 10^{13} etc).

La viscosidad y sus cambios con la temperatura son de particular importancia en la fabricación del vidrio debido a que en las operaciones para trabajarlo se procede paso a paso, por lo que se hace necesario que el material se encuentre suficientemente blando durante un rango de temperatura considerable para darle forma y al final del proceso de construcción se encuentre lo suficientemente rígido como para que mantenga su forma final.

Los puntos de viscosidad más importantes en el proceso de trabajo en el vidrio son:

a).- Punto de trabajo. Definido como la temperatura a la cual el vidrio tiene una viscosidad de 10^4 Poises. En este intervalo de temperatura el material puede ser fácilmente formado, estirado o prensado.

b).- Punto de ablandamiento. Es la temperatura a la cual el vidrio tiene una viscosidad de $10^{7.6}$ Poises. En esta viscosidad una barra de vidrio de 24 cm. de longitud y 0.7 mm. de diámetro se alarga 1 mm. por minuto, bajo la fuerza de su propio peso.

c).- Punto de recocido. Es la temperatura a la cual el vidrio tiene una viscosidad de 10^{13} P. Por encima de este punto el vidrio aún sufre fluencia lenta y se puede aliviar el esfuerzo por medio de la conversión de la deformación elástica en deformación plástica. En este punto los esfuerzos internos del vidrio se eliminan en unos 15 minutos.

d).- Punto de deformación. Es la temperatura a la cual el vidrio presenta una viscosidad de $10^{14.5}$ Poises y no se presenta la deformación plástica permanente sin que ocurra fractura del material.

A continuación se muestra una gráfica de la variación de la viscosidad con la temperatura, para los principales vidrios comerciales de silicato.

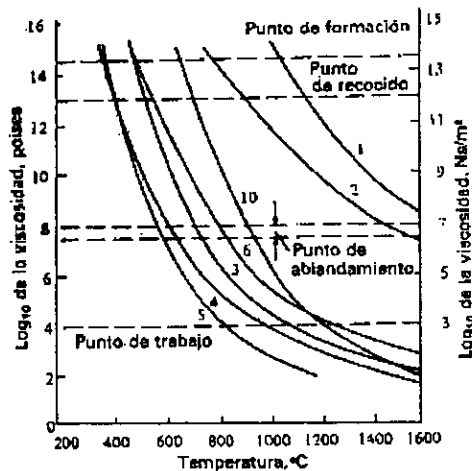


Fig. 11. Gráfica de viscosidad vs temperatura.

* 1.- Sílice fundida. 2.- 96% de sílice. 3.- Sódico-Cálcico. 4.- Plomo silicato. 5 y 6.- borosilicato. 10.- Aluminosilicato.

2).-Medición : El rango de viscosidad importante en la manufactura del vidrio es muy extenso, por lo que no es posible realizar las mediciones utilizando únicamente un métodos de medición. Dos son los métodos más usados frecuentemente para determinar la viscosidad en vidrio, uno es empleado para viscosidades bajas y el otro para altas viscosidades. En viscosidades bajas (10^8 Poises), el método del cilindro rotatorio o crisol parece ser uno de los más confiables. En la fig.13 se ilustran algunas de las características de este aparato diseñado por Dietzel y Brückner⁽²⁴⁾. El equipo está formado por dos cilindros (A y B), hechos de una aleación platino-rodio. El cilindro B se encuentra sostenido coaxialmente en a desde un alambre de torsión C. El espacio entre los cilindros se llena con vidrio del cual se va determinar sus viscosidad. Para medir la temperatura del vidrio es usado un termopar el cual puede ser montado en una cavidad axial en el interior del cilindro. El método de uso común de un viscosímetro de este tipo consiste en hacer girar el cilindro exterior a una velocidad constante Ω en radianes/ segundo y determinar el torque T producido sobre el cilindro interior, midiendo el ángulo θ en el extremo inferior del alambre de torsión. La viscosidad del vidrio se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = (T / 4\Omega l e) (r_o^2 - r_i^2) / (r_o^2 r_o^2)$$

Donde r_i y r_o son respectivamente los radios internos de los cilindros A y B.

$l e$ o " longitud efectiva " es usualmente determinada por calibración del aparato utilizando líquidos de viscosidad conocida.

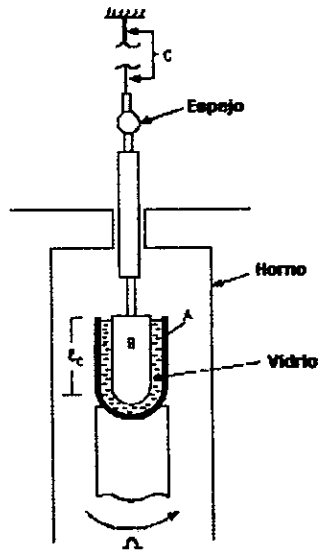


Fig. 12 . Viscosímetro de cilindro rotatorio

Las viscosidades mayores son medidas por el valor en el cual una barra de vidrio es alargada bajo una fuerza fija. La viscosidad está dada por la fórmula:

$$\eta = \frac{L \cdot m \cdot g \cdot f}{3 \pi R^2 u}$$

Donde L es la longitud de la barra de vidrio, R, es su radio, m es su masa suspendida, g es la constante gravitacional, u es una lectura instrumental proporcional al valor de la deformación, y f es un factor de calibración para el instrumento.

3).-Viscosidad en óxidos simples : En el vidrio, la deformación ocurre en un flujo viscoso isotrópico, en donde la resistencia a un esfuerzo aplicado es aportada por la atracción entre grupos de átomos. Esta resistencia se relaciona con la viscosidad η del vidrio, la que a su vez depende de la temperatura. Lo anterior queda expresado en la fórmula:

$$\eta = \eta_0 \exp (Q / RT)$$

Donde : η_0 es el factor preexponencial.

Q es la energía de activación.

La energía de activación Q, se relaciona con la atracción entre grupos de átomos, por lo que la presencia de impurezas, rompe la estructura reticular, lo que permite que los grupos de átomos puedan moverse, provocando una reducción de ésta y la viscosidad, razón por la cual la viscosidad de los óxidos simples decrece rápidamente con la adición de impurezas iónicas (agua en forma de iones OH⁻ y óxidos alcalinos).

3.7. TEMPERATURA DE TRANSICION DEL VIDRIO.

1).- **Definición** : Al medir la expansión térmica de un vidrio, se encuentran dos respuestas mecánicas únicas. Primero, se observa un rompimiento en la curva de expansión a la temperatura T_g . Segundo, hay dos diferentes coeficientes de expansión térmica (pendiente) por arriba y por abajo de T_g . El coeficiente de expansión térmica por debajo de T_g es comparable al de un sólido cristalino de la misma composición y el coeficiente de expansión térmica por arriba de T_g es comparable con el de un líquido. Como resultado T_g se conoce como *temperatura de transición vítrea*, ya que por debajo de T_g el vidrio se comporta como un sólido, y por arriba de T_g el vidrio fluye como un líquido. En este rango de temperatura el vidrio presenta un cambio brusco en su coeficiente de expansión volumétrico (como se observa en la figura 13) , y sus propiedades cambian rápidamente.

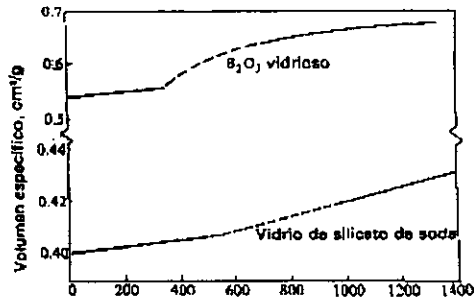


Fig. 13. Temperatura de transición vítrea.

Propiedades tales como: la capacidad calorífica, la conductividad eléctrica, propiedades mecánicas, también cambian bruscamente cuando se acercan a ella.

La temperatura de transición del vidrio es asociada con la velocidad de reacomodo en la estructura del vidrio, así, cuando estos reacomodos ocurren rápidamente el vidrio tiene las propiedades de un líquido y cuando ocurren lentamente la estructura del vidrio se "congela" y se comporta como un sólido. La temperatura de transición del vidrio ocurre en una viscosidad aproximadamente de 10^{13} P.

Cuando un vidrio es enfriado rápidamente de una temperatura por arriba de la región de transición, el enfriamiento conduce a zonas de diferente volumen específico y así a esfuerzos en el material. Estos esfuerzos pueden debilitar la pieza y cambiar sus propiedades, por ello, es deseable eliminar por calentamiento posterior de la pieza, en una temperatura apropiada en la región de transición. En esta temperatura llamada de "recocido" el volumen cambia y así los esfuerzos en el material son relevados, lo que sucede aproximadamente a una viscosidad de $10^{13.4}$ Poises (punto de recocido). Después de esta viscosidad la mayor parte de los esfuerzos son eliminados en un tiempo aproximado de 15 minutos.

El proceso de recocido o relevado de esfuerzos tiene una gran importancia dentro del proceso de manufactura del vidrio como se verá posteriormente.

CAPITULO IV
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL
VIDRIO

IV.- PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

4.1 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Hasta una temperatura de varios cientos de grados centígrados, el vidrio es considerado un sólido con características mecánicas comparables a las de los materiales cristalinos, pero con propiedades que conducen a un comportamiento mecánico único, el cual impone límites y exige peculiaridades de diseño al utilizarlo como material de construcción o ingeniería. Dichas propiedades son:

1) El vidrio no es dúctil: No existe prueba positiva de deslizamiento en frío o deformación en el vidrio sin que se produzca la fractura, esta falta de ductilidad impide el alivio o la distribución de las concentraciones de esfuerzos, en especial las debidas a rayaduras y otras imperfecciones en su superficie. Para un material con módulo de elasticidad elevado y con una resistencia entre regular y elevada como el vidrio, una no ductilidad lo conduce a la fractura astillada.

2) Fractura frágil: En el vidrio ocurre la fractura súbitamente, es decir, sin previa deformación plástica, debido a la existencia de pequeñas grietas que concentran el esfuerzo en sus extremos. De acuerdo a la teoría de Griffith, estas grietas son de forma elíptica, con radios de curvatura en sus puntas de aproximadamente 7 \AA^0 , y se localizan en la superficie y/ o en el interior del material. La producción rutinaria y el manejo del vidrio hacen prácticamente inevitable la presencia de dichas grietas o defectos de Griffith; de ahí que este material *se fractura por fuerzas de tensión y no por compresión* ya que una carga en compresión tiende a cerrar, y no a abrir los defectos de Griffith.⁽²⁸⁾

3) Fatiga estática: Para los metales, la fatiga se define como la pérdida de la resistencia creada por daños microestructurales generados durante cargas cíclicas; para los vidrios el fenómeno de fatiga se observa sin ser sometido a cargas cíclicas (fatiga estática). La razón es que está involucrado un mecanismo químico en lugar de uno mecánico. En el vidrio la fatiga depende de la presencia de agua en el medio ambiente, de la temperatura, composición y tratamiento

superficial. El papel del agua en el deterioro del material es muy importante, ya que al reaccionar químicamente con la red de silicato, una molécula de H_2O genera dos unidades de Si-OH, la unidad de oxhidrilo no están enlazadas una con otra, dejando una ruptura en la red de silicato, y cuando la reacción ocurre en la punta de una grieta de la superficie, está se prolonga aún, un paso en la escala atómica, el proceso se incrementa con la temperatura y cuando el vidrio tiene en su composición óxidos muy susceptibles al ataque químico tales como Na_2O y K_2O .⁽²⁶⁾

4) Dureza: Aunque los términos "blando" y "duro" son utilizados ampliamente en la industria del vidrio, sirven para indicar temperaturas de ablandamiento altas o bajas del material, y no para describir la dureza mecánica, la cual se define como la resistencia a la abrasión o penetración superficial.

La dureza no es una propiedad única, pero es una medida de la reacción de un material al tipo de fuerza que se le imponga. La dureza es una función del método de prueba y las condiciones bajo las cuales dichas pruebas se apliquen. Algunas pruebas de dureza aplicadas al vidrio son las siguientes:

a) Prueba de rayado: También conocida como prueba de Mohs, consiste en observar si un material puede ser rayado por otro. En la escala utilizada por esta prueba la dureza del vidrio se encuentra entre 4.5 y 7, es decir es más duro que el hierro dulce, pero no tan duro como el hierro templado.

b) Prueba de hendiduras: O prueba de Bierbaum, en la cual un material duro y punteagudo como el diamante se carga y desliza a través de la superficie del vidrio para hacer rayaduras o hendiduras.

La dureza puede ser expresada como la carga requerida para producir una rayadura de un ancho definido o como el ancho de una hendidura producida por una carga establecida. Esta prueba dió valores para los vidros desde 688 para el vidrio con alto contenido de plomo a 1700 para el de aluminosilicato.

c) Prueba de erosión: Es una variación de la prueba de abrasión, en la cual se incendian granos abrasivos en la superficie de la muestra y la pérdida de peso en la unidad de tiempo se

emplea como medida de la dureza, los valores van de 0.57 para el vidrio con un alto contenido de plomo a 1.52 para el vidrio de borosilicato.

d) Prueba de indentación: Esta prueba se realiza imprimiendo en la muestra un marcador o indentador de geometría determinada, bajo una carga conocida que se aplica directamente o por medio de un sistema de palanca. La carga por unidad de área de impresión es considerada la dureza del material. En las pruebas realizadas en el vidrio se utiliza un indentador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° . El intervalo de carga generalmente está entre 1 y 120 Kg. La dureza DHP (conocida como Vickers, "VH"), se expresa en kilogramos de carga por área de impresión en milímetros cuadrados.

Para el ensayo de microdureza se emplea impresiones pequeñas, con cargas de prueba de entre 1 y 1000g, además de emplearse un indedor de forma piramidal, se utiliza el marcador Knoop cuya base es un rombo, con ángulos de $170^{\circ} 30'$ y 130° , respectivamente. El número de dureza Knoop (KHN) es expresado como kilogramos de carga divididos en área de impresión en milímetros cuadrados.

Los valores de dureza VH_{50} , están entre 270 para el vidrio de alto contenido de plomo a 710 del vidrio de sílice fundida, y los valores para la dureza KHN_{50} se encuentran entre 250 y 575 para los mismos vidrios.

* El subíndice 50 indica que se utilizó una carga de 50g. para realizar las pruebas de dureza*.

Resulta importante remarcar que se duda mucho que se haya hecho alguna prueba de indentación en la que no se haya producido por lo menos alguna minúscula fractura de la superficie del vidrio al efectuarla y por consiguiente, los valores de dureza de indentación resultan sospechosos.⁽¹¹⁾

El incremento en el uso del vidrio como material estructural enfatiza la importancia de su comportamiento bajo esfuerzos y de las condiciones que gobiernan su fractura. Desde el punto de vista mecánico, el vidrio es un material frágil, dado que se fractura sin previo aviso ni deformación

plástica permanente , por lo que uno de los mayores desafíos en la ciencia de este material es incrementar su resistencia mecánica.

4.2 ENDURECIMIENTO DEL VIDRIO.

La resistencia mecánica del vidrio está determinada por las condiciones en las que se encuentra su superficie, ésta puede incrementarse ampliamente por la eliminación de imperfecciones o grietas superficiales o introduciendo esfuerzos residuales de compresión en su superficie para contrarrestar algunos esfuerzos internos presentes o esfuerzos de tensión aplicados. Se han desarrollado dos tipos de tratamientos para el reforzamiento del vidrio. El primero consiste en un tratamiento térmico para remover los esfuerzos residuales internos , originados por el enfriamiento rápido del material (recocido). El segundo tipo de tratamiento incluye un esfuerzo de compresión en la superficie el cual puede ser introducido por un tratamiento térmico (temple) o un tratamiento químico (intercambio de ion, cristalización superficial).

1) **RECOCIDO** : El enfriamiento del vidrio de su rango de trabajo a temperatura ambiente es rápido y en la práctica resulta en esfuerzos internos en el material, lo que afecta su resistencia y propiedades físicas. Este problema puede eliminarse por un tratamiento térmico adecuado, el cual consiste en calentar el vidrio por un periodo suficientemente largo en el rango de su temperatura de recocido y enfriarlo lentamente a temperatura ambiente. La experiencia muestra que para evitar los esfuerzos en el vidrio, el enfriamiento debe ser muy lento durante un intervalo corto en la vecindad de la temperatura de transición del vidrio, posteriormente puede procederse a una velocidad de enfriamiento más rápida.

En la temperatura de recocido la viscosidad del vidrio es lo suficientemente baja como para permitir un ligero flujo viscoso en la masa, lo que resulta en la relajación de los esfuerzos internos, el tiempo estimado para que ocurra esta relajación se estima en aproximadamente 100 s, aunque puede variar para los diferentes tipos de vidrio. En la práctica los tiempos de recocido están basados en la experiencia, y la velocidad óptima para el enfriamiento depende de las propiedades requeridas en el vidrio así como del tamaño de la pieza a tratar.

Un proceso adecuado de recocido produce un vidrio libre de esfuerzos internos o tensiones resultando en una densidad más alta y un índice de refracción mayor.

Los vidrios ópticos son recocidos por un largo período y enfriados muy lentamente en la vecindad de su temperatura de transición (de 0.5 a $1^{\circ}\text{C} / \text{h}$), ya cualquier esfuerzo interno en la pared del vidrio origina una doble refracción, la cual no puede ser aceptada en los vidrios ópticos.

Aunque los recipientes de vidrio ordinarios pueden ser enfriados a una velocidad mayor, el tamaño de la pieza es muy importante como ya se mencionó, por ejemplo el espejo de 5000 mm de diámetro construido para ser utilizado en observatorio de Monte Palomar, fue enfriado a una velocidad de $1^{\circ}\text{C} / \text{día}$, en un rango de temperatura de 500 a 300°C .

2) TEMPLADO: O endurecimiento térmico, incluye un calentamiento uniforme del vidrio en su temperatura de recocido para inducir un ligero flujo viscoso y después un enfriamiento rápido de las dos caras del vidrio por una ráfaga de aire, abajo de la temperatura de transición, lo que origina que la superficie del vidrio se ponga rígida, en tanto que su interior está aun en estado viscoso. Con nuevo enfriamiento, la parte interior se contrae, originando esfuerzos de compresión en la superficie del vidrio, en tanto que el interior permanece en tensión.

La introducción de esfuerzos de compresión contrarresta cualquier esfuerzo de tensión que pueda ser desarrollado sobre el material, lo que incrementa notablemente la resistencia del vidrio.

El vidrio templado alcanza una fuerza de hasta 140 Mpa y una resistencia al impacto de 3 a 5 veces más que el vidrio recocido y conserva la misma apariencia, claridad, dureza y coeficiente de expansión que el vidrio original; el vidrio templado además no puede ser cortado, moldeado o afilado, ya que resultaría en su desintegración en pequeños e inofensivos fragmentos. Razón por la cual todas las operaciones de mecanizado, deben realizarse antes de que el vidrio sea templado.

3) ENDURECIMIENTO QUIMICO: Incluye cambios en la composición de la capa superficial del vidrio, lo cual resulta en un material con menor coeficiente de expansión térmica en su superficie, aunque en interior mantiene su coeficiente de expansión térmica. Así que en el enfriamiento, el interior se contrae mucho más que su superficie, originando esfuerzos de

compresión en la superficie del vidrio. El endurecimiento químico puede llevarse a cabo por lo siguientes métodos: a) Intercambio de ion, b) cristalización superficial, c) Proceso de esmaltado.

a) Intercambio de ion : Consiste en el calentamiento de un vidrio de sosa-alúmina-titania-silíce en un baño de sulfato de litio fundido a una temperatura de 600° C. Los pequeños iones litio se difunden en el vidrio, reemplazando a los iones sodio. Cuando el mismo vidrio se sumerge en una baño de sal de potasio fundida, los iones sodio son reemplazados por iones potasio. Lo anterior provoca un cambio en el coeficiente de expansión térmica de la superficie, por lo cual, cuando el vidrio se enfría, se desarrolla en su superficie un esfuerzo de compresión. La cantidad de reforzamiento por este proceso dependerá de la composición de vidrio, del tiempo y la temperatura de intercambio. Usualmente la cantidad de esfuerzo de compresión en la superficie es proporcional a la cantidad de intercambio que haya tenido lugar, así mismo, una temperatura más alta y un tiempo más prolongado llevan a un mayor reforzamiento.

b) Cristalización superficial : Este proceso incluye la nucleación de cristales, en vidrios de litio-aluminosilicatos, utilizando como agente de nucleación el óxido de titanio. Una cristalización superficial puede resultar también de un ion intercambiado arriba de la temperatura de transición del vidrio. La presencia de cristales en la superficie lleva a un menor coeficiente de expansión térmica que el que se tiene en el interior, por lo que se desarrolla un esfuerzo de compresión superficial, cuando el vidrio es enfriado. Para el reforzamiento del vidrio por cristalización superficial hay un espesor óptimo de la capa superficial que es de 0.07mm.

c) Esmaltado : La superficie del vidrio es cubierta con un vidrio finamente pulverizado o material cristalino, y cocido en un horno para producir el esmaltado.

Un vidrio endurecido químicamente es más fuerte que un vidrio templado, ya que puede alcanzar una resistencia tan grande como 690 MPa.

Los vidrios con coeficientes de dilatación bajos (resistentes al calor) tienen una resistencia mayor al rayado de su superficie y en consecuencia tienen una duración mecánica mayor, además permiten usar paredes más gruesas en diversos artículos sin sacrificar por ello su resistencia a los cambios de temperatura en gran medida y son por lo tanto mecánicamente más fuertes.⁽¹⁰⁾

4.3 PROPIEDADES TERMICAS.

1).-Choque térmico: El uso común de vidrios a altas temperaturas, combinado con su fractura frágil inherente conducen a un problema especial de ingeniería llamado choque térmico, el cual puede definirse como como la fractura parcial o total del material como resultado de un cambio brusco de temperatura; generalmente un enfriamiento repentino. El choque térmico es una consecuencia de las propiedades de expansión y conductividad térmica en una de dos formas. Primera, un esfuerzo de falla puede generarse por la contracción uniforme debido a la expansión térmica; este proceso es equivalente a la expansión libre seguida por la compresión mecánica a la longitud original, la fractura se produce por un esfuerzo de compresión excesivo y repentino. Segunda, los cambios rápidos de temperatura producen gradientes de temperatura temporales en el material lo que origina un esfuerzo interno (residual), con el enfriamiento rápido de la superficie de una pared a alta temperatura que está acompañado por esfuerzos de tensión superficiales. La superficie se contrae más que el interior, el cual está aún relativamente caliente, como resultado la superficie "jala" al interior en compresión y es así mismo "jalada" en tensión, con la inevitable presencia de los defectos de Griffith en la superficie, este esfuerzo de tensión en la superficie crea un claro potencial para la fractura por fragilidad. La capacidad de un material para resistir un determinado cambio de temperatura depende de una combinación compleja de expansión térmica, conductividad térmica, geometría del artículo , espesor de las paredes y la inherente fragilidad del material. ⁽⁴³⁾

Para entender el mecanismo del choque térmico se deben considerar dos propiedades fundamentales del vidrio : a) la expansión térmica y b) la conductividad térmica.

a).Expansión térmica : Un incremento en la temperatura conduce a una vibración térmica mayor de los átomos de un material y al aumento en la distancia promedio de separación de átomos adyacentes. En general la dimensión total del material en una determinada dirección, L, se

incrementa conforme aumenta la temperatura, T. Esto se ve reflejado en el coeficiente lineal de expansión térmica α , cuya expresión matemática es:

$$\alpha = dL / LdT$$

Donde :

α = coeficiente de expansión térmica lineal en $cm/cm/^{\circ}C$

El coeficiente de expansión térmica para el vidrio por lo general es medido en un rango de 0° a $300^{\circ}C$, dentro de este rango la expansión es prácticamente lineal con la temperatura.

La medición del coeficiente de expansión térmica se lleva a cabo utilizando un dilatómetro provisto de un instrumento de precisión que pueda apreciar muy pequeñas variaciones de longitud (extensómetro calibrado para medir los cambios de longitud de la muestra sobre una longitud mínima de 1.25 mm y con una aproximación de ± 0.003 mm), con un tornillo micrométrico calibrado, que permita lecturas directas de 0.0025 mm, la muestra se soporta entre varillas de sílice vítrea que posee muy baja expansión térmica.

Cuando se requieren datos de expansión térmica abajo de $100^{\circ}C$, se utiliza un baño caliente en un horno eléctrico capaz de mantener una diferencia entre las temperaturas máxima y mínima de la muestra de $2^{\circ}C$. Las dimensiones de las muestras deben estar entre 51 y 127 mm de longitud y un diámetro mínimo o espesor de 4.7 mm o 1/6 de la longitud total de la muestra.⁽⁴¹⁾

El coeficiente de expansión está relacionado directamente con la composición química del vidrio, la presencia de óxidos modificadores en los vidrios de silicato, aumentan el coeficiente de expansión térmica, ésto se utiliza para combinar en forma apropiada los diversos óxidos y obtener una amplia gama de coeficientes de dilatación térmica. A continuación se muestra una tabla de coeficientes de expansión térmica de algunos vidrios comerciales

TIPO DE VIDRIO	COEF. EXP. 0 - 300°C (cm/ cm/ °C) x 10 ⁻⁷
Vidrio de plomo	100
Vidrio sosa cal	100 - 80
Vidrio de borosilicato	65 - 50
Vidrio de borosilicato baja exp.	48 - 33
Vidrio 96% de sílice	8
Vidrio de sílice fundida	5.5
Vidrio Pyroceram	0 -

Tabla 7. Coeficientes de expansión térmica.

b) Conductividad térmica: la conductividad a temperatura ambiente de diversos vidrios varía entre 0.0018 y 0.0033 cal / s.cm. ° C. presentando los valores más altos aquellos con un buen contenido de Sílice. El vidrio con Boro también presenta una alta conductividad (0.0028) a 25 ° C, por lo que a menudo en aplicaciones de transmisión de calor.

Ahora bien, si es cierto que la conductividad del vidrio es mucho menor que la de los metales, éste puede usarse con éxito en utensilios de cocina que se introduzcan al horno o bien en intercambiadores de calor.

Por ejemplo: los utensilios de vidrio cuecen en el horno su contenido en menos tiempo que los metálicos brillantes, ya que el vidrio refleja menos calor y por consiguiente muchas menos radiaciones caloríficas incidentes; en los intercambiadores de calor, la transmisión de calor depende en gran parte de coeficientes de transmisión de calor por películas superficiales y cuando la resistencia de la película es elevada, la eficiencia total de un intercambiador hecho con tubos de vidrio puede aproximarse a la de un aparato hecho con tubos de metal.

La superficie del vidrio no se recubre de óxido y tiene tendencia menos marcada en general a adquirir películas.

En resumen el rendimiento total de un intercambiador de vidrio, no disminuye apreciablemente con el transcurso del tiempo, mientras que el rendimiento de un intercambiador metálico puede trabajar hasta un valor comparable al de un aparato hecho con vidrio.

2) Calor Específico : Para los vidrios comerciales tiene un valor aproximado de 0.20 cal/g °C

3) Resistencia térmica :La capacidad para resistir sin romperse o rajarse, cambios rápidos o desiguales de temperatura se denomina "Resistencia al choque térmico", la expansión térmica, la rigidez mecánica, el espesor de la pared, el grado de dificultad en la forma del artículo y la conducción son factores que afectan la resistencia térmica disminuyéndola.

La prueba para determinar la resistencia térmica consiste en calentar una barra de vidrio y sumergirla en agua fría. Por ejemplo el vidrio de borosilicato resiste 325 °C, en tanto que el vidrio sódico-cálcio normal sólo 112 °C, sin presentar fractura.

4.4 PROPIEDADES OPTICAS.

El vidrio utilizado en las ventanas es un material estructural transparente por tradición, ésta y otras propiedades ópticas, hacen del vidrio un elemento indispensable en muchas aplicaciones en ingeniería.

A continuación se tratarán las principales propiedades ópticas del vidrio.

a) Índice de refracción : Una de las propiedades ópticas fundamentales es el índice de refracción n , que se define como:

$$n = V_{vac} / V = \sin \theta_i / \sin \theta_r$$

donde V_{vac} es la velocidad de la luz en el vacío (esencialmente igual que en el aire), V es la velocidad de la luz en un material transparente, θ_i y θ_r son los ángulos de incidencia y refracción, respectivamente. Los valores típicos de n van de 1.458 para la sílice fundida a 1.717 del vidrio de bario, lo que significa que la velocidad de la luz es considerablemente menor en el sólido que el vacío. Una implicación de la magnitud del índice de refracción n , es la apariencia característica.

El "brillo" distintivo asociado con los diamantes y obras de arte de vidrio es el resultado de un alto valor de n , el cual permite múltiples reflexiones internas de luz. Las adiciones de óxido de

plomo ($n = 2.6$) a vidrios de silicato elevan su índice de refracción, dando la apariencia distintiva y el costo asociado a los artículos finos de " cristal".

b) Reflectancia : No toda la luz que choca con un vidrio transparente entra al material para ser refractada como se mencionó anteriormente. Parte de la luz se refleja en la superficie . El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. La reflectancia, R, se define como la refracción de luz reflejada en esa interfase y está relacionada con el índice de refracción por la fórmula de Fresnel :

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

Esta ecuación es válida para incidencia normal ($\theta_i = 0$), sin embargo es una buena aproximación para un amplio rango de θ_i . Es evidente que materiales con n altos también son muy reflejantes.

En algunos casos, esto es deseable, como en cubiertas de esmalte " lustrosas". En otros casos, como en aplicaciones de lentes, la alta reflectividad produce pérdidas indeseables de luz. Para minimizar este problema, se utilizan con frecuencia revestimientos especiales como, un revestimiento de espesor de " un cuarto de longitud de onda" , que minimiza la reflectividad en la superficie.

El revestimiento tiene un índice de refracción intermedio y la onda reflejada primaria es justamente cancelada por la onda reflejada secundaria de igual magnitud y de fase opuesta.

Estos revestimientos se usan por lo común en lentes de microscopio.

c).-Transparencia : Se define como la capacidad para transmitir una imagen clara, siendo ésta una de las propiedades que caracterizan al vidrio. En otros materiales como en el caso de los metales su opacidad o no transmisión de la imagen es el resultado de un mecanismo de absorción íntimamente asociado con su conductividad eléctrica, debido a que, los electrones de conducción

absorben fotones en el rango de luz visible, dando una opacidad característica a todos los metales. La ausencia de electrones de conducción en los vidrios establece su transparencia.

d).- Color : La coloración en los vidrios se produce por la absorción selectiva de ciertos rangos de longitud de onda dentro del espectro visible.

El vidrio se colorea con iones de elementos de transición, debido a que, los iones de configuración de gas noble, o similar a esta ($s^2 p^6 d^{10}$), son incoloros, en tanto que los iones que tienen capas d y f incompletas suelen ser coloreados.

Ahora bien, debido a que los iones no actúan de manera independiente a la matriz vítrea, un ión puede dar diferentes colores dependiendo del número de coordinación que tenga en los distintos tipos de vidrios (ver tabla 8).

Estos colores resultan de la interacción de los electrones de la capa interna de los elementos de transición con los fotones de varias longitudes de onda de la luz blanca y color característico que emerge es el de la parte no absorbida del espectro visible.

Las tierras raras también producen vidrios coloreados debido a la interacción electrónica en la capa 4f.

ION	No. de coordinación	Color del vidrio
Cr^{2+}		azul
Cr^{3+}	6	verde
Cr^{6+}	4	amarillo
Cu^{2+}	6	azul-verdoso
Cu^{1+}	8	incoloreo
Co^{2+}	4-6	azul-morado
Co^{2+}	8	rosa
Ni^{2+}	6	morado
Ni^{2+}	8	amarillo-verdoso
Mn^{2+}	4-6	cafe
Mn^{2+}	8	anaranjado
Mn^{3+}	6	morado

Tabla 8. Colores proporcionados por diferentes iones en vidrios de silicato.

ION	No. de coordinación	Color del vidrio
Fe ²⁺	4	azul
Fe ²⁺	6-8	azul-verdoso
Fe ³⁺	4	verde
Fe ³⁺	6	amarillo claro
U ⁶⁺	6-10	amarillo claro
V ³⁺	6	verde
V ⁴⁺	6	rojo
Ti ³⁺	6	morado
Fe y Mn		ámbar
Mn, Fe y Cu		gris
Mn, Co y Cu		negro

Continuación Tabla 8. Colores proporcionados por diferentes iones en vidrios de silicato.

4.5 RESISTENCIA AL ATAQUE QUIMICO.

El vidrio ha sido famoso desde hace mucho tiempo por su gran resistencia al ataque de casi todas los compuestos químicos y dado que hoy en día las demandas en éste sentido son cada vez mayores debido a que en sus aplicaciones , está expuesto a los agentes atmosféricos y una gran cantidad de soluciones químicas, que pueden disminuir apreciablemente la lisura y la transparencia original de su superficie, se han dado los estudios de la rapidez de ataque de los vidrios de diferentes composiciones; sin embargo esta relación es una función compleja, y puede ser afectada por las condiciones en las que se realice la prueba. Lo que se ha sacado en claro es que el contenido de metales alcalinos en el vidrio es el factor más importante: un contenido alto de metales causa poca durabilidad y los óxidos de B, Al, Zn, Zr, mejoran en algunos casos esta propiedad. Prueba de ello es que los vidrios hechos de Borosilicato son los más utilizados en la industria química, debido a su excelente resistencia al ataque de prácticamente todas las sustancias.

Los vidrios comerciales de Silicato son atacados por los siguientes compuestos químicos:

- 1) Acido fluorhídrico.
- 2) Acido fosfórico concentrado y caliente.

3) Soluciones alcalinas concentradas y calientes.

Las soluciones alcalinas frías, diluidas o concentradas atacan al vidrio muy lentamente.

Las condiciones al ataque químico se recrudecen al formar en los vidrios, pequeños granos que aumenten la superficie de ataque y como ya se mencionó, cuando aumenta la temperatura.

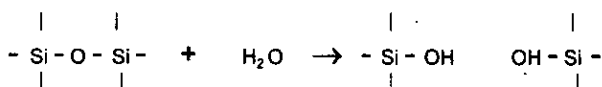
Es importante tener en cuenta estas consideraciones, para seleccionar un tipo adecuado de vidrio, para evitar que pueda disolverse y afecte a los líquidos almacenados en ellos.

Cabe remarcar que en virtud de su resistencia al ataque e inercia química, el vidrio se utiliza en las industrias de productos alimenticios, de medicamentos, reactivos químicos y en general en todas las ramas de la industria química.⁽¹¹⁾

4.6 REACCIONES QUIMICAS.

1).- Reacciones con gases : Los gases tales como el agua e hidrógeno pueden reaccionar con la red silicio-oxígeno de los vidrios de silicato, rompiéndola y consecuentemente modificando propiedades como resistencia y viscosidad, aún más, el hidrógeno y el oxígeno determinan su estado de oxidación y pueden reducir u oxidar iones en el vidrio. Todos los gases se disuelven y difunden en el vidrio de sílice, pero la proporción de su reacción con el vidrio está determinada por su coeficiente de difusión y de la temperatura.

a).- Agua: El agua reacciona con los enlaces silicio-oxígeno de la siguiente forma:



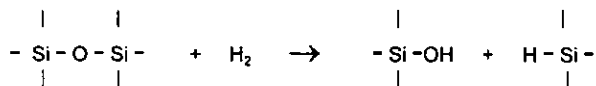
Como se observa en la reacción se forman pares de grupos SiOH, los cuales permanecen fijos aún a temperaturas tan altas como 1000°C.

La solubilidad del agua en la sílice fundida es proporcional a el número de grupos SiOH formados en la reacción por unidad de volumen, cuando el vidrio está en equilibrio, con vapor de agua a una presión fija; para un rango de temperatura de 1200°C a 700°C es de 3×10^{-3} grupos SiOH formados por grupo SiO₂ en el vidrio, con agua a la presión de 700 mmHg, por abajo de estas

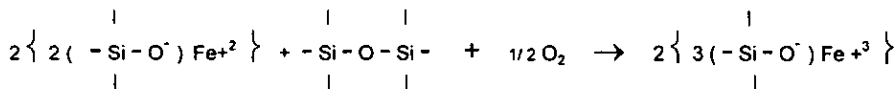
temperaturas, la solubilidad se verá grandemente influenciada por la historia térmica del vidrio y su composición. Cuando óxidos alcalinos son agregados a la sílice, debilitan el enlace silicio-oxígeno, y lo vuelven más reactivo, por lo que la solubilidad del vidrio se incrementa proporcionalmente con la concentración de los iones alcalinos en el siguiente orden $\text{Li} < \text{Na} < \text{K}$.⁽²⁶⁾

b) Hidrógeno : El hidrógeno también reacciona con la sílice para formar grupos hidroxilos.

En la sílice fundida que contiene 50 a 100 ppm de aluminio, la reacción se transforma visible arriba de 700° C. En la sílice pura no ocurre apreciablemente en estas temperaturas, pero en altas temperaturas o presiones, el hidrógeno forma grupos hidroxilo de enlaces Si-O-Si en una reacción que puede escribirse como:



c) Oxígeno : El oxígeno disuelto en el vidrio determina el " estado de oxidación " del vidrio, si uno o más iones con diferentes valencias están presentes. Por ejemplo el oxígeno con iones de hierro en vidrios de sílice:



La reacción de oxidación del vidrio da como resultado la formación de un grupo aniónico adicional Si-O^- u oxígeno no enlazado, esta reacción se ve favorecida con la presencia de óxidos alcalinos. Ahora bien, la oxidación del vidrio puede analizarse partiendo de los conceptos de ácido-base. Así, los óxidos formadores de vidrio tales como la sílice o el óxido bórico, son considerados ácidos y los óxido alcalinos y alcalinotérreos bases. La designación se justifica a partir de la definición de ácido de Lewis, en el sentido de la carga negativa de los grupos formadores de vidrio (SiO^-), que resulta de la reacción con un óxido metálico, haciendo a la sílice un aceptor de electrones y al catión metálico un donador de electrones; así mismo cuando los óxidos formadores

de vidrio son disueltos en agua forman ácidos muy débiles, puesto que los óxidos alcalinos y alcalinotérreos forman bases fuertes.

En función de los conceptos de acido-base, se establece que la facilidad para que se lleve a cabo una reacción de oxidación en el vidrio se incrementa con la concentración de los óxidos alcalinos, lo cual es considerado como resultado del incremento de la basicidad del vidrio. En una reacción tal como:



La formación del ion cromato en el vidrio fue incrementada por la concentración del álcali. Aunque aún no es claro como este grupo se incorpora dentro de la red vítrea.

Cuando más de un ion con dos valencias se encuentra presente en el vidrio en cantidades apreciables, su grado de oxidación será determinado por el equilibrio de la reacción entre los dos iones presentes.

La relativa facilidad para oxidarse de diversos iones fue determinada de datos termodinámicos de los óxidos puros, encontrándose el siguiente orden:

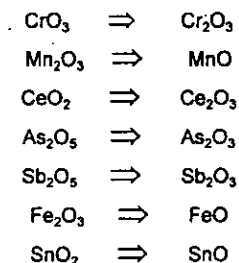
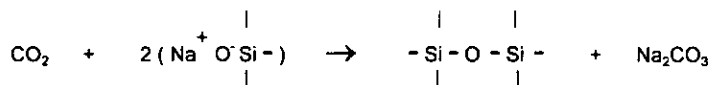


Tabla 9. Tendencia a la oxidación de los iones en el vidrio.

De los pares que se muestran en la tabla el cromo es el que presenta mayor facilidad para ser reducido y el estaño es el más fácil de oxidar.

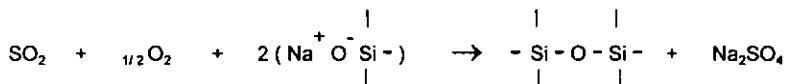
d) Nitrógeno: El nitrógeno puede reaccionar con el vidrio fundido bajo condiciones reductoras, formando tres enlaces Si-N. La solubilidad del nitrógeno se incrementa con la temperatura, pero decrece con la cantidad de álcalis en el vidrio. Desde el punto de vista de oxidación-reducción este resultado es consistente, con el resultado de la mayor reducción de los vidrios conforme se incrementa el contenido de sílice, debido probablemente a la formación de fuertes enlaces de Si-O.

e) Bióxido de carbono: La solubilidad del bióxido de carbono en el vidrio de sodio silicato se incrementa rápidamente arriba de 1100 o 1200^o C, dependiendo de la composición. Una alternativa para escribir la reacción del bióxido de carbono con el vidrio de sodio silicato es:



La entidad formada en el vidrio no es probablemente una molécula simple de carbonato de sodio, sino alguna combinación más compleja de estos iones con el retículo de silicato.

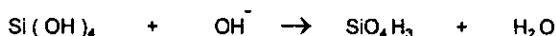
f) Bióxido de azufre: El bióxido de azufre también se disuelve en los silicatos fundidos. La reacción para formar un sulfato alcalino es complicada por la necesidad de oxígeno para formar el sulfato del bióxido de azufre. De esta forma, su solubilidad en silicatos alcalinos se incrementa cuando la concentración del óxido alcalino aumenta y decrece cuando la temperatura disminuye. La reacción con el silicato alcalino puede ser escrita de la siguiente forma:



1).- REACCIONES DEL VIDRIO CON AGUA Y SOLUCIONES ACUOSAS.

La velocidad de reacción de un vidrio con el agua es un elemento determinante en su utilización para usos tales como contenedores de líquidos, estructurales o elementos ópticos en una atmósfera húmeda. Las pruebas usuales para la durabilidad química incluyen la exposición del vidrio al agua, en soluciones acuosas o atmósferas húmedas por cierto tiempo y temperatura.

La solubilidad de la sílice vítrea en agua a 25° C es de 0.012 % en peso. Las especies que se encuentran disueltas son monómeros no ionizados del ácido silícico $\text{Si}(\text{OH})_4$. Este valor de la solubilidad permanece constante en valores de $\text{pH} = 1$ hasta $\text{pH} = 8$, por arriba de lo cuales aumenta rápidamente por la ionización del ácido silícico:



Entre los 25 y 200° C la solubilidad de la sílice vítrea se incrementa proporcionalmente con la temperatura, alcanzando un valor de 0.83 % en peso a 200° C.

El ataque inicial del agua sobre un vidrio de álcali silicato incluye el intercambio entre los iones alcalinos en el vidrio y los iones hidrógeno en el agua.



El hidróxido de sodio formado lleva a un rápido incremento del ataque de la red de silicato. Los coeficientes de difusión iónica en las capas hidratadas de la superficie son mucho mayores que en el vidrio seco, particularmente para los vidrios de sodio silicato, lo anterior puede deberse al reemplazo de iones sodio por pequeños iones hidrógeno, lo que permite una difusión mayor a través de la red vítrea ya que se encuentra más "abierta". En tanto el ion se sigue intercambiando en las capas de la superficie, la red se transforma en una estructura más abierta; y las moléculas de agua pueden difundirse más rápidamente, así se incrementa la velocidad de reacción del agua con el retículo.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

La durabilidad química de los vidrios de sodio silicato se incrementa cuando son agregados óxidos alcalino térreos , probablemente como resultado de una reducción de los coeficientes de difusión de los iones sodio por iones alcalinotérreos.

La relativa velocidad de ataque de los vidrios de sílice por ácidos generalmente es paralela a una solución neutra, excepto cuando tienen óxidos de plomo y boro, que son atacados rápidamente con una solución básica.

La adición de alúmina a un vidrio de álcali silicato incrementa su durabilidad química, por disminución del número de iones sodio de la superficie que intercambia por iones hidrógeno de la solución.

Los vidrios que contienen alúmina son atacados más rápidamente en soluciones ácidas, en contraste con su comportamiento en solución básica; aparentemente porque el óxido de aluminio hidratado actúa como una base débil en solución ácida haciéndolo más estable.

Los vidrios de sílice se debilitan rápidamente en HF , aparentemente por la formación de complejos silico fluoruros en solución ácida . La reacción de moléculas en solución con ácido fluorhídrico puede escribirse como:



El ácido fluorsilícico H_2SiF_6 es un ácido fuerte, que es ionizado en agua casi tan extensamente como el ácido sulfúrico, también es posible que los iones fluoruro reaccionen directamente con enlaces Si-O en el retículo de silicato. ^(11, 10)

CAPITULO V
UTENSILIOS DE LABORATORIO

V. UTENSILIOS DE LABORATORIO.

El vidrio es famoso desde hace mucho tiempo por su extraordinaria resistencia al ataque de casi todos los compuestos químicos, de ahí, el uso tan extenso de este material en los laboratorios de química y biología. Su buena estabilidad ha resultado en líneas de utensilios de vidrio de formas clásicas y medidas normalizadas para operaciones de laboratorio tales como: ebullición, extracción, destilación y filtración, etc.

Dentro del grupo de utensilios de laboratorio se incluye a: vasos de precipitados, cajas petri, tubos de ensayo, llaves de paso, matraces, pipetas, probetas, buretas, refrigerantes, juntas esmeriladas, frascos, es decir cualquier objeto de vidrio utilizado en el laboratorio ⁽⁴⁴⁾, los cuales se describen a continuación:

5.1. RECIPIENTES VOLUMETRICOS.

La necesidad de mezclas y concentraciones exactas de soluciones nos llevan a la utilización en el laboratorio de este tipo de recipientes, los cuales están destinados a contener o medir cantidades determinadas de líquidos y dependiendo de su uso y forma se les denomina: pipetas, buretas, matraces, probetas, vasos de precipitados, etc

La graduación de los recipientes volumétricos se indican por medio de líneas marcadas en la superficie exterior, las cuales se producen grabándolas con ácido fluorhídrico, tallándolas con un disco o soplete abrasivo, o bien tñéndolas con materiales que al ser calentados colorean una capa delgada del vidrio.

Las líneas grabadas o talladas se colorean generalmente llenándolas con esmaltes cerámicos que luego se funden al vidrio o tñéndolas.

Algunas veces las marcas de capacidad se producen directamente en la superficie del vidrio fundiendo capas delgadas de esmalte cerámico, aunque cabe mencionar que esta técnica es poco

recomendable, ya que existe el peligro de que se pierdan las marcas, bajo un uso continuo, por abrasión del esmalte o la reacción química de soluciones concentradas.

Además de las líneas que indican volúmenes, también se marcan los valores numéricos de los mismos en el sistema de medidas apropiado, así mismo, la temperatura de calibración es generalmente indicada también debido a que el volumen del recipiente de vidrio cambia ligeramente de acuerdo a la temperatura.

En el grupo de recipientes volumétricos utilizados en el laboratorio se encuentra una gran variedad de formas y capacidades nominales, las cuales van de 1 a 9000 ml, o bien pueden elaborarse de la capacidad que se requieran (50, 51, 52, 53, 54)

A continuación se muestran algunos de los recipientes volumétricos de uso común.

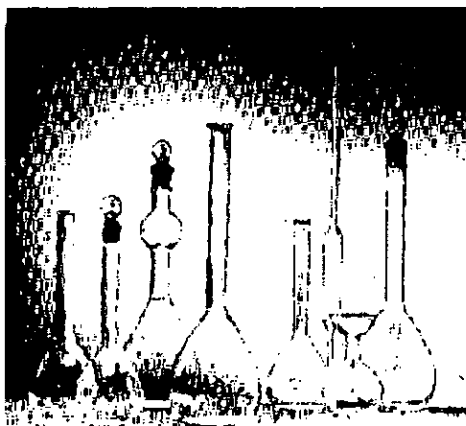


Fig. 14. Recipientes volumétricos.

5.2. LLAVES DE PASO.

Las llaves de paso son usadas como válvulas de flujo en diferentes equipos y tuberías. Las llaves de paso eliminan las probabilidades de contaminación y permiten un mejor control del flujo. De acuerdo a sus características se clasifican en dos estilos:

Estilo 1 : de dos vías.

Estilo 2 : de tres vías.

De acuerdo a su uso existen las de uso general y las utilizadas en requerimientos de vacío, la diferencia entre ambas, es la gran precisión de ajuste entre la línea y el obturador de las llaves al alto-vacío.

Las llaves de paso son designadas por el diámetro interior del orificio de salida del flujo y de acuerdo a su estilo se encuentran disponibles en los siguientes tamaños nominales ⁽⁴⁴⁾ :

Estilo 1: de 1 a 15 mm.

Estilo 2 : de 1 a 4 mm.

* Pueden ser elaboradas de acuerdo a las dimensiones que se requieran en ambos estilos.

5.3 TUBERIAS.

En los laboratorios son muy utilizadas las tuberías de vidrio, éstas pueden estar en forma de interconexión entre las partes que integran un equipo de prueba, o pueden ser usadas para transportar cantidades determinadas de fluidos de una sección a otra del laboratorio.

Así mismo, algunos artículos de laboratorio son hechos en operaciones secundarias en la fábrica misma o bien, en el laboratorio por el usuario.

Se ha establecido una línea de medidas para tuberías de vidrio para uso de laboratorio, los diámetros exteriores expresados en milímetros van de 3 a 100 mm.⁽¹¹⁾

5.4..UTENSILIOS ESMERILADOS.

Son piezas de vidrio formadas por una porción cónica truncada y esmerilada en su cara lateral y otra de sujeción que permite su inserción y extracción manual, siendo y son intercambiables entre envases con boca esmerilada de las mismas dimensiones nominales.

Son los medios para llevar a cabo la conexión de diversas piezas del equipo de laboratorio, se utilizan en cuellos de matraces volumétricos, de destilación, tuberías, refrigerantes, frascos y en

todos los utensilios de laboratorio donde las temperaturas de trabajo sean elevadas o bien, se desee proteger de fugas o contaminación a los líquidos. Se clasifican en ^(49) :

- 1).- Tapones para matraces y frascos:
 - a) De cabeza de centavo.
 - b) De cabeza plana.
 - c) Otras formas.

- 2).- Juntas esmeriladas:
 - a) Macho : - cilíndrica.
- esférica.
 - b) Hembra: -cilíndrica.
- esférica.

- 3).- Tubos conectores:
 - a) Adaptadores: - ensanchadores
- reductores
- normales
 - b) De ángulo: - de dos vías
- de tres o más vías.

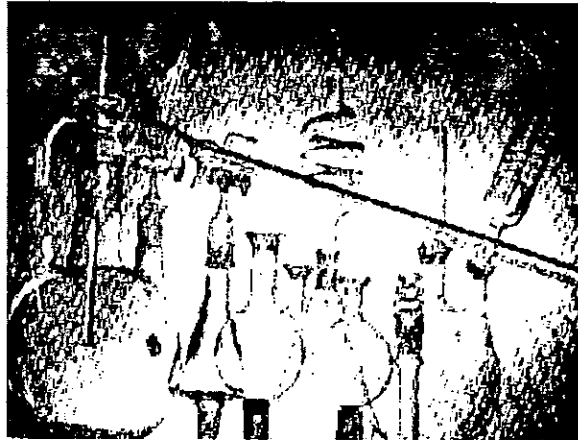


Fig. 15. Juntas esmeriladas.

5.5. RECIPIENTES POROSOS.

Los recipientes porosos de vidrio usados para filtración, lavado de gases y operaciones similares consisten en un cuerpo fuerte, rígido y poroso. El tamaño del poro es controlado, aunque no todos tienen justamente las mismas dimensiones.

Algunos recipientes porosos se elaboran uniendo discos porosos hechos separadamente con cuerpos de vidrio no poroso, tales como tuberías los cuales son sellados, con el fin de utilizarlos para filtración, lavado de gases, difusión y operaciones de extracción. Los discos son generalmente hechos en diámetros de 10 a 100 mm. en seis medidas de poros, mismas que se presentan en la siguiente tabla.

Tamaño nominal del poro en μ	Uso
1.4	filtraciones bacterianas.
1.5	filtraciones de cristales y precipitados.
2.5	filtraciones bacterianas.
5.5	filtración de finos precipitados de extracción.
6.0	filtración de material grueso, lavado y absorción de gas.
220	soporte de otros materiales de relleno.

Tabla 10. Tamaños nominales de poro de recipientes porosos.

Aunque los recipientes porosos son hechos de vidrio resistente a los cambios térmicos bruscos, tienen resistencia térmica reducida debido a los poros de su estructura por lo que estos recipientes no deben ser expuestos a la flama o a cambios bruscos de temperatura. Son comúnmente usados para el secado a peso constante en 110° C. Mayores temperaturas pueden ser usadas, si se toman las precauciones de no introducir esfuerzos en el vidrio.

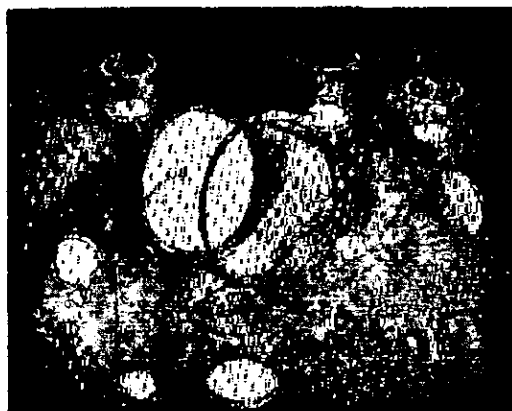


Fig. 16. Recipientes porosos.

5. 6. TERMOMETROS.

"Líquido en vidrio". Los termómetros son elaborados de dos partes de vidrio: un tubo capilar acorazado y un bulbo de pared delgada. Estas partes son elaboradas de manera separada y selladas juntas en el proceso de fabricación. Después el vidrio es recocido y el mercurio es introducido directamente en el tubo capilar abierto y cerrado finalmente bajo vacío.

Alcohol coloreado es usado como el líquido que se expande en lugar de mercurio, para la fabricación de termómetros que no requieren de gran exactitud en la medición.

Ahora bien, diferentes composiciones del vidrio y una considerable variedad de medidas y formas de tuberías son necesarias para satisfacer los requerimientos en la fabricación de los

termómetro. Tipos normalizados de tubería capilar incluye dos formas: redonda o tubería común y triangular o tubería lente, esta última esta destinada a incrementar la visibilidad de el líquido en el interior del capilar y de esta forma el termómetro sea más fácil de leer.

Una tira o raya de vidrio opalino es aplicada en el canto de la pared de el tubo a fin de aumentar el contraste entre el líquido en el interior y el fondo. esta línea es usualmente de vidrio blanco opalino, aunque puede ser amarilla o de otro color.

Las medidas normalizadas para el diámetro del capilar es de 6/64 in. Para la formación del bulbo ordinariamente se usa tubería de vidrio con diámetros nominales de 7/64 in a 1/4 in, con espesores de pared de 0.020 y 0.025 in. aunque paredes más gruesas pueden ser elaboradas para propósitos especiales

El material destinado a la elaboración de termómetros debe estar esencialmente libre de burbujas y de impurezas, tener buenas propiedades de trabajo para el grabado y reducir al mínimo las variaciones del termómetro al calibrarlo , utilizándose tres tipos de vidrio: un vidrio sódico-cálcico , llamado "Normal", es usado en la elaboración de termómetros destinados a registrar temperaturas bajas, vidrio de borosilicato que permiten ampliar el rango de las mediciones arriba de 100° C y para altas temperaturas puede ser utiliza vidrio de aluminosilicato.

Las temperaturas máximas convenientes para los diferentes vidrios son enlistadas a continuación :

Tipos de vidrio.	Temperatura (° C)
" Normal "	435
Borosilicato	545
Aluminosilicato	655-680

Tabla 11. Temperatura máxima para los termómetros.

En una temperatura de 650° C, la presión de vapor del mercurio alcanza un valor de aproximadamente 500 Psi, por lo que los esfuerzos en las paredes del bulbo del termómetro debe considerarse.

Los termómetros tienen un papel muy importante en la industria química desde su uso en pruebas experimentales en el laboratorio, hasta su utilización en el control de las variables en el proceso a nivel planta.⁽⁵⁵⁾

5.7. COMPOSICION DEL VIDRIO UTILIZADO EN LA FABRICACION DE UTENSILIOS DE LABORATORIO.

Anteriormente los utensilios de laboratorio se elaboraban exclusivamente de vidrio de sosa-cal, con un pequeño porcentaje de alúmina de hecho. en Europa esta composición es aún conocida como "Apparatus glass".

Aunque el vidrio de sódico-cálcico es utilizado en cierta medida para la elaboración de algunos

utensilios de laboratorio, éste ha sido reemplazado ampliamente por vidrio de borosilicato, que permite su uso en condiciones más rigurosas. Los vidrios de borosilicato fueron desarrollados especialmente para satisfacer los requerimientos de durabilidad química y resistencia al choque térmico, ya que el vidrio de borosilicato tiene el más bajo coeficiente de expansión térmica de todos los vidrios fundidos en gran volumen y su resistencia a los cambios bruscos de temperatura, permiten que pueda ser enfriado y calentado casi simultáneamente.

De acuerdo con la norma oficial mexicana los utensilios de laboratorio se fabrican en tres tipos de vidrio que son ⁽⁴⁶⁾

Tipo 1: Vidrio de borosilicato:

- a) de bajo coeficiente de expansión térmica.
- b) de alto coeficiente de expansión térmica.

Tipo 2: Vidrio calizo.

Tipo 3: Vidrio de baja transmitancia.

CAPITULO VI
ENVASES DE VIDRIO

VI. ENVASES DE VIDRIO.

6.1.HISTORIA.

Los envases son los medios en que se encierran los productos para su transportación desde el lugar de su manufactura hasta el consumidor.

Para hablar del origen del envase, es necesario retroceder prácticamente hasta los orígenes del hombre mismo, ya que éste surge como una de sus primeras invenciones.

Al volverse sedentario el hombre primitivo, se vio necesitado de envases que le permitieran el transporte y almacenamiento de sus alimentos desde el lugar de producción, al lugar de uso. Primeramente utilizó envases naturales tales como: cáscaras, hojas, pieles de animales, calabazos etc, pero con el descubrimiento de la alfarería el hombre se rodea de un gran número de recipientes de variada forma y tamaño, todos ellos elaborados con arcillas.

Posteriormente el hombre aprende la fundición de metales y la obtención de aleaciones, con las cuales elaboró utensilios, armas y envases (5000 A.C:). En cuanto a la manufactura de envases de vidrio para el año 1500 A.C. en Egipto, fueron encontrados pequeños artículos elaborados con esta finalidad; sin embargo la aplicación de la ciencia y la tecnología para la elaboración propiamente dicha de envases de vidrio, se llevó a cabo muchos siglos después, cuando en 1821, se patentó un molde para el soplado de botellas, trabajo que se venía desarrollando hasta ese momento con equipo simple y por el método de soplado de boca; ya para el siglo XX, se inicia la industria de envases de este material en donde los sopladores de vidrio se sustituyeron por compresoras de aire y los moldes que se accionaban manualmente, se manipulan por medios mecánicos (máquinas semiautomáticas).

En 1907 en Europa, se produjeron las botellas en forma automática, lográndose 2500 unidades por hora.

En México la introducción de los sistemas semiautomáticos y automáticos, se realizó hasta principios del presente siglo, por carecer de inversión y mercado, ya que los artículos de cristalería, vidrio plano y envases, se venían surtiendo de mercados extranjeros.

En 1906, se establece la vidriera " Monterrey, S :A: " en la ciudad del mismo nombre, la que inicialmente elaboró botellas cerveceras y posteriormente todo tipo de envase, en los años posteriores: 1935, 1936 y 1946, se establecen fábricas en la ciudad de México, Guadalajara y Orizaba.

En la actualidad la Industria Mexicana del Vidrio , comprende fábricas mecanizadas, que laboran en forma automática y semiautomática cantidades considerables de una gran variedad de envases de vidrio.

6.2. NECESIDAD DE UN ENVASE DE VIDRIO.

En la actualidad existen una gran variedad de materiales destinados a la elaboración de envases, sin embargo el vidrio sigue considerándose uno de los más importantes debido al conjunto de propiedades que este material ofrece a los productos envasados en él, entre ellas: transparencia, buena resistencia a cambios moderados de presión y temperatura, una superficie lisa y dura que no absorbe los olores, manteniendo el aroma y sabor de los productos, además el vidrio no es poroso por lo que es impermeable al agua y al aire, lo suficientemente fuerte como para resistir los procesos de lavado, envasado, pasteurizado, esterilizado, más aún es durable, por lo que puede usarse varias veces como ocurre con los envases retornables. Es inodoro, higiénico, fácil de lavar, con buena durabilidad química, cierre hermético y para casos especiales existen vidrios de colores que filtran de la luz las longitudes de onda que pudieran afectar la estabilidad de algunos productos.

Son muchas las propiedades que ofrece el vidrio como material de envases por lo que es ampliamente usados para el almacenamiento y transportación de productos que deban ser protegidos contra derramamientos contaminación o sean altamente corrosivos.

Productos farmacéuticos, de tocador, comidas, bebidas, reactivos químicos y otros más son envasados en vidrio.

6.3.TIPOS DE ENVASES.

Los envases de vidrio son hechos en una gran variedad de formas, tamaños y colores, destinados a las más diversas aplicaciones. Tomando en cuenta su forma, tamaño y método de fabricación los envases de vidrio se pueden clasificar en: botellas, frascos, garrafones y envases de vidrio tubular.

1).- Botellas: Este término es usado para designar envases con boca angosta y cuello largo, de sección transversal circular generalmente, utilizadas en bebidas, con una capacidad de 100 a 1500 ml.

2).- Frascos. Son envases sin cuello apreciable, boca angosta o ancha, el diámetro de la boca menor al diámetro del cuerpo y altura en la mayoría de los casos menor que las botellas, utilizados para contener sólidos y semisólidos.

3).- Jarros. Envases semejantes a los frascos, con diámetro de la boca igual o casi igual que el cuerpo, empleados para envasar cremas, cosméticos etc.

4).- Garrafones: En cuanto a su forma los hay parecidos a botellas con asa, de cuello corto, boca angosta y base cilíndrica. Tienen una mayor capacidad que los envases anteriormente mencionados (mayor a 2 lt.).

Los garrafones se emplean mucho para envasar ácidos orgánicos y otros líquidos, altamente

corrosivos o material de elevada pureza, que deban ser protegidos por vidrio.

5).-Envases tubulares. Se les asigna éste nombre por estar elaborados de vidrio tubular. Se caracterizan por tener una capacidad muy pequeña (0.5 a 100 ml) y forma cilíndrica. Son encontrados en forma de frascos ampula y ampolletas usadas en productos farmacéuticos.

6.4. COMPOSICION DEL VIDRIO PARA ENVASES.

Estos recipientes son elaborados casi en su totalidad de vidrio de Sosa-cal, su composición es semejante a la que se utiliza en la fabricación de láminas para ventanas, aunque pequeñas modificaciones son usualmente hechas, para dar a los vidrios mejores propiedades de trabajo o conferirle un color, el cual es muy importante en la presentación y protección del producto envasado. Por ejemplo: vidrios verdes o ámbar son generalmente encontrados en botellas de bebidas alcohólicas, productos farmacéuticos y reactivos químicos, cremas de noche y otras preparaciones de tocador son envasadas en tarros blanco-opalinos, en tanto que el vidrio transparente se prefiere en envases para alimentos infantiles, conservas, encurtidos, mermeladas, mayonesas, miel, cajetas, bebidas carbonatadas etc.

6.5. PROCESO DE FABRICACION.

El proceso para la elaboración de envases de vidrio incluye las siguientes etapas:

1).- Formulación. Consiste en determinar la composición porcentual que mejor se adapte a las condiciones de fabricación y calidad deseada en el envase, ya que es bien sabido que la formulación para el vidrio Sosa-cal, es susceptible a una gran variedad de cambios, para dar origen a una diversidad de vidrios.

2).- Mezclado. Una vez elegida la composición porcentual, se procede a la correcta pesada de las

materias primas en proporción , que dé un volumen adecuado para el mezclador disponible, en donde se le agrega determinada porción de vidrio triturado, que bien puede ser desecho de producción o de envases rotos. La mezcla total, se envía en carritos individuales o a un silo único para alimentar el horno de fusión.

3).- Fusión. En el horno de fusión, las materias primas se transforman en una masa homogénea, a temperaturas aproximadas a los 1500°C , en tanto que la mezcla de materias primas se agrega regularmente y a medida que va avanzando sobre el vidrio ya fundido en el que flota va incorporándose a la masa fluida, produciéndose simultáneamente el desprendimiento de gases (afinaje), mismo que continúa hasta su total desaparición, al final de este proceso.

El vidrio queda libre de burbujas y homogeneizado. Así la masa de vidrio pasa al tanque de trabajo donde sufre un primer enfriamiento (menos de 200°C), después pasa a los canales de acondicionamiento térmico para regular la temperatura de la masa vítrea. En el extremo de los canales está situado un tazón, cuya parte inferior posee un orificio donde fluye el vidrio y se regula la cantidad necesaria de éste, mediante anillos refractarios intercambiables de diámetro de abertura específica para cada artículo.

Para afinar el ajuste de dicha cantidad de vidrio existe sumergido un tubo refractario que actúa bombeando alternativamente, ayudando al vidrio a salir pulsadamente por el orificio (en gotas).

4).- Moldeado. Consiste en dos etapas , en la primera de ellas, la gota de vidrio cae en un molde llamado "Parison" en donde un sistema de compresión obliga al vidrio a formar la boca del envase, en la segunda etapa, el cuerpo vítreo, formado anteriormente es llevado al molde definitivo, en donde se produce el soplado final, para completar el cuerpo del artículo.

5).- Recocido. A fin de eliminar esfuerzos retenidos en el artículo durante su elaboración, se

aplica un proceso de recocido, calentándolo hasta el punto donde se releven la mayor parte de dichos esfuerzos (Punto de recocido) y posteriormente se deja enfriar lentamente para impedir la formación de tensiones residuales, una vez debajo del punto de tensión, se acelera el enfriamiento para que al salir del horno de recocido, el artículo pueda manipularse en la inspección.

6).- Inspección. Consiste en revisar en el envase los defectos visibles que puedan tener. Verificar sus dimensiones, capacidad, peso, homogeneidad, resistencia al choque térmico, a la presión interna, durabilidad química etc.

7).- Decoración. Se lleva a cabo en envases que requieran caracterizarse con motivos particulares, inscripciones o etiquetas vitrificables, que son permanentes. El proceso se realiza con máquinas semiautomáticas que aplican sucesivamente cada uno de los colores que formen la etiqueta.

Los esmaltes utilizados tienen una composición de vidrio de bajo punto de fusión, junto con los pigmentos que al fundirse deben dar el color requerido, después los envases pasan a través de un horno, donde se produce la fusión del esmalte y su fijación, quedando así sus características definitivas de color y brillo.

6.6. PRUEBAS PARA ENVASES DE VIDRIO.

Entre los requerimientos importantes que deben cumplir los envases figuran los de apariencia y dimensiones, además de aquellos que vienen determinados por la naturaleza y homogeneidad de la masa vítrea, las condiciones de moldeo, las temperaturas del proceso y el tiempo de recocido. Dado que en la actualidad están sometidos a procesos cada vez más críticos y donde las modernas máquinas de llenado trabajan a velocidades mayores, se requiere de envases prácticamente perfectos para evitar interrupciones en estas líneas. Las pruebas o ensayos aplicados a envases son:

1).- Comprobación de dimensiones. Las dimensiones más importantes de un envase son las de altura, diámetro del cuerpo, diámetro interior y exterior de la corona, debido a que pueden ocasionar problemas en líneas de llenado y en la máquina taponadora.

La inspección de tales dimensiones es un procedimiento simple, en el cual se utilizan patrones calibrados con especificaciones dimensionales, tolerancias y límites de control del tipo "pasa", y "No pasa".

Para la determinación del diámetro del cuerpo, así como el diámetro exterior de la corona, se utilizan patrones del tipo "pasa", "No pasa", que presenta dos aberturas con diferente dimensión, considerándose aceptable el envase, si la región a inspeccionar entra en la abertura mayor y considerando fuera de especificaciones si pasa a la abertura menor o si ésta, no puede entrar en la abertura mayor.

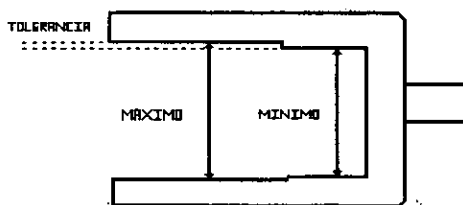


Fig. 17 Calibrador del tipo "Pasa-No pasa" para determinar el diámetro del cuerpo

En la comprobación de la altura y el diámetro interior de la corona, se utilizan respectivamente un vernier y un calibrador del tipo "pasa", "No pasa". como los que se muestran

en la figura:

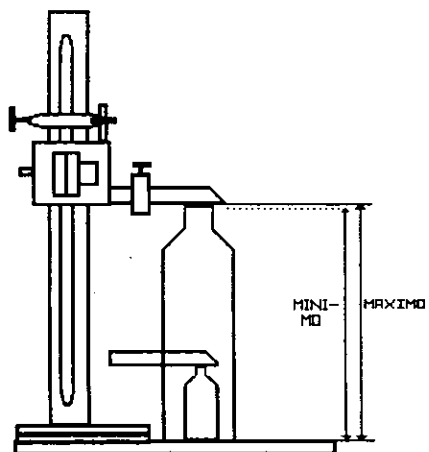


Fig.18. Vernier tipo "Pie de Rey" para determinar altura

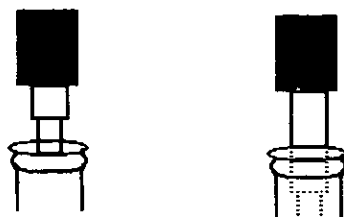


Fig.19. Calibrador del tipo "Pasa-No pasa" para determinar el diámetro interior de la corona.

Dentro de la comprobación de las dimensiones, se incluye la determinación del espesor, verticalidad, peso y capacidad.

2).- **Espesor.** La distribución del vidrio se comprueba cortando una sección transversal del envase para medirla con un calibrador en la parte deseada, o bien determinando el espesor de pared en el envase completo con un calibrador especial , midiendo en los puntos donde esté sujeto a esfuerzos elevados por el diseño o en su diámetro mayor.

Resulta interesante resaltar que a medida que el espesor aumenta, aumenta su resistencia mecánica, pero disminuye su resistencia al choque térmico. Así mismo es importante mencionar que el espesor de un envase, no necesita ser uniforme en todas partes, debido a que los esfuerzos a que se encuentra sometido varía de un punto a otro (no así en el caso de presión interna); por ejemplo la base está expuesta a mayores esfuerzos durante su manejo.

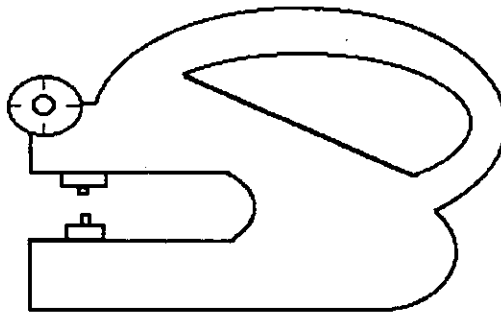


Fig.20. Calibrador de carátula para determinar el espesor en muestras de vidrio

4).- Ovalidad. Esta prueba se lleva a cabo para evaluar el grado de variación en la sección circular de un envase cilíndrico, debido a que los envases con ovalidad elevada presentan problemas en las bandas transportadoras y en la sección de etiquetado.

Generalmente se utiliza un calibrador circular o semicircular para comprobar la ovalidad de los envases de vidrio.

5).- Verticalidad. Es el valor de la " desviación " , a la cual la corona de una botella se aparta de su eje central. Esto puede originar problemas en las líneas de llenado y tapado, ya que, las bocas de los envases no se alinean correctamente bajo los conductos llenadores y cabezas taponadoras. Este defecto se origina normalmente en el horno de recocido.

Un aparato como el que se muestra en la siguiente figura, es usado para medir la verticalidad y ovalidad. (58)

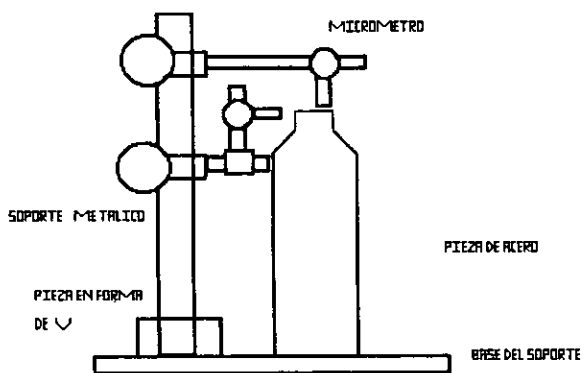


Fig.21. Aparato para determinar verticalidad y ovalidad.

6).- Peso. Este se determina utilizando una balanza granataria con sensibilidad de 1.0g. Dado que no existe una relación directa entre el peso y la capacidad de un envase, el peso especificado en el diseño se considera aproximado, pudiendo tener algunas variaciones.

7).- Capacidad. A un envasador le puede convenir que sus envases luzcan llenos, sin embargo nunca se admite un envase totalmente lleno, debido a que cuando un producto se calienta se expande, desarrollando una mayor presión interna, por lo que un espacio libre o cabeza.

El comportamiento mecánico de un envase de vidrio, radica fundamentalmente en la resistencia que ofrece el vidrio como material. Propiedad que está determinada por la geometría o diseño del envase, el estado de su superficie y el proceso de recocido del material..

Las cualidades mecánicas de los envases de vidrio se determinan mediante pruebas de laboratorio que simulan las condiciones a que se ven expuestos en su uso normal. Las pruebas mecánicas a las que se somete a los envases son: resistencia a la presión interna, resistencia a la carga vertical y horizontal, resistencia al impacto, resistencia al choque térmico y determinación de los esfuerzos residuales.

8).- Resistencia a la presión interna. Es una de las pruebas más importantes para envases destinados a bebidas carbonatadas, vinos espumosos, cervezas, aguas minerales, etc.

La resistencia a la presión interna es determinada por el espesor de las paredes, forma geométrica, condición de la superficie y las condiciones de recocido.

Es importante mencionar que en el caso de los envases retornables, se tiene un debilitamiento mecánico severo durante la operación de limpieza de los mismos, debido al uso de cepillos con cerdas montadas sobre hilos metálicos, lo que desgasta el interior de las superficies de

los envases formando series de finas grietas. Las superficies de los vidrios pueden ser protegidas de los efectos de abrasión en cierto grado, utilizando soluciones de ácidos grasos tales como estereatos para formar una capa lubricante sobre el envase, para reducir los efectos producidos por la abrasión, materiales como las siliconas han sustituido a los estereatos con mejores resultados. Otra alternativa consiste en una capa plástica sobre la superficie de los envases, la cual lo protege del debilitamiento por impactos y previene el estallamiento por presión.^(47, 59)

9).- Resistencia al choque térmico. Esta prueba es hecha para determinar la capacidad de los envases para resistir el calor en las operaciones de esterilización antes del llenado y pasteurización después del llenado. La composición, distribución del vidrio y diseño del envase influyen en la resistencia térmica. La prueba aplicada en este caso consiste en sumergir el envase a un baño de agua caliente por espacio de 5 minutos en posición vertical y posteriormente sumergiéndolo en un baño de agua fría por espacio de 30 segundos en posición recta de tal forma que no se lleve a cabo la mezcla entre el agua caliente del envase y el agua fría del baño. Mediante este procedimiento se sujeta a las superficies externas débiles a un enfriamiento repentino. Los envases son luego sacados e inspeccionados de grietas las cuales normalmente comienzan cerca o entre la unión de la base y las paredes.

La diferencia de temperatura entre el agua fría y el agua caliente, debe ser de 42 ° C. El tiempo de transferencia del baño de agua caliente al baño de agua fría debe ser de + - 10 segundos
(43)

10).- Resistencia al impacto. Esta prueba se lleva cabo para determinar la capacidad de resistencia a choques continuos durante su transportación, así como para seleccionar el material amortiguante que ofrezca mayor protección y para eliminar envases que tengan finas ralladuras

El equipo que se utiliza en la determinación de la resistencia al impacto, se compone de un

péndulo de peso conocido, el cual posee en su extremo una cabeza percutora en forma de esfera con diámetro y peso definido. Durante la determinación del impacto, el péndulo se levanta a una altura o ángulo conocido y luego se deja caer. De esta manera la cabeza percutora pega en el envase con una fuerza conocida y la resistencia al impacto de los envases queda indicada en la escala calibrada en términos de energía de impacto (kgf.cm). Los envases a valorar se llenan previamente con agua y se tapan.

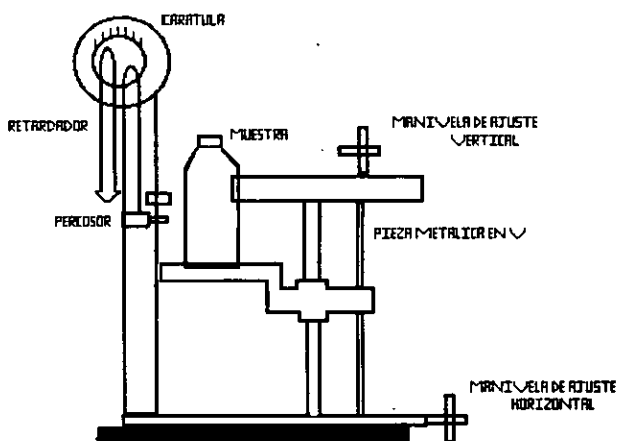


Fig.22. Aparato para determinar resistencia al impacto.

11).- Resistencia a la carga vertical. La prueba proporciona una idea de la capacidad de las botellas para soportar fuerzas compresivas producidas en las máquinas tapanadoras o durante el estibamiento y la transportación.

Para elevar la resistencia a la compresión de los envases de vidrio, el diseñado prevé que el radio de curvatura de el cuello se incremente en forma uniforme para evitar cambios repentinos de curvatura en el hombro. La resistencia a la carga vertical se puede obtener utilizando cualquier probador disponible de compresión incrementando la carga en forma uniforme.

En su determinación, el envase se coloca en posición vertical sobre la platina de la máquina probadora y a medida que la platina es gradualmente elevada, la carga es transmitida a lo largo del eje vertical del envase. Cada incremento de carga corresponde a un minuto de prueba, la carga vertical se puede aplicar por medio de una adaptación a la máquina de presión interna estandarizada o por otro tipo de máquina que realice la operación. El valor mínimo de prueba depende de si se trata de envases retornables o desechables.

12).- Resistencia a la carga horizontal. Dicha prueba proporciona una idea de la capacidad del envase para soportar fuerzas compresivas en forma horizontal durante el almacenamiento en las cavas y en la operación de etiquetado.

Para determinar la resistencia a la carga, se puede utilizar una máquina de compresión como la usada en la prueba de carga vertical, colocando al envase sobre la platina en forma horizontal y aplicando la carga en dirección paralela a su eje vertical entre las dos uniones o costuras.

CAPITULO VII
ESMALTES VÍTREOS

VII. ESMALTES VITREOS.

7.1 DEFINICIÓN.

La palabra esmalte deriva del antiguo alto alemán " Smeizan" , que significa " Fundir", inicialmente se utilizó para designar a los materiales vitrificados de composiciones diversas que se aplicaban a una superficie metálica.

Actualmente el término esmalte se aplica a revestimientos vitreos no sólo de metales, sino también de materiales cerámicos y aún de vidrio. El uso de dicho término también se ha extendido recientemente para designar ciertas pinturas y lacas; por lo que se hace necesario utilizar la expresión " esmalte vítreo " para diferenciarlo de otros acabados.

Un esmalte vítreo es un vidrio de bajo punto de fusión de tales características físicas y químicas que puede aplicarse a la superficies de objetos cerámicos o metálicos a través de un tratamiento térmico. Los esmaltes vitreos se aplican a los diferentes materiales con los siguientes propósitos:

- a).- Proveer de una superficie impermeable, la cual esté libre de poros.
- b).- Proveer una superficie lisa la cual se pueda mantener fácilmente limpia.
- c).- Proteger una superficie de la abrasión y el ataque de sustancia químicas.
- d).- Realzar su apariencia.

7.2. HISTORIA.

Es difícil ubicar el origen del arte del esmaltado; aunque generalmente se atribuye a los antiguos egipcios, dado que , en las tumbas de los faraones se han encontrado objetos que tienen aspecto de joyas esmaltadas. Ahora bien, siendo los esmaltes vítreos de bajo punto de fusión, es evidente que el esmaltado no puede ser anterior al descubrimiento de este material. Al igual que el vidrio es también confuso el curso que siguió la migración del arte del esmaltado, se piensa que de los egipcios pasó directamente a los griegos y de éstos a los romanos, también se piensa que su

introducción en Italia fue llevada a cabo por los españoles, quienes aprendieron este arte de los árabes.

El esmaltado se estió mucho en Bizancio entre los siglo IV y XI, posteriormente en Italia y provincias del sur de Francia.

7.3.. CLASIFICACION.

Los esmaltes se pueden clasificar de acuerdo a las siguientes características:

a) Función:

1).- Capa base. se aplica directamente al material a esmaltar , sirve para llevar a cabo una buena unión con en material y por lo tanto en su composición contienen los óxidos llamados de " unión" .

2).- Capa de recubrimiento. se aplica sobre la capa base y sirve para para proporcionar la resistencia a la corrosión necesaria y como efecto decorativo.

b) Composición:

- 1) Esmaltes con óxido de plomo.
- 2) Esmaltes sin óxido de plomo.
- 3) Esmaltes con borosilicato
- 4) Esmaltes con óxido de estaño.
- 5) Esmaltes con óxido de molibdeno.

c) Propiedades de superficie:

- 1) Esmaltes resistentes a los ácidos.
- 2) Esmaltes resistentes a álcalis.
- 3) Esmaltes brillantes.
- 4) Esmaltes opalinos.

5) Esmaltes coloridos.

d) Método de aplicación:

- 1) Esmaltes para proceso húmedo.
- 2) Esmaltes para proceso seco.

e) Tipo de material a recubrir:

- 1) Esmaltes para hierro dulce, colado y acero inoxidable.
- 2) Esmaltes para Aluminio.
- 3) Esmaltes para cobre, oro y plata.
- 4) Esmaltes para artículos cerámicos.
- 5) Esmaltes para artículos domésticos.
- 6) Esmaltes para equipo de uso en la industria química.

7.4. CONSTITUCION.

Los esmaltes están constituidos por dos partes básicas que son: a) La matriz vítrea y b) Las adiciones de molienda. siendo la primera la más importante, dado que en algunos casos la segunda se hace innecesaria.

a).- Matriz vítrea: Se forma por la fusión previa de todas o casi todas las materias primas que integran la composición del esmalte, a esta materia vítrea se le denomina "frita" y al proceso para realizarla " fritado".

Para algunos esmaltes el fritado no es necesario ya que la temperatura de formación del material a esmaltar, es muy superior a la temperatura de formación de la frita , como en el caso de los esmaltes para sanitarios; o bien, cuando las condiciones para el proceso de fritado sean difíciles. Para los esmaltes en envases de vidrio el fritado es necesario dado que, la temperatura de

formación del esmalte es superior a la temperatura de reblandecimiento del material, lo que provocaría su deformación de efectuarse sobre él.

Ahora bien, a través de la operación de fritado, los materiales peligrosos como los compuestos de plomo se transforman en formas menos tóxicas al pasar a formar parte del vidrio; lo mismo sucede con los materiales solubles, como los compuestos de metales alcalinos, los que al formar parte del material se tornan insolubles.

b).- Adiciones de molinda. Tienen como finalidad provocar efectos especiales en el esmalte tales como; color, opacidad, cristalización, adherencia o bien, modificar algunas propiedades básicas del mismo, como el coeficiente de expansión térmica, resistencia a la corrosión, temperatura de quemado entre otras.

7.5.COMPOSICION Y ESTRUCTURA.

La composición y estructura de los esmaltes vítreos es análoga a la de muchos vidrios en general, aunque como es de esperarse se agregan componentes específicos para desarrollar las propiedades requeridas en el material, tales como, fusibilidad, adherencia, opacidad, coeficiente de expansión, etc. A continuación se muestra una tabla con la composiciones porcentuales para los esmaltes vítreos:

Compuesto.	Capa base.	Capa de recubrimiento.
SiO ₂	70, 48.5, 68.8	20, 65.1
B ₂ O ₃	11, 18.5, 12.9	21, 2
PbO	7.6	-----
Na ₂ O	4.8, 15.7, 5.7	12.6, 19.1
K ₂ O	1.7, 5	8, 2.6
Al ₂ O ₃	9, 4.1, 3.7	5.5, 3.5
CaO	-----	3.4, 7.7
MgO	0.8	-----
ZnO	-----	12.7
Sb ₂ O ₃	-----	12.8
CaF ₂	3, 6.4	2
Na ₃ AlF ₆	-----	2
CoO	0.5, 1.8, 0.5	-----

Tabla.12 Composiciones de esmaltes vítreos.

Las composiciones que se dan en la tabla son composiciones completas, es decir ya se incluyen los compuestos que han de servir como fundentes y las llamadas adiciones de molienda.

7.6. PROPIEDADES.

1).- Adherencia. Esta propiedad es muy importante ya que se requiere que la unión entre la superficie a esmaltar y el esmalte sea lo suficientemente fuerte como para resistir el uso al que esté destinado el producto. Tal es el caso del esmaltado de metales que se considera como un ejemplo de "soldadura de vidrio a metal", y aunque, la naturaleza de ésta unión no es muy clara todavía, se sabe que sólo unos cuantos compuestos desarrollan una adherencia efectiva entre el esmalte y el metal, entre estos compuestos están los óxidos de Cobalto, Níquel y Molibdeno, de los que sólo se requiere agregar cantidades pequeñas que van del 0.5 al 3 %.

2).- Coefficiente de expansión. Es una de las propiedades más importantes de los esmaltes, ya que de su adecuado control depende que éstos no sufra cuarteduras o incluso el desprendimiento total. Por ello no es necesario que los coeficientes de expansión del esmalte y del material a esmaltar sean muy semejantes y que el coeficiente del material a esmaltar sea un poco más alto, para que éste se encuentre comprimido al enfriarse, pero si la compresión es excesiva, el esmalte tiende a desprenderse y si queda en tensión se agrieta, por lo que es muy importante que la semejanza entre coeficientes se mantenga, por ejemplo: el coeficiente de expansión del hierro es de $12 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ \text{C}$ y el de los esmaltes utilizados fluctúa entre 9 y $11 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ \text{C}$.

3).- Fusibilidad. Es una propiedad técnica importante, porque la temperatura de quemado del esmalte depende de ella. Si la fusibilidad es baja y la temperatura de quemado alta se dice que el esmalte pertenece al grupo de los " esmaltes duros" y cuando la fusibilidad es alta, en consecuencia la temperatura de quemado es baja, se dice que se trata de un material que pertenece al grupo de los " esmaltes suaves".

Para aumentar la fusibilidad de los esmaltes (como para el común de los vidrios), se agregan iones modificadores como sodio, potasio, litio y plomo principalmente, éste último puede agregarse en grandes cantidades para los esmaltes de menor temperatura de quemado.

4).- Viscosidad y tensión superficial. Son propiedades importantes en relación con la uniformidad de los revestimientos, sus valores oscilan entre 155 y 6.1×10^{-4} Poises y de 200 dinas/ cm para esmaltes que contienen plomo a 250 dinas/cm para aquellos que no contienen plomo.

5).- Opacidad. Es una propiedad indispensable para los esmaltes destinados a cubrir capas de fondo oscuras. Se desarrolla con la adición de materiales llamados opacificantes; ingredientes poco solubles o que forman cristales insolubles durante el enfriamiento, los cuales tienen diferente índice de refracción que la matriz vítrea y hacen que la luz incidente se difunda dando una apariencia opaca.

Los opacificantes se dividen en dos grupos, a) opacificantes primarios y b) opacificantes secundarios, los primeros dan mayor opacidad y se pueden utilizar solos, aunque aumentan la temperatura de quemado, por lo que se usan junto con los opacificantes secundarios que poseen propiedades fundente. Los opacificantes secundarios nunca se emplean solos, dado que no desarrollan adecuadamente en el esmalte esta propiedad.

A continuación se muestra una tabla con los mejores compuestos opacificantes y su índice de refracción:

COMPUESTO	INDICE DE REFRACCION
TiO ₂	2.5
Sb ₂ O ₃	2.09
As ₂ O ₃	1.73
Na ₃ AlF ₆	1.34
ZrO ₂	2.13
SnO ₂	2.04
CaF ₂	1.44
NaF	1.33

Tabla. 13. Índices de refracción de compuestos opacificantes del vidrios.

Nota: El índice de refracción del vidrio utilizado como matriz varía entre 1.5 y 1.55.

6).- Resistencia a los ácidos. Se considera que un esmalte es acidorresistente cuando no se mancha ni se vuelve opaco después de estar en contacto con una solución al 10% de ácido cítrico. En general se aumenta esta propiedad en el esmalte reduciendo la proporción de óxidos y fluoruros alcalinos y aumentando la de sílice, aunque los recubrimientos modernos contienen hasta un 18% de óxido de Titanio (TiO_2) y son sumamente resistentes a los ácidos.

7).- Resistencia a las bases. Es una propiedad determinante en los esmaltes para máquinas lavadoras, bañeras y lavabos, sin embargo se tienen pocos logros en la producción de esmaltes alcalinorresistentes comparados con los adelantos alcanzados para los esmaltes acidorresistentes, debido a que la sílice componente de los esmaltes, les confiere poca resistencia contra los álcalis.

8).- Resistencia al choque térmico. Cuando los esmaltes requieran ser aplicados a artículos que han de enfriarse y calentarse repetidas veces, es necesario que sean resistentes al choque térmico, por lo que se hace necesario adaptar debidamente el coeficiente de expansión térmica del esmalte y del artículo a esmaltar.

7.7. PROCESO DE ESMALTADO.

1).- Se pesan con exactitud los ingredientes de la horneada y se mezclan muy bien para que la fusión sea más rápida y uniforme.

2).- La mezcla se introduce en el horno para su fusión (elaboración de la "frita").

3).- Una vez obtenida la fusión, se sangra el horno para que la masa fundida caiga en un tanque lleno de agua, o se le apaga con aire a presión. Con lo que se logra un material muy dividido, lo que facilita la molienda.

4).- La frita granular obtenida se muele, agregándole las "adiciones de molienda", que bien pueden ser en seco (proceso en seco), o bien con agua, arcilla y otros materiales (proceso húmedo).

5).- El polvo o lodo obtenido se aplica al material mediante los siguientes métodos:

a).- Imersión. Se efectúa sumergiendo las piezas en el lodo y se colocan en una posición adecuada para que se escurra el exceso de esmalte y quede una capa uniforme.

b).- Embarrado. Es un proceso similar a la inmersión, sólo que aquí el lodo es más espeso y en consecuencia hay que sacudir las piezas para quitarles el exceso de esmalta. Se utiliza principalmente en artículos de cocina y otras piezas huecas y pequeñas.

c).- Aspersión. Se efectúa lanzando el lodo con una pistola de aire hasta cubrir la pieza. Se utiliza en las capas de fondo de hierro colado o capas de fondo de piezas grandes de láminas de acero.

6).- Una vez aplicado el esmalte la pieza se somete a un tratamiento térmico o Cochura como se denominan. Este se efectúa en hornos de diversas clases, formas y tamaños, que bien pueden ser calentados con gas, combustóleo o electricidad, continuos o intermitentes. Aunque el tiempo y la temperatura de cocción son más exactos en hornos intermitentes, ya que en éstos se tiene un calentamiento y enfriamiento gradual.

El tratamiento térmico de los esmaltes en las capas de fondo tienen un tiempo y temperatura de maduración aproximada de 3.5 a 4 minutos y de 840 a 860°C, en tanto que las capas de cubrimiento maduran en 2.5 a 3 minutos a temperaturas de 780 a 810°C. Aunque la temperatura de cocción del esmalte puede variar dependiendo de la naturaleza del material en el que se aplica.

En la mayoría de las piezas esmaltadas es importante que la capa de vidrio no sea demasiado gruesa ya que de ser así se rompe y puede aún desprenderse, en este sentido se maneja un promedio de 0.125 mm. para la capa de fondo y 0.5 mm. entre ambas capas de esmalte (de fondo y de cubrimiento).

7).- El color es una forma importante de decorado, y se puede obtener esmaltes con gran variedad de colores si se funden diversos compuestos inorgánicos de color en la frita o se muelen con una frita blanca y se cuecen. Los compuestos coloreados son vidrios o sustancias calcinadas que se preparan fundiendo o calentando mezclas de óxidos de color, como el de cobalto, de níquel, de hierro y de cromo, con óxidos de sílice y alúmina. El decorado de los artículos con esmalte puede llevarse a cabo por alguno de los siguientes métodos:

a).- Eliminación : Permite aplicar varios colores e una sola superficie, quitando con una escobilla partes de la película seca de la capa de recubrimiento donde haya otro color, con lo cual se deja al descubierto un esmalte previamente cocido de diferente color, luego se cuece la segunda capa.

b).- Tamiz : Utilizando un método fotográfico o de una película de plástico preparada se delinea un diseño en un trozo de tela de seda o tela fina de alambre que ha servir como tamiz y se pone sobre la superficie que se va a pintar, se hace pasar a través de la tela el esmalte de color finamente pulverizado en un aceite especial con ayuda de una escobilla para que el diseño quede trasladado a la superficie previamente esmaltada. Luego se cuece la pintura para estabilizar el esmalte y el color.

c).- Sellos de goma :Es especialmente importante para decorados pequeños. Se oprime el sellos sobre una delgada capa de barniz esparcido sobre una plancha de vidrio y rápidamente se estampa el diseño en barniz sobre la superficie esmaltad, luego se espolvorea un óxido pulverizado de color sobre el diseño de barniz y se esparce sobre él ligeramente con un trozo de algodón. Después de secarse, con un trozo de algodón se quita el exceso de color. El diseño es color queda intacto y después de cocido queda adherido permanentemente al esmalte.

d).- Calcomanía : Es un método muy viejo y usual, para decorar toda clase de superficies de vidrio. Las calcomanías para cerámica se preparan aplicando sobre papel con barniz el dibujo de una plancha grabada. Se espolvorea el color pulverizado sobre el barniz, se deja secar y se quita el exceso de color, el resto queda adherido al barniz. Después de colocar la calcomanía sobre la superficie, se hace presión con una esponja mojada para dejarla bien adherida.. Posteriormente al poner la pieza en el agua se desprende el papel. Se quitar todo el barniz se seca la pieza y se cuece.

e).- Graneado y jaspeado : Son procedimientos decorativos que producen efecto de madera y mármol. Un método para trasladar los dibujos consiste en grabar éstos en un cilindro que se

entinta con una delgada capa de material colorante aplicado a una sola plancha lisa. Se pone el cilindro en contacto con la superficie a esmaltar.

f).- Moteado : Se lleva a cabo rociando o esparciendo el material colorante, por lo general es un esmalte de color, sobre la superficie de un esmalte cocido, se emplea un pincel, o aún mejor, una pistola de aire dispuesta de manera que efectúe la atomización en gotitas bastante grandes. A los artículos llamados de granito se les da un aspecto decorativo agregando sulfatos de cobalto y de níquel al lodo para esmaltar, lo que hace que se oxide la pieza y de esta manera adquiere su aspecto moteado.

7.8. USOS.

El esmalte vítreo es un revestimiento protector y decorativo, ya que además de proteger al material contra la corrosión le da un aspecto impecable, por lo cual los esmaltes vítreos están presentes en una variedad de artículos domésticos como bañeras, lavabos, estufas, hornos, calentadores de agua etc.

Se construyen tanques esmaltados para almacenamiento de compuestos corrosivos y no corrosivos, calderas de cocción, reactores etc, todos ellos revestidos de un esmalte apropiado para el servicio al que se destinen, en las industrias lecheras, conservera, farmacéutica, química y cervecera.

7.9. REVESTIMIENTOS VITREOS CONTRA REVESTIMIENTOS ORGANICOS.

Es prácticamente inevitable la comparación entre los esmaltes vítreos con los acabados orgánicos de lacas y esmaltes sintéticos, debido a que se confunden los usos de estos acabados, y en general son complementarios y no competidores. Análisis de ensayos comparativos han fundamentado lo siguiente: el esmalte vítreo es superior en dureza, resistencia contra la abrasión, durabilidad y termoresistencia, ahora bien, los acabados orgánicos se aplican con mayor facilidad, tienen mayor tenacidad y resistencia al choque térmico, en tanto que ambos tienen un buen acabado para el material a esmaltar, en cuanto a costo algunos acabados orgánicos son de mayor

costo y también existen con un menor costo que los vítreos, consecuentemente al escoger un acabado para un producto, el fabricante debe considerar las cualidades que requiere el acabado que desea y su costo.^(18,21)

CAPITULO VIII
APLICACIONES GENERALES DEL VIDRIO
EN LA INDUSTRIA QUIMICA

VIII. APLICACIONES GENERALES DEL VIDRIO EN LA INDUSTRIA QUIMICA

8.1. VENTAJAS QUE OFRECE EL VIDRIO PARA SU USO EN LA INDUSTRIA QUIMICA.

El vidrio es realmente un material adaptable a muchas aplicaciones en la industria química. Es usado en líneas de tuberías, intercambiadores de calor, bombas centrífugas, columnas, recipientes, empaques para torres, aislantes térmicos, partes de equipo para la producción de fibras sintéticas y otros diversos usos.

Las ventajas que ofrece el vidrio para estas aplicaciones son:

- 1) Resistencia a la corrosión.
- 2) Resistencia en operaciones a altas temperaturas.
- 3) Es un material inerte y puede ser mantenido en condiciones perfectamente higiénicas.
- 4) Transparencia para operaciones que deban ser observadas.

El vidrio puede ser fabricado económicamente, dentro de una gran variedad de formas y medidas, lo que representa una importante ventaja con respecto a otros materiales.

En algunas de las aplicaciones industriales del vidrio, se han encontrado ciertas dificultades para su uso, sin embargo éstas resultan de un inadecuado entendimiento de las propiedades mecánicas y diseño de estructuras más convenientes para este material.

Extensos estudios se han realizado para aumentar la dureza del vidrio a través de varios métodos, por lo que hoy en día los productos de la industria del vidrio han sido instalados y operados con un grado de confiabilidad comparable con el obtenido en otros materiales de ingeniería.

Los usos del vidrio en la industria química son muchos, sin embargo solo se mencionarán los más comunes, para complementar aquellos que ya han sido mencionados en capítulos anteriores

8.2. TUBERIA DE VIDRIO.

Esta tubería es elaborada de vidrio resistente al calor en diámetros nominales de 1 a 6 in. y longitudes arriba de 10 ft. Conexiones, tales como codos, tees, reducciones y otras conexiones especiales para el desagüe de líneas están también disponibles en este material.

Los ensamblajes son hechos el final de las secciones rectas, utilizando bridas metálicas entre las cuales se coloca un relleno de asbesto para prevenir al material de desgaste, evitar ralladuras y reducir las concentraciones de los esfuerzos provocados por las bridas.

La tubería de vidrio es usada para el transporte de líquidos corrosivos como ácidos, vapor de SO_2 , solventes orgánicos, peróxido de hidrogeno y una gran variedad de mezclas corrosivas, es utilizada también para productos farmacéuticos y alimenticios, a fin de evitar posibles contaminaciones, ya que las líneas de tuberías pueden ser limpiadas rápidamente por circulación de soluciones cloradas, vapor de agua o agua hirviendo a través de ellas. Esta tubería también se instala en lecherías donde se expende la leche. Un arreglo clásico de esta tubería se muestra a continuación:

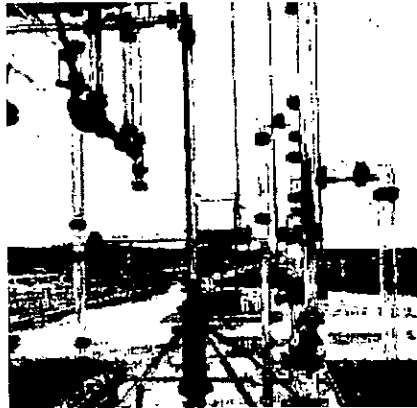


Fig. 23. Arreglo clásico de tubería de vidrio.

8.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Los intercambiadores de calor de vidrio son usados frecuentemente en unión con tubería de vidrio para enfriamiento y ocasionalmente para el calentamiento de fluidos.

El principal propósito del uso de vidrio en los intercambiadores de calor es la resistencia a la corrosión, aunque la protección de químicos farmacéuticos de la contaminación es otra razón importante para su uso en ciertos procesos. Una menor tendencia a acumular depósitos de residuos sobre su superficie y fácil limpieza son otros factores determinantes para considerarlo, aunados a la facilidad para revisar la superficie interior del equipo sin desmontarlo y de una limpieza y mantenimiento más sencillos.

Los intercambiadores de calor son hechos de tubería de pared delgada con el mismo diámetro exterior que la tubería estándar, la longitud usual del tubo es de 10 ft., ensamblados dentro de los intercambiadores de cascada y enchaquetado.

Las unidades de cascada (arreglo en paralelo) son convenientes solamente para operaciones de enfriamiento, teniendo como ventaja el hecho de que puede utilizarse agua de mar como fluido de enfriamiento.

El tipo enchaquetado puede ser usado para enfriamiento o por introducción de vapor a baja presión dentro del espacio anular alrededor del tubo, para operaciones de calentamiento.

Longitudes estándares de tubos de acero son adaptados para la tubería exterior del intercambiador enchaquetado. Unidades individuales con una extensión de 10 ft, entre el doblado del retorno pueden ser ensambladas con área efectivas de transferencia de calor arriba de 150 sq ft. Para unidades más grandes se pueden ensamblar dos o más longitudes de 10 ft en serie. Este arreglo reduce las pérdidas por fricción, ya que disminuye los retornos.

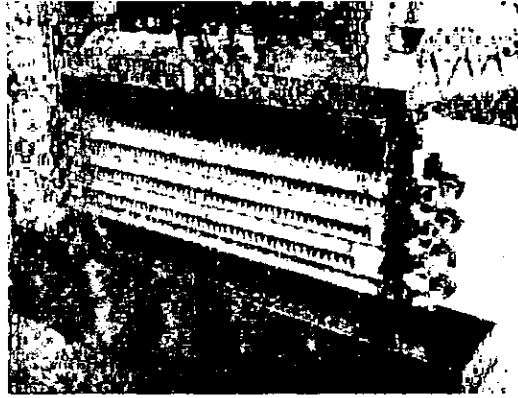


Fig.24. Intercambiador de cascada.

Un intercambiador de calor de vidrio del tipo de tubos y coraza ha sido desarrollado recientemente, formado por una coraza con tubo de vidrio de 6 ft. de longitud aproximadamente, con una conexión de entrada o salida de vidrio sellada al final de cada tubo. Pequeños tubos de vidrio prolongan la longitud de la coraza y el paso a través de platos cerámicos montados sobre la abertura final del tubo.

Las ventajas de este tipo de construcción son:

- 1).- Altos rangos de transferencia de calor por las paredes más delgadas de la tubería.
- 2).- Mayor economía de espacio para una capacidad dada de transferencia de calor.
- 3).- Montaje por el fabricante como una unidad completa
- 4).- Compatibilidad de ambos tubos y coraza, para fluidos corrosivos por sustitución de materiales especiales para desviadores y apoyos.

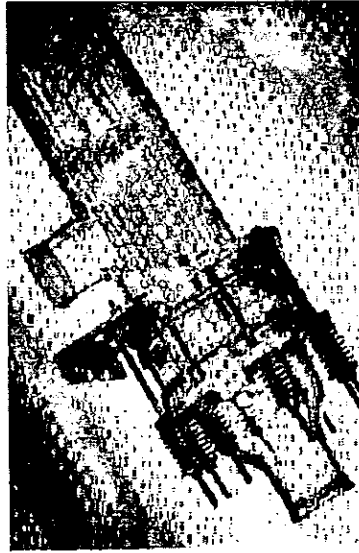


Fig. 25. Construcción de un intercambiador de tubos y coraza.

8.4. TRANSFERENCIA DE CALOR ATRAVES DE VIDRIO.

La conductividad de calor del vidrio es solamente una pequeña fracción de la conductividad de los metales como se observa en la tabla:

Material	Conductividad calorífica.	
	Cal/ s x cm x °C	Btu/in / Hr ft ²⁰ F
Cobre	0.915	2640
Aluminio	0.49	1420
Bronce (70-30)	0.240	700
Acero al bajo carbono	0.108	310
Plomo	0.083	240
Vidrio de borosilicato	0.0028	8.1

Tabla. 14. Conductividad calorífica de metales y vidrios

En la determinación del coeficiente global de transferencia de calor de un intercambiador, no solamente influye la conductividad de la barrera de la pared, si no también influyen los coeficientes de película de los fluidos los cuales están en contacto con la superficie de la pared. Las incrustaciones de la superficie de transferencia de calor frecuentemente reducen dicho coeficiente global de transferencia de calor, condición que es particularmente notable en el caso del intercambiador de tubos de metal. El coeficiente global de transferencia de calor U , puede ser la combinación de los coeficientes individuales como sigue:

$$1/U = 1/h_1 + 1/h_2 + 1/h_3 + 1/h_4$$

Donde: U = coeficiente global de transferencia de calor.

h_1 = coeficiente de película del fluido dentro del tubo.

h_2 = conductividad de la pared del tubo.

h_3 = coeficiente de película del fluido fuera del tubo.

h_4 = conductividad de algún depósito sobre la superficie.

El coeficiente combinado para la pared del tubo y el agua de enfriamiento puede ser determinado similarmente:

$$1/h_{2-3} = 1/h_2 + 1/h_3$$

Los coeficientes arriba mencionados para cálculos de ingeniería son comúnmente expresados en $\text{Btu}/\text{Hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$.

Para el caso de tubos de metal, los coeficientes de película y las incrustaciones en la superficie tienen el control sobre el rango del coeficiente global de transferencia de calor.

Para el vidrio, la conductividad de la pared puede ser el factor de control cuando los coeficientes de película h_1 y h_2 son relativamente altos, como en una simple condensación de vapores o con líquidos fluyendo en rangos de varios ft/s.

En el caso de la no condensación de los gases, los cuales tienen coeficientes de película considerablemente más bajos pueden cambiar los factores para la determinación de la transferencia de calor.

8.5. TORRES.

Las columnas de vidrio son particularmente convenientes para la producción de cantidades limitadas de especialidades químicas o para el estudio de un proceso en una planta piloto.

Un tipo de construcción conveniente para el vidrio consta de pequeñas secciones de 4 a 6 in. de tubo, separadas por platos de vidrio con borboteadores, para una columna larga, los platos están hecho de vidrio pulverizado de sílice 96%, mediante procesos cerámicos. algunas columnas consisten hasta de 40 secciones en altura, las cuales requieren del uso de soportes.

Muchas columnas pequeñas ha sido empleadas en plantas piloto, donde en adición a otras ventajas, un panorama de la reacciones puede ser un de gran ayuda en el desarrollo de equipo a escala. Pruebas pequeñas de eficiencias obtenidas son completamente comparables con la producción de estas unidades.

Ahora bien no sólo las torres o columnas han sido hechas de vidrio, sino también se tienen empaques para las mismas, elaboradas en el mismo material.

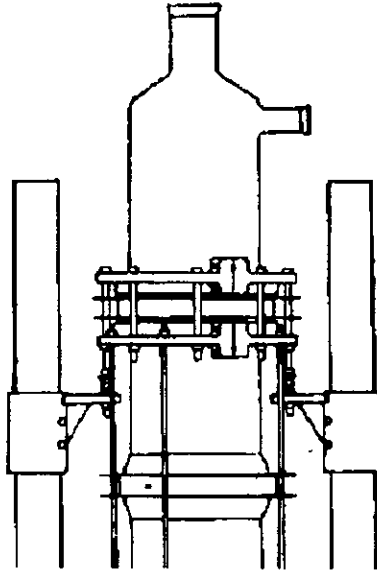


Fig.26. Columna fraccionada.

8.6. BOMBAS.

Bombas centrífugas con rodetes y carcasa son hechas de vidrio, las cuales son sumamente útiles para bombear ácidos y otros líquidos corrosivos. Bombas con diseño estándar pueden ser operadas con líquido a temperaturas arriba de 150°F y en diseños especiales arriba de 200°F . Dos medidas de bombas incluyen un rodete con diámetro de 3.77 in., 3500 r.p.m. y capacidad de 15 g.p.m., además de bombas con un rodete de 8.750 in., 1750 r.p.m. y una capacidad de 115 g.p.m., en 30 y 60 ft. de cabezal.

8.7. INSTRUMENTOS DE MEDICION.

Dentro de los instrumentos de medición hechos de vidrio están los rotámetros para medir el gasto de los fluidos, los vidrios de nivel y manómetros que se colocan en diversos recipientes industriales.

IX. CONCLUSIONES.

Como se ha podido observar en el presente trabajo, el vidrio puede ser un material brillante u opaco, transparente o colorido según sean los requerimientos, el cual presenta una estructura molecular de corto alcance como los líquidos pero con una viscosidad tan elevada que para todo fin práctico se considera un sólido; cuya fragilidad mecánica ha sido superada en la actualidad por medio de tratamientos térmicos o químicos, obteniéndose un material que se caracteriza por su alta resistencia a los choques térmicos y mecánicos.

Así mismo, se puede concluir que los avances logrados durante el presente siglo en el conocimiento de la naturaleza y estructura del vidrio han llevado a implementar nuevos métodos para su formación y una gran variedad de materiales, además de la sílice, están siendo utilizados en su fabricación, todo ello encaminado a satisfacer las necesidades y retos que enfrenta el vidrio para mantenerse, no sólo, como un material actual, sino también del futuro, tal es el caso de los vidrios cerámicos, de aleaciones metálicas, calcogeniuros, entre otros.

El vidrio es un material muy utilizado dentro de la industria química debido a las ventajas que ofrece para su aplicación en esta área, tales como: alta resistencia a la corrosión, inercia química, transparencia para operaciones que deban ser vigiladas durante sus diferentes etapas o bien, para la elaboración de envases que permitan observar el producto para su venta, soporta altas temperaturas de trabajo y cambios moderados de presión, presenta una superficie lisa y libre de poros, por lo que no guarda olores ni sabores, se puede mantener en condiciones perfectamente higiénicas por la facilidad con que se lava y esteriliza, tiene un cierre hermético para los productos que deben ser protegidos contra derramamientos, contaminación o sean altamente corrosivos. También se pueden fabricar vidrios coloridos para fines decorativos o para filtros de determinadas longitudes de ondas, es además muy durable y reciclable.

El vidrio puede ser fabricado económicamente y llevado a una gran variedad de formas y medidas, lo que representa una ventaja más con respecto a otros materiales utilizados en la

industria química, por lo que se requiere en líneas de tubería, intercambiadores de calor, bombas centrífugas, columna, empaques para torres, recipientes de proceso y de laboratorio, envases para diversos productos, instrumentos de medición como termómetros, vidrios de nivel, rotámetros etc, haciendo del vidrio un material indispensable dentro de esta área y en muchos otros usos técnicos, científicos y de la vida cotidiana.

X. BIBLIOGRAFIA.

- 1) Guy, A.G. , *Fundamentos de la ciencia de los materiales* , McGraw-Hill, México, 1980.
- 2) West, R.Anthony, *Solid state chemistry and its applications* , New York, 1987.
- 3) Shackel, Ford, James, *Introductions to materials science for engineers* Macmillan Publishing, New York, 1992.
- 4) Patton, W.J, *Materials in industry* , Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- 5) Smith, F, William, *Principal of materials science and engineers* , McGraw-Hill, EE.UU., 1980.
- 6) Flinn, A., Richard, *Materiales de ingeniería y sus aplicaciones*, McGraw Hill, Columbia, 1989.
- 7) Avner, H, Sydney, *Introducción a la metalurgia física*, México, 1988.
- 8) Askeland, R, Donald, *La ciencia e ingeniería de los materiales*, Grupo Iberoamericano, México, 1985.
- 9) Duffy , I.J , *Glass Technology development since 1978*, Corp.Park Ridge, New York, 1981.

- 10) Doremus, H, Robert, *Glass science* , John Wiley & Sons, New York, 1976.
- 11) Shand, Errol, B., *Glass engineering Hand book*, McGraw-Hill,
2a.ed., New York, 1980.
- 12) Doremus, H, Robert, *Series on the science and techonology of
Materials*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- 13) Keyser, A., Carl, *Ciencia de materiales para ingeniería* , Editorial
Limusa, 5a.ed., D.F. , 1988.
- 14) James, A., Jacobs, *Engineering Materials Technology* , Prentice-Hall,
New Jersey, 1985.
- 15) Kenneth, M. , Rall, *Introduction to materials science and engineering* ,
John Wiley & Sons, E.E.U.U., 1989.
- 16) Van, Vlack, *Tecnología de materiales* , Editorial Fondo Educativo
Interamericano, México, 1984.
- 17) Zbigniew, D, Jastrzabski , *The nature and prperties of engineering
materials* , Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- 18) W, Ryan, *Properties of ceramic raw materials*, Pergamon Internactional
Library, 2a. de. , New York, 1978.

- 19) Piatti , Luigi, ***Enciclopedia de la tecnología química*** , Materiales de ingeniería química, De. Urmo, Tomo IV, España , 1981.
- 20) Kirk- Othmer, ***Enciclopedia de la tecnología química*** , John Wiley & Sons, México, 1993.
- 21) Lewis, M. H., ***Glasses and Glass ceramic***, Chapman and Hall, New York, 1989.
- 22) Günddtherrodt, H.J., ***Glassy Metals I : Ionic Structure, Electronic Transsport and Cristallization*** , Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- 23) Rawson, H, ***Properties and aplicatons of glass***, Glass Science and Tecnology v 3, Amsterdam, 1980.
- 24) Rawson, H, ***Glass and their aplicaciones***, The Institute of materials, Glasgow, Great Britain, 1991.
- 25) Chaudhuri, B.K, ***Some aspects of glass-ceramic superconductores***, Bulletin of Materials Science v 18 n 1 Feb, Calcuta, 1995.
- 26) Duffer, Paul, ***How glass reacts with water and causes surface corrosion***, Glass Industry v 76 n 5 April., Pittsburgh, 1995.
- 27) Bloembergen, Nicolas, ***Optical materials, then and now***, Annual Review of Materials Science v 23, Cambridge, 1993.

- 28) Al-Amri, A, ***Degradation off the stregh of glass after light contact with other materials***, Materials Science & Engineering v 77 n 1 April, Newcastle, 1994.
- 29) Nicholson, P.T., ***Recent excavations at an ancient Egyptian glassworks: Tell el - Amarna***, Glass Technology v 36 n 4 Aug., Wales, 1995.
- 30) Nemilov, S.V., ***Inhomogeneous structure of glass***, Fizika y Khimiya Stekla v 20 n 3 May- June, Rusia, 1994.
- 31) Basi, Alberto, ***Screeprinting evolves to meet market demand***, Glass International, Mayo, Polo di Torriale, 1995.
- 32) Boothe, David T., ***Recycling of eletrotatic precipitator dust from glass furnaces***, Ceramic Engineering and Science Proceedings 15 May, Illinois, 1994.
- 33) Meyer, Henning, ***Lightweight glass technology: weight reductions and surface coatings***, Glastechnische Berichte v n 7 July, Obernkirchen, 1994.
- 34) Ganguli, D, ***Sol-gel processing: a versalite concept for especial glasses and ceramics***, Bulletin of Materials Science v 16 n 6 Dec., Calcuta, 1993.

- 35) Brulev, V.A, *Technical progress in the production of glassware*,
Steklo y Keramika n 2 Feb., Rusia , 1994.
- 36) Edwards, George H., *How glassmaking wastes can be used as raw materials*, Glass Industry v 74 n 13 Dec., E.E. U.U., 1993.
- 37) Hever, Andreas, *Universality of the glass transition temperatura*,
Journal of Non-Crystalline Solids v 176 n 2-3 Nov, Mainz, 1994.
- 38) Morey, G.M., *The properties of glass*, Reinhold, 2nd.ed., New York, 1954.
- 39) Jones, G.O. , *Glass* , Methuen, London, 1956.
- 40) Zachariasen, W.H., *The atomic arrangement in glass* , Journal
Chemical Society, 1932.
- 41) Stanworth, J.E., *Physical propierties of glasses* , Oxford University
Press, New York, 1950.
- 42) Warren, B.E., *The basic principles involved in the glassy state* ,
Journal Chemical Society, 1942.
- 43) **NOM-P-7-1983**. Productos de vidrio-coeficiente de expansión térmica
lineal de sólidos rígidos-método de prueba.,Dirección General de
Normas.

- 44) **DGN-BB-14-1973**. Clasificación y tamaños nominales para utensilios de laboratorio., Dirección General de Normas.
- 45) **NOM-P-51-1977**. Choque térmico en productos de vidrio., Dirección General de Normas.
- 46) **NOM-EE-114**. Tipos de vidrios. Dirección General de Normas.
- 47) **NOM-EE-80**. Presión interna en envases de vidrio. Dirección General de Normas.
- 48) **NOM- P-49**. Esfuerzos residuales en productos de vidrio. Dirección General de Normas.
- 49) **NOM-P-69-1982**. Juntas esmeriladas intercambiables. Dirección General de Normas.
- 50) **NMX-P-065-1986**. Industria del vidrio-material de laboratorio-matriz de ebullición. Dirección General de Normas.
- 51) **NMX-P-066-1986**. Matraz de ebullición de fondo plano. Dirección General de Normas.
- 52) **NMX-P-068-1987**. Matraz ertenmeyer. Dirección General de Normas.

- 53) **NMX-P-073-1988**. Vasos de precipitados. Dirección General de Normas.
- 54) **NMX-P-076-1991**. Matraz volumétrico. Dirección General de Normas.
- 55) **NMX-P-041-1975**. Artículos de vidrio calibrados. Dirección General de Normas.
- 56) **NOM-EE-187**. Envases de vidrio-determinación de la capacidad.
Dirección General de Normas.
- 57) **NOM-EE-188**. Envases de vidrio-determinación de las dimensiones.
Dirección General de Normas.
- 58) **NOM-EE-199**. Envases de vidrio-determinación de la verticalidad.
Dirección General de Normas.
- 59) **NMX-EE-025-1985**. Envases de vidrio para contener bebidas carbonatadas y no carbonatadas. Dirección General de Normas.
- 60) **NMX-EE-027-1988**. Envases de vidrio para contener cerveza-especificaciones. Dirección General de Normas.
- 61) **NMX-EE-029-1979**. Envases de vidrio para productos de perfumería y cosmética. Dirección General de Normas.

62) **NMX-EE-031-1977**. Envases de vidrio para alimentos infantiles. Dirección General de Normas.

63) **NMX-EE-032-1983**. Envases de vidrio para bebidas alcoholicas en general. Dirección General de Normas.

64) **NMX-EE-033-1978**. Envases de vidrio moldeado para productos medicinales inyectables. Dirección General de Normas.

65) **NMX-EE-034-1978**. Envases de vidrio para productos industriales en general. Dirección General de Normas.