

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE FRACTURA EN ENVASES DE
VIDRIO NO RETORNABLES**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA

MECÁNICA

JORGE IGNACIO ANGUIANO LIZAOLA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN DE DIOS OCAMPO DÍAZ

MEXICALI, B. C.

JULIO DEL 2014

OBJETIVO

Conocer y determinar las diferentes causas que originan la fractura en los Envases de Vidrio No Retornables (EVNR) en color cristalino aplicando diferentes métodos de pruebas como los son: presión hidrostática y carga vertical, también realizar análisis numérico y la aplicación de la microscopia electrónica por medio de una fractografía.

HIPÓTESIS

Con un análisis de fractografía y la caracterización de fractura, basada en la identificación de los tipos, condiciones de carga y su efecto en la falla del envase, permitirá desarrollar diseños más robustos.

JUSTIFICACIÓN

En la industria del vidrio, particularmente en lo que se refiere a la fabricación de los EVNR, existe una problemática: los envases sufren rupturas antes de llegar a su destino final. Esta situación impacta negativamente a la economía de las empresas del vidrio ya que se generan pérdidas considerables, que pueden evitarse si se conocen las causas por las cuales ocurren las fracturas en los EVNR que en gran parte pueden generarse desde el diseño. Una técnica que es de gran ayuda para conocer el origen de la fracturas es la fractografía que se utiliza en esta investigación, aplicando un proceso que se describe en el presente trabajo de tesis.

METAS

- Modelado de Envase de vidrio (espécimen) en 3D.
- Diseño de equipo de prueba de presión interna.
- Fabricación de dispositivo para prueba de presión interna.
- Realización de pruebas de presión interna, carga vertical.
- Simulación numérica por el método de elemento finito.
- Simulación numérica del esfuerzo circunferencial en envases
- Realizar un análisis de fractografía en los EVNR
- Análisis de resultados
- Conclusiones sobre la investigación.
- Recomendaciones

ÍNDICE

OBJETIVO.....	I
HIPÓTESIS.....	I
JUSTIFICACIÓN.....	I
METAS.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	2
1.1 Ciencia e Ingeniería de materiales.....	2
1.2 Antecedentes y desarrollo del vidrio	2
1.2.1 Antecedentes de la industria de vidrio en México	3
1.2.2 Producción de envases de vidrio en México.	5
1.3 Materias primas en envases de vidrio.....	6
1.3.2 Dióxido de Silicio	7
1.3.3 Fundentes	7
1.3.4. Óxido de sodio.....	8
1.3.5 Estabilizantes	8
1.3.6 Componentes secundarios.....	8
1.3.7 Tipos de vidrio	9
1.3.8 Color del vidrio.....	9
1.4 Horno de fundición.....	10
1.5 Procesos de manufactura en la fabricación de los envases de vidrio	11
1.5.1 Proceso Soplo-Soplo	11
1.5.2 Proceso Prensa Soplo	12
1.5.3 Tratamiento superficial	13
1.6 Defectos en los envases de vidrio.....	14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Descripción general de los envases de vidrio.	17
2.1.2 Diseño de moldes	18
2.2 Propiedades mecánicas del vidrio	20
2.3 Resistencia mecánica del vidrio.....	21
2.4 Resistencia Térmica	21

2.5 Fractura del vidrio.....	22
2.6 Mecánica de fractura.....	24
2.7 Criterio de Griffith.....	25
2.8 Fractografía en el vidrio.....	27
2.9 Principales fallas que presenta los envase de vidrio.....	28
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN.....	30
3.1 Modelado del espécimen con CATIA en tres dimensiones.....	30
3.1.1 Características EVNR color cristalino tipo cervecera normas ASTM.....	31
3.1.2 Determinación de espesores teórico de la pared de EVNR.....	33
3.2 Equipo para pruebas en los EVNR.....	34
3.2.1 La resistencia a la presión interna.....	34
3.2.2. Esfuerzo circunferencial (Hoop stress).....	35
3.2.3 Tipo de aumento de presión hidrostática de un EVNR.....	36
3.2.4 Diseño de equipo de presión hidrostática.....	37
3.2.5 Fabricación equipo para presión hidrostática.....	38
3.3 Metodología para la realización de pruebas.....	39
3.3.1 Presión Interna.....	39
3.3.2 Carga Vertical.....	42
3.3.3 Impacto.....	44
3.4 Experimentación.....	47
3.4.1 Información sobre especímenes.....	47
3.4.2 Presión Hidrostática.....	49
3.4.4 Análisis de experimentación sometidos a presión hidrostática.....	53
3.4.5 Carga Vertical.....	54
3.5 Análisis EVNR por el método de elemento finito.....	55
3.6 Método del uso de fractografía.....	58
3.6.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	58
3.6.2 Zonas estrías, espejo y fractura.....	59
CAPÍTULO IV. RESULTADOS OBTENIDOS.....	62
4.1 Análisis de fractografía.....	62
4.1.1 Resultados de microscopia electrónica de barrido (MEB).....	64
4.1.2 Resultados de análisis detector de energía dispersa (EDS) con MEB.....	67
4.1.3 Resultados del esfuerzo circunferencial.....	68

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1 Conclusiones	74
5.2 Recomendaciones	75
5.3 Trabajos futuros	75
5.4 Publicaciones y participación en congresos	76
Referencias bibliográficas	77
ANEXO 1	80

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Localización de fábricas de vidrio en México.	6
1.2	Horno de fundición de vidrio.	10
1.3	Proceso sople-sople.	12
1.4	Proceso prensa-sople.	13
2.1	Partes de un envase de vidrio	17
2.2	Moldura de un envase de vidrio	19
2.3	Curva de esfuerzo-deformación.	21
2.4	Fractura en un envase de vidrio	22
2.5	Clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril	23
2.6	Categorías de fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica	25
2.7	Modelo de Griffith de fractura frágil	26
2.8	Fotografía de un defecto superficial	27
2.9	Falla por rotura en el vidrio	28
3.0	Plano del envase y diseño en tres dimensiones	30
3.1	Espesores de pared en el envase	33
3.2	Equipo de para pruebas de presión interna	37
3.3	Equipo de pruebas de impacto	44
3.4	Impacto Severo	45
3.5	Impacto moderado	45
3.6	Impacto suave	45
3.7	Diagrama de proceso para someter a presión los envases	49
3.8	Imágenes durante experimentación presión hidrostática	51
3.9	Comportamiento del esfuerzo circunferencial	52
3.10	Imágenes de espécimen experimentación presión hidrostática	53
3.11	Imágenes de espécimen experimentación carga vertical	54
3.12	Análisis Elemento Finito de Presión Interna	56
3.13	Análisis Elemento Finito de Carga vertical (compresión).	57
3.14	Origen de fractura y zonas de estrías y espejo	60
4.0	Muestra 1 color cristalino	67

4.1	Muestra 2 color cristalino	67
4.2	Muestra 3 color cristalino	68

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Módulo de rotura y elasticidad de materiales cerámicos	20
3.0	Tabla de espesores de la pared	35
3.1	Tabla de productos de carbonatación	39
3.2	Mediciones del espécimen	47
3.3	Relación de muestras para experimentación	48
3.4	Registro de pruebas elaboradas en la experimentación	50
3.5	Técnicas empleadas en el estudio de la fractografía	59
4.0	Imágenes tomadas con microscopio y observaciones	62
4.1	Resultados de análisis con microscopía electrónica de barrido y observaciones	65

CAPÍTULO I.

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE

1.1 Ciencia e Ingeniería de materiales

Desde la década de los setenta, el término que ha venido a designar a la rama de la ingeniería concerniente a los materiales es ciencia e ingeniería de materiales. Esta denominación es precisa debido a que este campo es una verdadera combinación de estudios, básicos, y de práctica ingenieril. Este mismo campo ha ido creciendo para incluir contribuciones de otros más tradicionales, entre los que se incluyen la metalurgia, la ingeniería de los cerámicos, la química de los polímeros, la física del estado sólido y la física química. [1]

1.2 Antecedentes y desarrollo del vidrio

El hombre ha aprovechado estos elementos naturales desde la prehistoria, así lo atestiguan las herramientas y armas de obsidiana utilizadas en sus labores de recolección y de cacería por los habitantes de las cavernas. Ópalos, ónices y ágatas piedras semipreciosas producto de cuarzos impuros han servido como materia prima para elaborar ornamentos desde la época de esplendor de las culturas egipcia y mesopotámica. Del mismo modo, los primeros pobladores de Mesoamérica usaron esos materiales y aún el cristal de roca en artículos suntuarios y decorativos. [2]

Uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre es la arena sílica, materia prima indispensable para la fabricación del vidrio.

El vidrio se presenta en la naturaleza en forma de cristal de roca y cuarzo formados por la combinación de alta presión y temperatura en el interior del globo terráqueo; de obsidiana, producto de las erupciones volcánicas y de fulgurita, resultante de la fusión de arena del desierto causada por descargas eléctricas.

El vidrio es un sólido amorfo con la estructura de un líquido. Se ha superenfriado (enfriado a una velocidad demasiado alta, para permitir la formación de los cristales).

El vidrio se define como un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado hasta adquirir una condición rígida sin cristalizarse. El vidrio no tiene un punto distintivo de fusión o

solidificación, por lo que su comportamiento es similar al de las aleaciones amorfas y polímeros amorfos [1,2].

1.2.1 Antecedentes de la industria de vidrio en México

En México nuestros antepasados indígenas no fabricaban vidrio a pesar de que en la región si se contaban con los materiales necesarios para su elaboración como el sílice, óxidos alcalinos y cal, no conocían el vidrio como tal y sólo se admiraban ante los minerales cristalinos por naturaleza, que se parecían al vidrio en aspecto y transparencia, pero que eran muy distintos en su dureza y en la forma de trabajarlos.

El único vidrio utilizado por nuestros antepasados antes de la conquista fue el vidrio volcánico oscuro, llamado por los Tarascos tzinapu, por los Mexicas Itztli.

La obsidiana se ha utilizado en nuestro país desde hace miles de años en la elaboración de herramientas como puntas de flecha, lanzas y cuchillos; después empezó a tallarse y a utilizarse como adorno. Aún cuando en el México prehispánico no se sabía cómo fabricar el vidrio a partir de arcillas empleando hornos especiales, los Aztecas lo usaban y lo trabajaban para crear utensilios de guerra y ornamentales; nunca se imaginaron que la obsidiana fuera un vidrio [3].

Antes de la llegada de los españoles, los Aztecas no conocían el vidrio. El único vidrio que trabajaron fue la obsidiana, que en México se encuentra en varias tonalidades: rojiza, azulada, verde oscuro y negra. La obsidiana es un vidrio mineral formado por el enfriamiento brusco de la lava volcánica, rica en óxido de silicio, es por eso que también se le conoce a la obsidiana como “piedra volcánica”. Se clasifica como “vidrio” debido a que su estructura atómica es desordenada y químicamente inestable, razón por la que su superficie tiene una cubierta opaca llamada córtex.

Los habitantes del México prehispánico convirtieron a la obsidiana en un excelente material para elaborar instrumentos y armas como navajas, cuchillos y puntas de proyectil; para hacerlos presionaban piezas grandes de obsidiana de las cuales se desprendían esquirlas con forma de cuchillo, que tenían un buen filo y que, aunque duraban poco, podían utilizarse para labrar piedras, trabajar pieles, cortar el cabello y afeitarse, en intervenciones quirúrgicas y para los

sacrificios humanos. Al pulirla, obtenían superficies reflejantes en las que elaboraron espejos, esculturas, cetros y cuentas con los que se decoraban las imágenes de los dioses y se engalanaban los altos dignatarios civiles y militares de aquella época.

La manufactura del vidrio fue establecida en la Nueva España por los españoles muy tempranamente. En el siglo XVI surgió en Puebla de los Ángeles la primera fábrica de vidrio soplado específicamente en el año 1542, fundada por Rodrigo Espinosa quien llegó a ser célebre porque su producción se exportaba hasta Guatemala y el Perú. “La calidad de sus redomas, botellas, vasos y vinateras no conoció competencia hasta 1728, cuando el maestro Antonio Prado fincó una nueva fábrica en la misma ciudad angelina. Las destilerías exigían una producción mayor y los vidrieros apenas disponían de tiempo para cumplir con los pedidos.”

Con los años, la fabricación de vidrio en México se convirtió en una sólida fuente de ingresos. Y después se abrieron otras fábricas de vidrio en otros estados como es en la ciudad de Guadalajara, ciudad de México y Monterrey. [3]

En 1889 Camilo Ávalos Razo, después de un primer intento en Puebla, instala una pequeña fábrica en México. En la calle de Carretones erige el que será, con los años, el más prestigioso surtidor de vidrio soplado en México. Don Camilo fue el primer vidriero de origen netamente mexicano ya que en general las empresas vidrieras estaban dirigidas por españoles y alemanes. Sus descendientes continuaron con la tradición y la expandieron por rumbos diversos. Uno de sus hijos Odilón Ávalos, llevó en 1903 a Guadalajara su producción, estableciendo la manufactura de vidrio soplado en Jalisco, la que pronto se especializó en fabricar envases para tequila, donde las destilerías de tequila demandaban envases para su producto.

En Monterrey, la industria del vidrio se consolidó en 1909, al iniciar sus operaciones comerciales como la Vidriera Monterrey, que posteriormente conformaría parte del grupo Vitro, con una industria capaz de satisfacer todas las necesidades de envasado para la naciente industria cervecera en esa época [3].

En el año 2000, la producción de vidrio nacional se ha caracterizado por la diversidad de sus productos y por ser un medio muy eficaz para desplegar la creatividad artística en la

fabricación de objetos para la decoración; sin embargo. La principal línea de producción es la de envases y ampollitas de vidrio. [4]

1.2.2 Producción de envases de vidrio en México.

Diariamente, empresas de clase mundial fabrican millones de botellas de vidrio con distintos tamaños y formas. La manufactura de las botellas de vidrio involucra varias etapas: materia prima, fundición en horno, formado, recocido, primera inspección física, inspección de maquinado con láser, segunda inspección física, control de calidad y empaquetado final.

Actualmente en México la producción de EVNR ha ido en aumento, y cada vez es más la producción, hay empresas que entran en el rubro de envases de refrescos, jugos, envases de cerveza, etc.

De las empresas más importantes en Baja California, una pertenece al Grupo Vitro y la segunda a empresarios locales y regionales. Ambas empresas cuentan con tecnología tanto americana como europea, lo cual las coloca a nivel internacional con una excelente tecnología, dándoles una ventaja competitiva y la flexibilidad para adaptarse a cambios de mercado con suficiente rapidez.

Respecto a la empresa productora de envases de vidrio en Baja California, cuenta con cuatro hornos y con dos líneas en cada horno. La tecnología con que cuenta es lo más sofisticada en su producción, cuenta además con máquinas formadoras de envases de secciones independientes y su producción es de 480 botellas por minuto, el tipo de material de la moldura es de aleación de bronce. También utiliza el proceso “prensa sople” que es uno de los procesos más sofisticados en la industria del vidrio y cada vez se ha ido innovando más. Existen fábricas de envases de vidrio en ciudades como Monterrey, Guadalajara, Chihuahua, San Luis Potosí y Estado de México como se puede ver Figura 1.1.

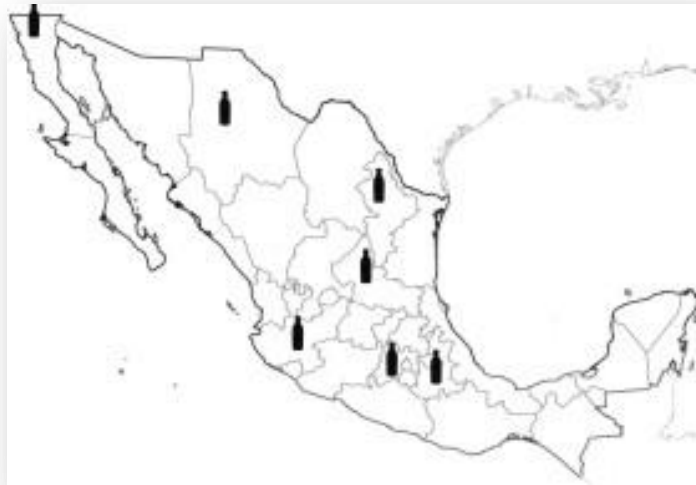


Figura 1.1 Localización de fábricas de envases de vidrio en México

1.3 Materias primas en envases de vidrio.

Las materias primas utilizadas para la fabricación del vidrio pueden considerarse como un conjunto de sustancias naturales, productos químicos y material reciclado que compone la mezcla vitrificante.

El conocimiento de las disponibilidades de materias primas y caracterización y control de estas han sido siempre, y más aún en la actualidad, objeto de atención preferente para la industria vidriera, ya que de su adecuada elección depende, en gran medida, la eficiencia del proceso de fusión, la vida de los materiales refractarios, la calidad del vidrio y, en definitiva, la economía del producto final, esto resulta especialmente importante en grandes líneas de producción en las que la creciente automatización del proceso y los rigurosos controles de calidad deja cada vez menor margen de variabilidad a las materias primas, imponen una rigurosa constancia de su composición, una estrecha tolerancia de sus características y unos niveles de impureza estrictamente controlados.

La selección de materias primas se debe elegir atendiendo los requerimientos que condicionan su utilización y normatividad. Se deben de tomar en cuenta factores en la elección de una materia prima es que cumpla lo mejor posible la función para lo que es requerida. [2]

Las materias primas empleadas para la fabricación de vidrio pueden clasificarse siguiendo un criterio empírico basado en la fundición que desempeñan durante la elaboración del vidrio, en cuatro grupos principales: vitrificantes, fundentes, estabilizantes y componentes secundarios. [2,6]

1.3.1 Vitrificantes

Bajo esta denominación genérica se agrupan las sustancias típicamente formadoras de red. Son las que constituyen el esqueleto estructural de los vidrios y, por lo tanto, las que les proporcionan sus características principales y les prestan su denominación genérica. Las propiedades de los vidrios están en gran parte determinadas por la naturaleza de los iones formadores y por el tipo de coordinación que adopten. [2]

1.3.2 Dióxido de Silicio

De todos los vitrificantes el más común empleado es el dióxido de silicio, SiO_2 . El dióxido de silicio es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice. Es uno de los componentes de la arena. Una de las formas en que aparece naturalmente es el cuarzo.

Este compuesto ordenado espacialmente en una red tridimensional (cristalizado) forma el cuarzo y todas sus variedades. Si se encuentra en estado amorfo constituye el ópalo y suele incluir un porcentaje elevado de agua.

1.3.3 Fundentes

La finalidad de este grupo de componentes es favorecer la formación de vidrio rebajando su temperatura de fusión, y facilitar su elaboración. Los óxidos que así actúan son los modificadores de red y, dentro de ellos, son los alcalinos los que mejor cumplen este cometido. La adición de fundentes viene limitada por la estabilidad del vidrio, como ya se mencionó anteriormente. La incorporación de óxidos modificadores a la red vítrea determina la apertura de enlaces Si-O-Si y, por lo tanto hace una creación de iones de oxígeno. Consigue una disminución de la cohesión del retículo que se manifiesta generalmente una disminución de las propiedades del vidrio con el aumento del coeficiente de dilatación térmica, debilitamiento de la

resistencia mecánica y de la estabilidad química de la viscosidad, mayor tendencia a la desvitrificación.

1.3.4. Óxido de sodio

De los óxidos alcalinos es el de sodio comúnmente empleado como fundente. En los vidrios convencionales, en los que entre en un porcentaje comprendido normalmente entre un 12 y un 15% en peso, representa cuantitativamente el segundo componente mayoritario después de la sílice. En términos económicos es, sin embargo, el que tiene mayor incidencia sobre el costo de la composición cuando se introduce como carbonato. Así, pues, existen dos razones suficientemente importantes para tratar de disminuir el porcentaje de Na_2O en muchos vidrios: una cualitativa y otra económica. Cualitativamente se podrían mejorar algunas propiedades de los vidrios incorporando simultáneamente dos óxidos alcalinos a su composición [2].

1.3.5 Estabilizantes

A lado de los tres grandes grupos de constituyentes del vidrio que se acaban de estudiar, se encuentran dos cuerpos que forman una familia muy especial: la de óxidos indiferentes, alúmina y óxido de hierro.

Se dice que estos dos óxidos: alúmina y óxido de hierro son indiferentes, considerados desde el punto de vista químico, puesto que pueden colocarse al lado de la sílice y de los vitrificantes como elementos ácidos, o al lado de la cal y de las bases como elementos básicos. Pero desde el punto de vista vidriero, la importancia de su papel es grande. [2]

1.3.6 Componentes secundarios

Además de las materias primas, en forma de óxidos comentadas anteriormente, en la fabricación de los vidrios entran a formar parte otras sustancias, que dan al vidrio el aspecto y textura de una variada gama de manufactura. Así, en la composición de los vidrios intervienen habitualmente otros constituyentes minoritarios con funciones determinadas: colorantes (cromita, cobalto, melite, pirta) decolorantes (selenio) y afinantes (sulfato sodio).

1.3.7 Tipos de vidrio

Casi todos los vidrios comerciales se clasifican en:

1. Vidrio de sosa y cal
2. Vidrio de plomo alcalino
3. Vidrio de borosilicato
4. Vidrio de aluminosilicato
5. Vidrio con 96 % de sílice
6. Vidrio de sílice fundida

El vidrio también se clasifica como coloreados, opacos (blancos o traslucidos), de formas múltiples (variedad de formas), de características ópticas, fotocromáticos (se oscurecen cuando se exponen a la luz), fotosensibles (cambian de claros a opacos), fibrosos (estirados como fibras largas, como en la fibra óptica), y espumoso o celular (que contiene burbujas por lo que es un buen aislante térmico). Los vidrios se conocen además como duros o blandos, en el sentido de propiedad térmica más que mecánica [2,10].

1.3.8 Color del vidrio

El color natural del vidrio es un tono verdoso, al cual se le aplican decolorantes para hacerlo cristalino y se le agregan colorantes para el vidrio de color. El vidrio coloreado puede proteger de la luz el contenido de un envase en diferentes grados dependiendo del color. En la región crítica de los rayos ultravioleta solo el ámbar y el rojo son realmente efectivos.

Tipos de colores del vidrio:

- Cristalino
- Ámbar
- Verde Georgia
- Verde Esmeralda

1.4 Horno de fundición

El vidrio comercial es hecho en hornos o en fundiciones de gas y combustóleo y con materiales refractarios a las más altas temperaturas. La materia prima es constantemente alimentada en unos de los extremos del horno llamado silo de día, mientras que el calor del gas o combustóleo se encuentra directamente sobre la superficie del vidrio desde las puertas de fuego, localizadas a las paredes laterales del horno. Los materiales crudos de cerca de $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$, son acompañados por la liberación de dióxido de carbono al descomponerse los ingredientes del carbonato. Las altas temperaturas de un horno de vidrio, se forman óxidos de nitrógeno en vez de aire. El flujo de gases calientes es pasado a través de las algunas formas de intercambio de calor con la energía recobrada usada para calentar el aire frío o el oxígeno. La producción típica de grandes volúmenes en los hornos puede producir entre de 200 a 400 toneladas en 24 horas.

El nivel de la superficie del vidrio fundido en el orificio del horno es de 4 metros sobre el piso del nivel de manufactura de botellas. El vidrio derretido es alimentado por gravedad a través de los picos o conductos de las maquinas formadoras de botella. En la figura 1.2 se muestra un esquema del horno. Los hornos de gran producción pueden ser de 20 metros de largo. La fusión ocurre en la cámara del horno principal. [5]

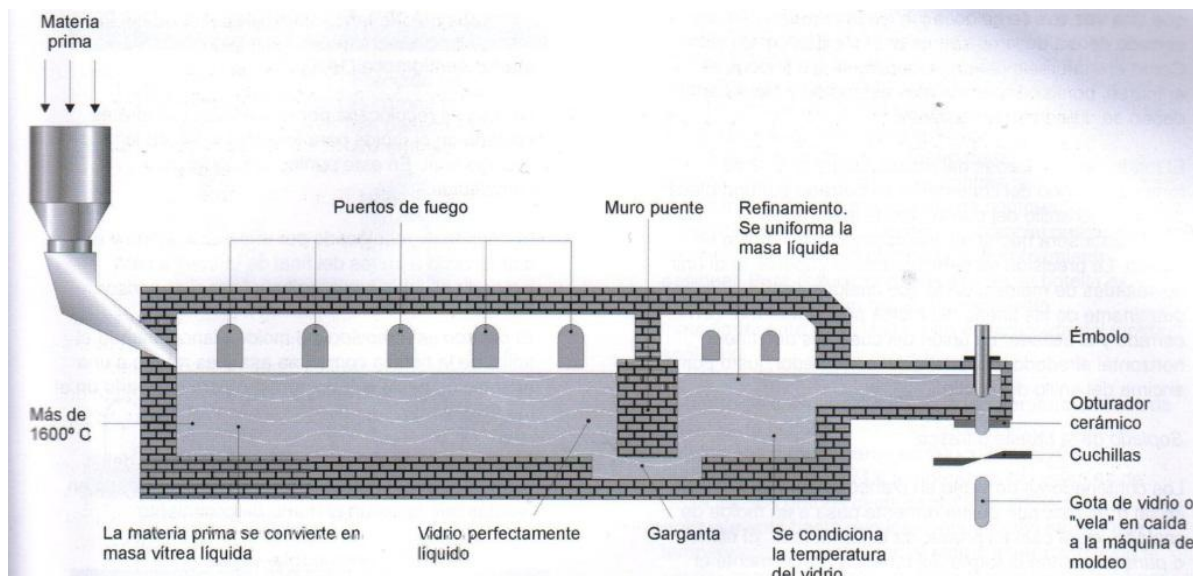


Figura 1.2 Horno de fundición de vidrio

1.5 Procesos de manufactura en la fabricación de los envases de vidrio

A continuación se describen los procesos de fabricación de los envases de vidrio que son utilizados a nivel mundial. La terminología de palabras usadas en la industria de vidrio está estandarizada por la norma ASTM C162-03 [8].

1.5.1 Proceso Soplo-Soplo

Las gotas de vidrio que caen del canal de alimentación son recogidas por un canal móvil que siguiendo un orden determinado las conduce sucesivamente hacia uno de los moldes preliminares de la máquina. Estos son colocados en posición invertida, reciben la gota y a continuación, son obturados por una cabeza sopladora que inyecta un breve golpe de aire para facilitar la penetración de la gota hasta el fondo del premolde, al mismo tiempo que un punzón situado en la parte inferior forma la boca de la botella. En la fase siguiente se retira el punzón y se efectúa una segunda inyección de aire por la parte inferior del premolde para proyectar el vidrio contra las paredes de aquel formado la preforma. Un momento después se abre el premolde y un brazo mecánico toma la preforma por su boca y lo transfiere hacia el molde terminador donde cierra el molde y entra una cabeza de soplo inyectando aire y para formar la botella, como se muestra en la Figura 1.3. La botella se transfiere hacia una banda transportadora y a la misma vez inyecta aire para controlar el enfriamiento y esto ocurra en el traslado del envase hacia el horno de recocido. [9]



Figura 1.3 Proceso soplo-soplo

1.5.2 Proceso Prensa Soplo

Este proceso se emplea para la elaboración de envases de boca ancha, boca angosta y de paredes delgadas, tales como envases no retornables y es un proceso muy utilizado en las industrias vidrieras con tecnología de alto nivel. Se diferencia de los otros procedimientos de soplado en la primera fase de conformación de la pieza en el molde preparador se realiza por prensado en lugar de por un soplo por un punzón y a su vez se transfiere al molde terminador donde la preforma ya prensada se recibe después su forma definitiva por soplado en un molde terminador, como se muestra en la Figura 1.4. [2,3]

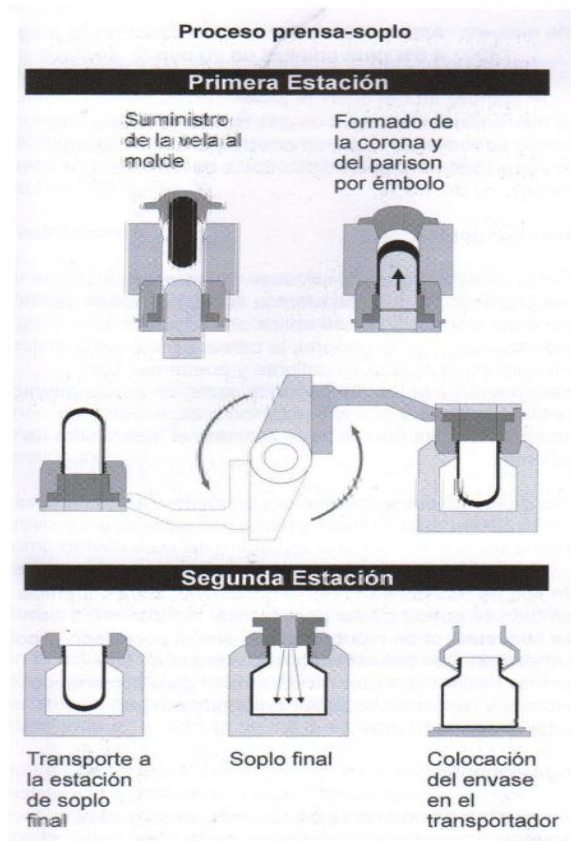


Figura 1.4 Proceso prensa-soplo

1.5.3 Tratamiento superficial

Una vez formado el envase, se traslada hacia un tratamiento de superficial que se aplica en dos etapas: tratamiento en caliente y en frío. El propósito del tratamiento en caliente superficial es para evitar daños en la superficie, mientras que el envase está todavía caliente y para ayudar a mantener la fuerza del contenedor. El material de superficial que se deposita es óxido de estaño, aunque los derivados de titanio también se utilizan. Este tratamiento tiende a generar superficies de alta fricción; para superar este problema, se añade un lubricante.

1.5.4. Tratamiento en frío

El tratamiento de superficial en frío se aplica por segunda vez al envase ya que haya sido recocido. El recocido es un proceso que reduce la tensión residual en el recipiente que se ha introducido en el proceso de conformación.

El propósito del tratamiento del extremo frío es crear una superficie lubricada que no se descompone bajo la influencia de la presión o de agua, y ayuda al flujo de los envases en las líneas de producción de alta velocidad. La aplicación es por pulverización acuosa o vapor, teniendo cuidado para evitar la entrada de la pulverización en el envase, los lubricantes más utilizadas son derivados de ceras de poliéster o polietileno.

1.6 Defectos en los envases de vidrio

Los defectos en el vidrio, lo mismo sucede que en otros materiales, pueden considerarse como defectos a todas aquellas manifestaciones que, surgidas de manera accidental alteren su naturaleza o vaya disminución de sus propiedades [11].

A continuación se enlista las definiciones de los defectos en los envases de vidrio de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-EE-032 [11,15].

Defecto crítico: Es el defecto que puede producir condiciones peligrosas o inseguras para quienes usen o mantienen el producto. Es también el defecto que puede llegar a impedir el funcionamiento o el desempeño de una función importante del producto del cual depende la seguridad personal.

Defecto Mayor: Es el defecto que sin ser crítico tiene la posibilidad de ocasionar una falla, o de reducir materialmente la utilidad de la unidad para el fin que se le destina.

Defecto menor: Es el defecto que no reduce materialmente la utilidad de unidad para el fin que se destina, representa una ligera desviación de las especificaciones establecidas y no tiene un efecto decisivo en el uso u operación de la unidad por tratarse de un defecto de apariencia.

Defectos de manufactura en los envases de vidrio:

1. Defectos de forma: Abombado, contraído, ovalamiento, corona deformada, fondo deformado, conicidad.

2. Defectos de distribución: Arruga, rebaba, costura, distribución irregular, ondulación interna, distorsión óptica y columpio.
3. Fisuras superficiales: Grietas, marcas, burbujas, golpes.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción general de los envases de vidrio.

La descripción general del envase de vidrio es un recipiente fabricado en material rígido, habitualmente vidrio o alguna variedad de plástico que tiene por lo regular un cuello más angosto que el cuerpo del recipiente y que se usa para contener productos líquidos, como agua carbonatada, cerveza, vino, etc. También hay envases metálicas que se utilizan para contener gases a presión pero su uso es más específico y menos generalizado. Según la cuarta acepción del Diccionario de la Real Academia Española, una envase también es una medida de capacidad para ciertos líquidos, equivalente a cuartillo y medio, o sea a 756.3 ml. Los envases se componen de las siguientes partes Figura 1.5 [9,11].



Figura 2.1 Partes de un envase de vidrio

2.1.2 Diseño de moldes

Partiendo de su etimología, el diseño se traduce como aquello que va de lo referente a su significado, el caso de los envases, el diseñador interpreta una necesidad, la que traducirá en un mensaje, el cual representara aquello que pretende que el receptor lo interprete. Se tienen que tomar en cuenta factores para su diseño tales como:

1. Forma, estética, estabilidad y funcionalidad en sus líneas.
2. El tipo de corona o rosca que se usará, de acuerdo al uso que se le dará.
3. La relación del envase con el contenido.
4. Color del vidrio

El vidrio tiene resistencia a la comprensión y estabilidad en la línea de llenado por lo que se le puede dar cualquier forma en el diseño, teniendo cuidado en la calidad de los moldes y en el proceso de fabricación [8].

Actualmente para los EVNR ha ido en aumento el diseño por el aligeramiento del vidrio, y se busca que sea más resistente a los defectos y adecuarlos a sus procesos de manufactura. Si la botella es ligera de peso, la máquina fábrica más botellas a grandes velocidades esto a su vez se controla sus variables de sincronización con los tiempos del formado del envase.

El departamento de diseño de moldes tiene varias funciones que cumplir como lo son:

- Diseño de equipos de molde y actualización de planos
- Establecer los límites de diseño de moldes para adaptarse a las máquinas.
- Trabajar con los departamentos necesarios para establecer comparación y las normas de diseño de moldes. Esto es extremadamente importante como los procedimientos de operación varían de un cliente a otro y, en algunos casos, de una planta a otra dentro de la misma compañía.
- Darle seguimiento a todos los primeros artículos en producción e incorporar los cambios, en su caso, a los dibujos, tan pronto como sea posible.

En la fabricación de envases de vidrio, se utilizan dos tipos de materiales; fierro fundido y bronce, por lo regular en EVNR se utiliza el bronce porque es mucho más fácil de controlar la temperatura del molde y mantenimiento, también se utiliza para tener una mejor distribución de vidrio y el manejo de altas velocidades de fabricación. Una de la desventaja del material de bronce es que si no se tiene una buena aleación de materiales tienen a fracturarse la cavidad y eso provoca defectos en los envases como son las fracturas.

A continuación se muestra la Figura 2.2 moldura de un envase de vidrio no retornable.



Figura 2.2 Moldura de un envase de vidrio

2.2 Propiedades mecánicas del vidrio

Por lo general, el comportamiento del vidrio, como el de la mayoría de los cerámicos, se considera perfectamente frágil. El módulo de elasticidad de los vidrios comerciales varía de 55 a 90 GPa y su relación de poisson de 0.16 a 0.28. Es común usar el ensayo de flexión en el vidrio para medir su resistencia. La Tabla 2.1, presenta el módulo de rotura y elasticidad de los materiales cerámicos [6].

Tabla 2.1 Tabla de módulo de rotura y elasticidad de materiales cerámicos

<i>Material</i>	<i>Módulo de rotura</i>		<i>Módulo de elasticidad</i>	
	<i>psi × 10³</i>	<i>Mpa</i>	<i>psi × 10⁶</i>	<i>MPa × 10⁴</i>
Carburo de titanio ^a (TiC)	160	1100	45	31
Óxido de aluminio ^a (Al ₂ O ₃)	30–50	200–345	53	37
Óxido de berilio ^a (BeO)	20–40	140–275	45	31
Carburo de silicio ^a (SiC)	25	170	68	47
Óxido de magnesio ^a (MgO)	15	105	30	21
Espinela ^a (MgAl ₂ O ₄)	13	90	35	24
Sílice vítrea	16	110	11	7,5
Vidrio	10	70	10	7

El vidrio ordinario es un material casi idealmente frágil porque no presenta ductilidad. La curva esfuerzo-deformación unitaria para el vidrio en tensión casi es una línea recta, tal como se observa en la Figura 2.3; su falla ocurre antes de que tenga lugar cualquier fluencia. El esfuerzo último es de aproximadamente 10, 000 psi (70 Mpa) para ciertos tipos de vidrio laminado, pero existen grandes variaciones, dependiendo del tipo de vidrio, el tamaño de la probeta y la presencia de defectos microscópicos.

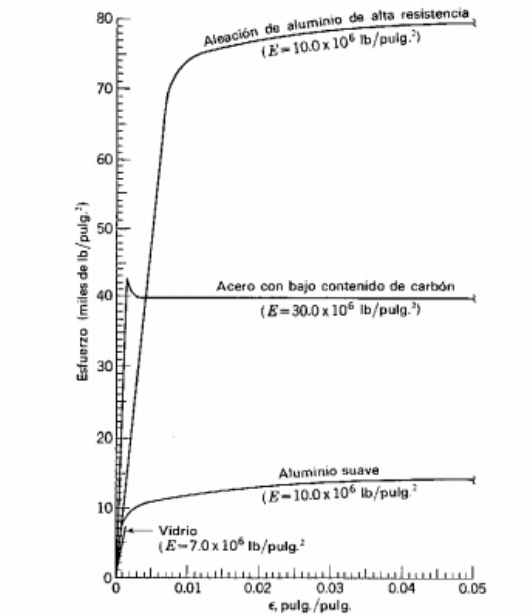


Figura 2.3 Curva Esfuerzo deformación

2.3 Resistencia mecánica del vidrio

Muchas de las propiedades mecánicas que se han comentado para los metales son igualmente importantes en el caso de los vidrios utilizados en aplicaciones. Por parte de la diferente naturaleza de estos materiales no metálicos da lugar a un comportamiento mecánico único.

La resistencia mecánica teórica del vidrio sitúa en manifiesto que sus propiedades no son suficientemente conocidas. Sus valores están comprendidos entre 6.000 y 9.000 MPa (10.000 MPa para la sílice), muy superior a la de los aceros, frente a los 50-70 MPa que presentan los vidrios soda-cálcicos. La resistencia teórica está calculada sobre la base de la energía necesaria para romper los enlaces Si-O. En la mayoría de los materiales existe una discrepancia entre la resistencia mecánica teórica y la práctica, pero rara vez supera un orden de magnitud, cosa que no sucede con el vidrio. [9,12]

2.4 Resistencia Térmica

Esta es una propiedad importante que se pretende en la mayoría de los vidrios, particularmente en aquellos que, como ocurre en muchos productos alimenticios y medicinales,

deban soportar en su utilización cambios de temperatura relativamente bruscos, en especial, en los procesos de lavado, llenado en caliente, pasteurizado, esterilización, uso con comidas, etc.

Respecto de esta resistencia, se debe señalar que la rotura no se produce por el cambio de temperatura en sí, sino por el esfuerzo mecánico de tracción provocado por el salto térmico. Éste no es más que un medio para producir esfuerzos de tracción debido a las contracciones desiguales producidas por el enfriamiento más o menos brusco del ensayo. [10,12]

2.5 Fractura del vidrio

El fenómeno de fractura se define como la separación o fragmentación de un cuerpo en dos o más partes bajo la acción de esfuerzos, mediante la creación de dos nuevas superficies: las superficies de fractura [9], en la figura 2.4 se muestra un ejemplo de cómo es una en el vidrio.

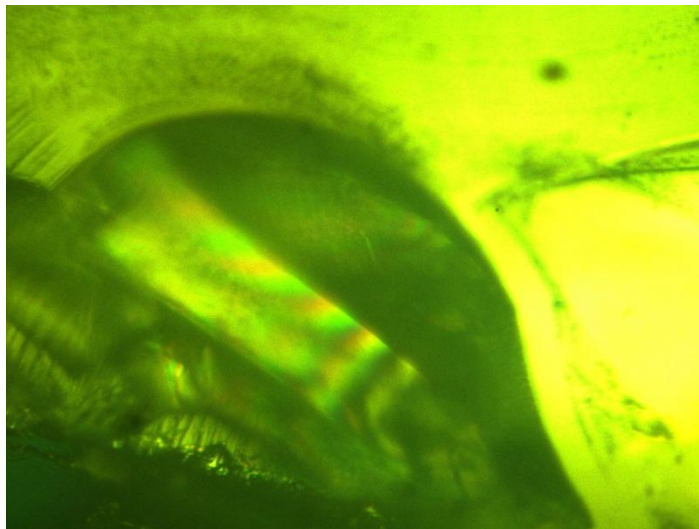


Figura 2.4 Fractura en envase de vidrio

Desde el punto de vista del comportamiento de los materiales, se reconocen dos tipos de fractura dependiendo de la cantidad de deformación previa, estas son:

- a) **Fractura frágil:** ocurre sin deformación plástica apreciable y por propagación rápida de una grieta.

b) **Fractura dúctil:** ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, entendiéndose que los refuerzos de en una región relativamente grande de la pieza rebasaron el esfuerzo de cedencia o limite elástico.

A continuación se muestra la Figura 2.5 donde muestra la clasificación de la fractura desde punto de vista de ingeniería.

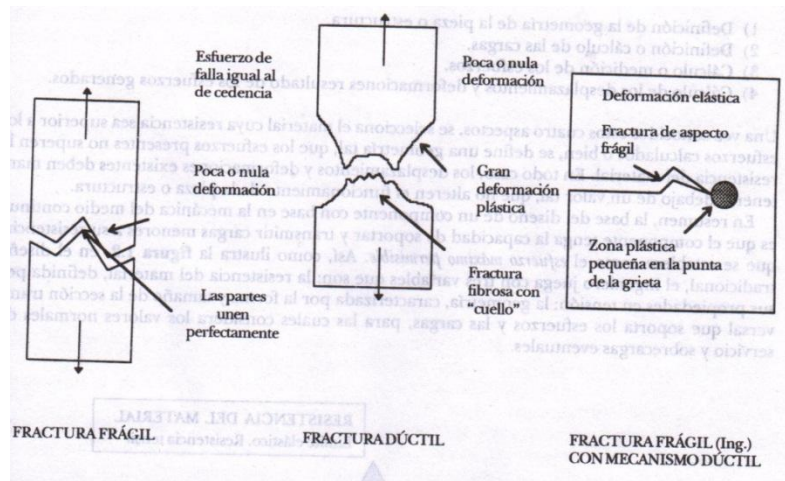


Figura 2.5 clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril.

2.6 Mecánica de fractura

Se define como un campo de separación entre las propiedades del material y de la distribución de sus defectos. Por otra parte intenta relacionar las propiedades mecánicas de los materiales con su microestructura [13,14].

En el proceso de fractura hay que tener en cuenta que cuando son materiales eminentemente frágiles, la deformación plástica a temperatura ambiente no está asociada al movimiento de dislocaciones de forma que las grietas pueden considerarse afiladas a nivel atómico.

La mecánica de la fractura relaciona el tamaño y forma de la grieta y las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas. Para esto, se apoya en el cálculo de la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta y en el establecimiento de los balances de energía que tienen lugar durante la extensión de una grieta. Existen varias metodologías de análisis de componentes agrietados, dependiendo de la extensión de la deformación plástica que precede la fractura. De acuerdo con la extensión de la deformación plástica, las categorías de la fractura son:

- a) **Fractura lineal elástica:** cuando la extensión de la zona plástica esta confinada a una pequeña región frente a la punta de la grieta y la deformación del resto del cuerpo es elástica, como se muestra en la Figura 2.6.
- b) **Fractura elasto plástica:** La zona plástica se extiende en el total remanente del ancho de la pieza pero permaneciendo como una región relativamente estrecha alrededor del plano de la grieta, como se muestra en Figura 2.6.
- c) **Colapso plástico:** La fractura es precedida de deformación plástica generalizada, como se muestra en la Figura 2.6.

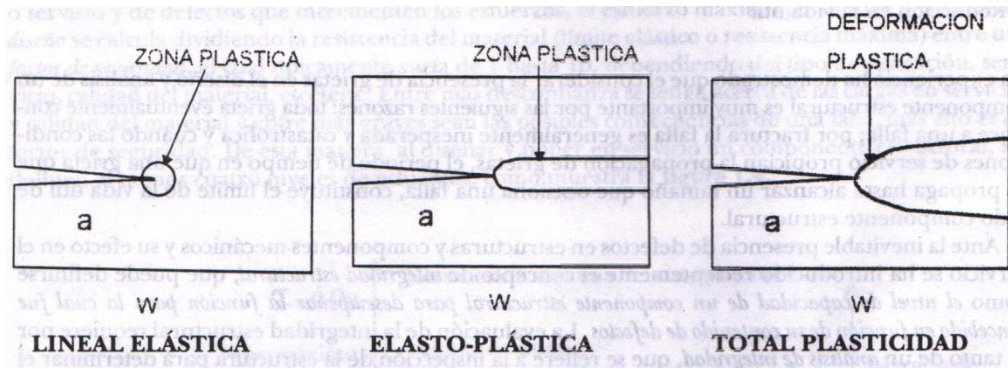


Figura 2.6 Categorías de fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica.

La mecánica de la fractura también separa la fractura en función de su dependencia del tiempo. De acuerdo con esto, la fractura se clasifica en:

- Fractura estática: es la fractura bajo una sola aplicación de carga, relativamente independiente del tiempo y con una rapidez de propagación muy grande en condiciones de inestabilidad.
- Fractura retardada o propagación de grietas: es en la que la propagación de las grietas transcurren a través del tiempo o por la acción de cargas repetitivas o fluctuantes.

2.7 Criterio de Griffith

El físico británico A.A. Griffith adelantándose a su tiempo, abordó el problema de la fractura de los cuerpos frágiles, estableciendo su célebre criterio de balance energético. Un importante precursor de los estudios de Griffith fue el análisis de tensiones de Inglis sobre el cuerpo tensionado uniformemente conteniendo una fisura elíptica [13,14].

Griffith derivó una ecuación para determinar el esfuerzo de fractura en materiales muy frágiles como el vidrio, de donde partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena una energía potencial y propuso que esta energía elástica almacenada es la fuerza impulsora del crecimiento de grietas, siempre y cuando la demanda de energía para la extensión de la grieta sea satisfecha por la conversión de la energía elástica almacenada.

Ecuación: energía potencial almacenada es:

$$U = \frac{\pi \sigma^2 a}{E}$$

Donde σ es el esfuerzo en una placa, a es el tamaño de grieta y E es módulo de Young. En un proceso de fractura completamente frágil la energía de fractura es la energía necesaria para crear dos superficies de fractura; una por cada cara de la grieta, de modo que la energía almacenada se convierte en energía superficie (γ); así, el cambio de energía es:

$$\sigma \Delta U = U + 2\gamma_s$$

Al propagarse la grieta se requiere que la rapidez de conversión de energía almacenada al menos sea igual a la rapidez de creación de energía de superficie. Se expresa matemáticamente como:

$$\frac{d\Delta U}{da} = 0$$

Al sustituir términos y resolver para el esfuerzo se obtiene la ecuación del esfuerzo de fractura de Griffith como se muestra en la Figura 2.7 [13].

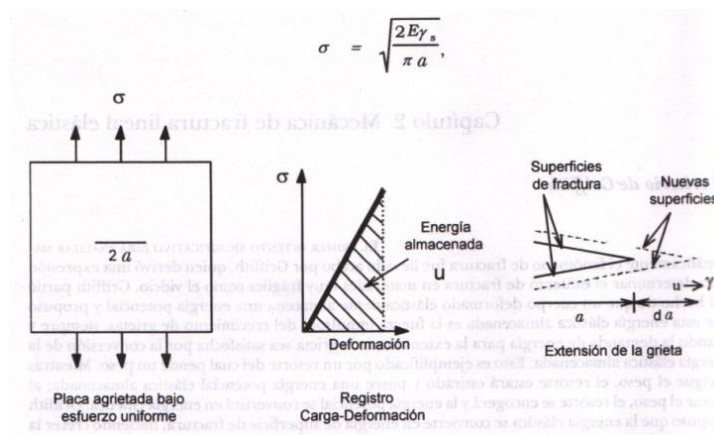


Figura 2.7 Modelo de Griffith de fractura frágil.

2.8 Fractografía en el vidrio

La práctica del diagnóstico de la fractura es una ciencia altamente desarrollada, que consiste en el examen de una ruptura en el vidrio para poder identificar la causa raíz del fallo.

Cuando el vidrio se rompe, seguirá los patrones precisos y dejar información valiosa en cuanto a exactamente cómo, cuándo y por qué se rompió. Así mismo incluyo definiciones de autores de lo que define como fractografía [10,12,20]. En la Figura 2.8 se muestra una fotografía tomada con el microscopio a 400 aumentos para su análisis de fractografía.



Figura 2.8 Fotografía de un defecto superficial

Parte del examen microscópico, normalmente mediante microscopía electrónica, se puede obtener esta información valiosa en el análisis de las roturas, tal como el modo de fractura, el estado tensional, localizar el origen de una fractura o el lugar de iniciación de una grieta, determinar la dirección de propagación de las fisuras, así conocer con mucho detalle los mecanismos de fractura, Los estudios de este tipo de denominan fractograficos.

En el análisis se debe contar con un microscopio electrónico de barrido (MEB) es el instrumento más adecuado para el examen fractografico debido a que tiene mayor resolución y profundidad de campo que el microscopio óptico, características necesarias para relevar los detalles topográficos de las superficies de fractura.

El propósito de la fractografía es analizar las características de la fractura e intentar relacionarse la topografía de la superficie de la fractura con las causas y/o los mecanismos básicos de la fractura [14,20].

Dentro del ramo de las empresas vidrieras en México no se tiene un laboratorio o centro de investigación sobre la fractografía, en EU se encuentra una empresa llamada “American Glass Research (AGR), donde ellos ofrecen este tipo de servicios pero por cuestiones de políticas de empresa ellos no publican artículos sobre análisis de fractografía en el vidrio [21].

2.9 Principales fallas que presenta los envase de vidrio

La extensa aplicación del vidrio en la actualidad y el complejo comportamiento mecánico que presenta el material ante las distintas sollicitaciones externas a que está sometido durante su uso, hace que cada vez más sea imprescindible el conocimiento del material para adaptarlo correctamente a la aplicación a la que ha sido requerido [10,11,12,19].

En la Figura 2.9 se muestra una falla en el vidrio por un impacto. Las principales fallas que se vienen produciendo en el EVNR están relacionadas fundamentalmente con los siguientes aspectos:

- Mal recocido del vidrio
- Impacto
- Presión interna
- Dimensiones/diseño
- Infundidos

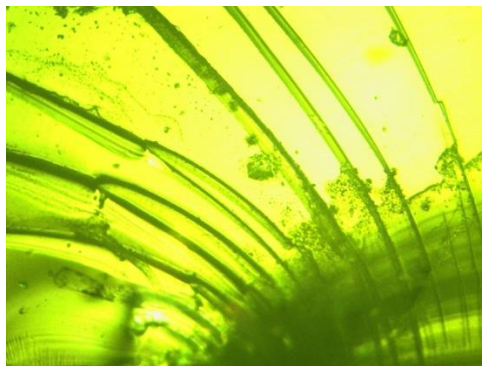


Figura 2.9 Falla de rotura en el vidrio

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA Y

EXPERIMENTACIÓN

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 Modelado del espécimen con CATIA en tres dimensiones

CATIA es un paquete informático de diseño (CAD), fabricación e ingeniería asistida por computadora, comercializado por Dassault Systèmes. El paquete está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos. Para la elaboración del diseño en CAD fue necesario tomar una serie de mediciones del envase seleccionado y así mismo dibujarlo en el paquete.

Así es mismo se hizo un diseño paramétrico que es definido como la abstracción de una idea o concepto, relacionado con los procesos geométricos y matemáticos, que nos permiten manipular con mayor precisión el diseño hasta llegar a resultados óptimos. A continuación se muestra la Figura 3.0 plano envase y diseño en tres dimensiones.

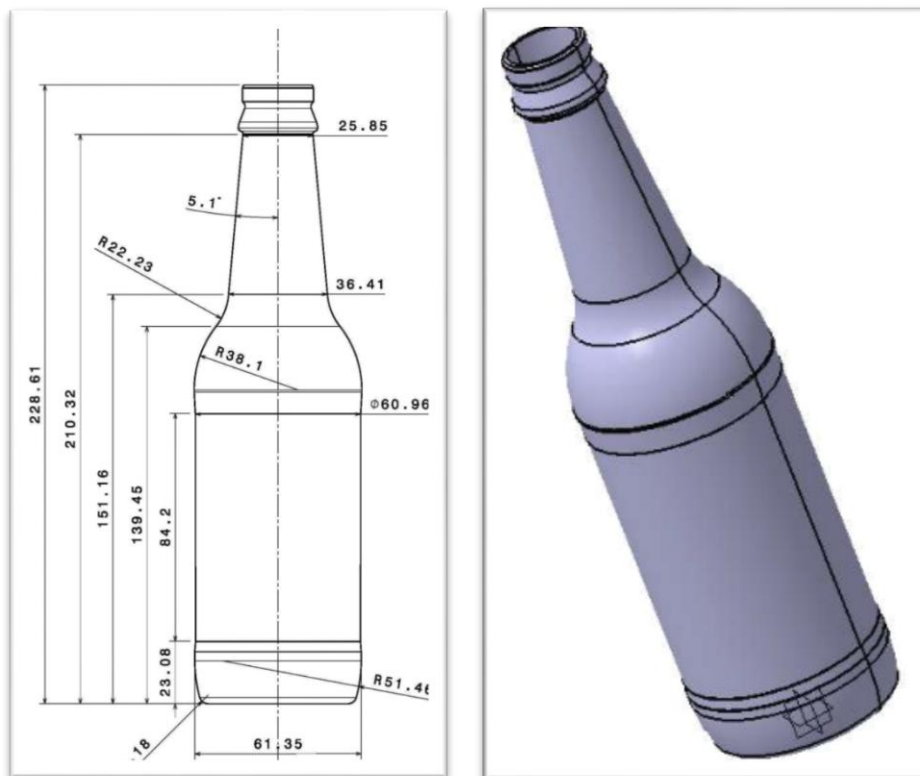


Figura 3.0 Plano del envase y diseño en tres dimensiones

3.1.1 Características EVNR color cristalino tipo cervecera normas ASTM.

Para la realización de las pruebas en los envases de vidrio debemos conocer ciertas características especiales y normas que debemos de considerar antes de empezar con el protocolo de la parte experimental. Cabe mencionar que se selección un envase con estas características tipo cervecero con un peso de 186 gramos ya que el envase cumplió con todos los datos para realizar las pruebas, a continuación se muestra la siguiente información que se consideró para la selección del envase antes mencionado.

1. Tipo de envase
2. Tipo de líquido
3. Volúmenes de gas
4. Color del vidrio
5. Altura del envase
6. Altura del hombro
7. Altura de zona de etiquetado
8. Peso
9. Tipo de corona
10. Diámetro mayor
11. Diámetro menor
12. Proceso de manufactura
13. Capacidad de líquido al derrame
14. Capacidad de líquido a la línea de llenado
15. Centro de gravedad con líquido
16. Centro de gravedad sin líquido
17. Relación entre peso y capacidad
18. Espesor teórico medio del envase
19. Número de cavidad
20. Número de fabricante
21. Año de elaboración
22. Código de puntos

Con la información anterior enlistada se tomó de referencia la norma ASTM C-162 donde nos indica la “Terminología más utilizada en las industrias de vidrio”, como es el caso en los EVNR. Igualmente se hace referencia a la norma ASTM C-224 “Práctica estándar para muestras de envases de vidrio”, donde nos muestra la toma de especímenes de envases de vidrio (por ejemplo, botellas, frascos, etc.) para la realización de pruebas tales como resistencia mecánica, dimensiones, medición visual y otras características medibles. [8,18].

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana se toma de referencia la NMX-EE-27 “Envase de vidrio para contener cerveza” donde indica las especificaciones que deben cumplir los envases de vidrio calizo moldeado, utilizados para envasar cerveza. Otra norma importante que se toma de referencia es la NMX-EE-188 “Determinación de las dimensiones y métodos de prueba para los envases de vidrio” [17]. Donde establece el método de prueba para determinar las características dimensionales de los envases de vidrio calizo y boro silicato moldeados, conforme al diseño establecido, utilizados para envasar diferentes productos.

El tipo de envase seleccionado es cervecero tipo Long Neck 355ml (12oz) con un peso de 186 gramos en color cristalino, y la corona del envase tipo rosca de acuerdo al estándar de “Glass Packaging Institute” es 26-500. Donde el número 26 significa los diámetros del detalle de los hilos de la corona y el número 500 indica el número de corona para EVNR de acuerdo al estándar de coronas del GPI. [25].

A continuación se enlistan las normas a utilizar de acuerdo a la ASTM por sus siglas en inglés “American Society for Testing Materials” y la Norma Oficial Mexicana “NMX”.

ASTM C-162-03	Standard terminology of glass and glass production
ASTM C-224-78	Standard practice for sampling glass containers
ASTM C-158-02	Standard test methods for strength of glass by flexure
ASTM C-1256-93	Standard practice for interpreting glass fracture surface
ASTM C-147-86	Standard internal pressure strength of glass
NMX-EE-188	Determinación de las dimensiones y métodos de pruebas para los envases
NMX-EE-032	Envase y embalaje-envases de vidrio para bebidas alcohólicas
NMX-EE-027	Envase de vidrio para contener cerveza especificaciones

3.1.2 Determinación de espesores teórico de la pared de EVNR.

Para la determinación de los espesores de teóricos medios en los envases se necesita tener el peso en gramos el volumen de líquido al derrame, y se calcula con la siguiente formula:

P= peso **V**=volumen **etm**= espesor teórico medio

$$etm = \frac{5}{9} \frac{Peso}{Volumen} * \frac{2}{3}$$

Con el espesor teórico medio nos puede ayudar para saber la distribución de pareces de un envase de vidrio y saber la distribución del material al momento de su manufactura.

En la tabla 3.0 se muestran los espesores teóricos de vidrio y se pueden clasificar como ultraligera, ligera, normal o pesada.

3.0 Tabla de espesores de la pared

	ULTRA LIGERA	LIGERA	NORMAL	PESADA
NNPB	< 1.8	1.8 - 2	2.0 - 2.3	2.3 - 2.6

A continuación se muestra la Figura 3.1 donde muestra el espesor de pared en el envase por zona de acuerdo a la siguiente tabla de espesor de pared por zona.

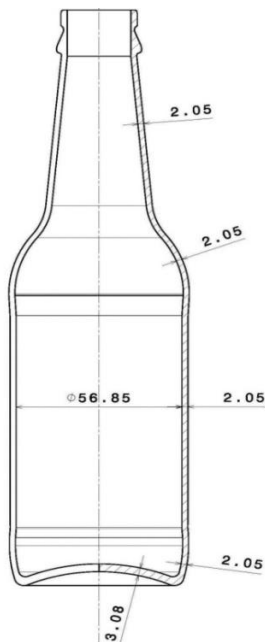


Tabla de espesor de pared por zona	
Esesor zona del cuello	2.05 milímetros
Esesor zona del hombro	2.05 milímetros
Esesor zona del cuerpo	2.05 milímetros
Esesor zona del talón	2.05 milímetros
Esesor zona del fondo	3.08 milímetros

Figura 3.1 Espesor de pared en el envase

3.2 Equipo para pruebas en los EVNR

Para la realización de pruebas de los especímenes se diseñó un equipo, donde se va analizar los comportamientos al momento de someterlo a una presión interna al envase. De acuerdo a la norma ASTM C-147-86 [26] “Métodos de prueba estándar para resistencia a la presión interna de envases” este tipo de prueba cubre la determinación de la resistencia a la rotura de los recipientes de vidrio cuando se somete a la presión interna. [26].

De acuerdo a la norma ASTM C-147-86 [26] este tipo de estándar está destinado a determinar la resistencia a la presión de los contenedores fabricados para contener productos con volúmenes de gas, razonablemente esperados para desarrollar una presión sostenida de 138 kPa (20 psi) o superior, después de procesar.

3.2.1 La resistencia a la presión interna

Es uno de los temas de mayor interés por dos razones: puede ser medida con precisión, y porque hay una clara correlación entre la resistencia a la presión y las características principales del diseño.

La resistencia a la presión o "presión de rotura" de una botella se mide mediante la aplicación de una presión interna creciente, ya sea de manera constante o en una serie de pasos, hasta que se rompe la botella. Las presiones que normalmente se miden en libras por pulgada cuadrada (psi) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2).

A continuación se muestra la Tabla 3.0 de productos de carbonatación, donde se describe los volúmenes de gas sometido de CO_2 que es la presión que se debe seleccionar y esto a su vez nos describe una relación de los espesores de pared y proceso de producción para tener un diseño más óptimo.

3.0 Tabla de productos de carbonatación

g CO ₂ /l		Norma ASTM PSI	Norma ASTM (bar)	Ø Cuerpo Pulg		Ø Cuerpo mm		Espesor de pared mínimo	Espesor de pared mínimo	Espesor de pared teórico				Fondo (in)	Fondo (mm)
>	≤			>	≤	Contacto (in)	Contacto (mm)	B&B (in)	B&B (mm)	NNPB (in)	NNPB(mm)				
2	4	116	8	1.77	2.17	45.0	55.0	0.03	0.80	0.10	2.43	0.08	1.91	0.11	2.87
				2.17	2.56	55.0	65.0	0.04	0.90	0.11	2.67	0.08	2.12	0.13	3.18
				2.56	2.96	65.0	75.0	0.04	1.10	0.12	2.91	0.09	2.33	0.14	3.49
				2.95	3.35	75.0	85.0	0.05	1.20	0.12	3.15	0.10	2.53	0.15	3.80
				3.35	3.74	85.0	95.0	0.06	1.40	0.13	3.40	0.11	2.74	0.16	4.11
4	6	145	10	1.77	2.17	45.0	55.0	0.04	1.00	0.11	2.76	0.09	2.18	0.13	3.30
				2.17	2.56	55.0	65.0	0.05	1.20	0.12	3.06	0.10	2.46	0.15	3.68
				2.56	2.96	65.0	75.0	0.05	1.40	0.13	3.37	0.11	2.72	0.16	4.06
				2.95	3.35	75.0	85.0	0.06	1.50	0.14	3.67	0.12	2.97	0.18	4.45
				3.35	3.74	85.0	95.0	0.07	1.70	0.16	3.97	0.13	3.23	0.19	4.85
6	7	174	12	1.77	2.17	45.0	55.0	0.05	1.19	0.12	3.10	0.10	2.49	0.15	3.71
				2.17	2.56	55.0	65.0	0.06	1.42	0.14	3.45	0.11	2.79	0.17	4.19
				2.56	2.96	65.0	75.0	0.06	1.63	0.15	3.81	0.12	3.10	0.18	4.65
				2.95	3.35	75.0	85.0	0.07	1.85	0.17	4.19	0.13	3.40	0.20	5.13
				3.35	3.74	85.0	95.0	0.08	2.06	0.18	4.55	0.15	3.73	0.22	5.59
7	9	203	14	1.77	2.17	45.0	55.0	0.06	1.40	0.14	3.43	0.11	2.77	0.16	4.14
				2.17	2.56	55.0	65.0	0.07	1.65	0.15	3.86	0.12	3.12	0.19	4.70
				2.56	2.96	65.0	75.0	0.08	1.91	0.17	4.27	0.14	3.48	0.21	5.23
				2.95	3.35	75.0	85.0	0.09	2.16	0.19	4.70	0.15	3.86	0.23	5.79
				3.35	3.74	85.0	95.0	0.10	2.41	0.20	5.11	0.17	4.22	0.25	6.32
9	10	232	16	1.77	2.17	45.0	55.0	0.06	1.60	0.15	3.76	0.12	3.05	0.18	4.57
				2.17	2.56	55.0	65.0	0.07	1.88	0.17	4.24	0.14	3.45	0.21	5.21
				2.56	2.96	65.0	75.0	0.09	2.18	0.19	4.72	0.15	3.89	0.23	5.82
				2.95	3.35	75.0	85.0	0.10	2.46	0.21	5.21	0.17	4.29	0.25	6.45
				3.35	3.74	85.0	95.0	0.11	2.74	0.22	5.69	0.19	4.70	0.28	7.06
10	12	261	18	1.77	2.17	45.00	55.00	0.07	1.80	0.16	4.09	0.13	3.33	0.20	5.00
				2.17	2.56	55.00	65.00	0.08	2.11	0.18	4.62	0.15	3.81	0.22	5.69
				2.56	2.96	65.00	75.00	0.10	2.44	0.20	5.18	0.17	4.27	0.25	6.40
				2.95	3.35	75.00	85.00	0.11	2.77	0.23	5.72	0.19	4.72	0.28	7.11
				3.35	3.74	85.00	95.00	0.12	3.10	0.25	6.27	0.21	5.21	0.31	7.80

3.2.2. Esfuerzo circunferencial (Hoop stress).

Los envases a presión son estructuras cerradas que contienen líquidos o gases a presión. Es importante también calcular el esfuerzo circunferencial “Hoop Stress” esto nos ayuda a determinar los cálculos teóricos de pared y saber su resistencia a la presión [34]. Donde en un cilindro hueco de pared delgada de diámetro interior d , y la pared espesor t , se somete a una presión interna p , el esfuerzo de tracción s en cada punto de la superficie externa está dado por la siguiente expresión:

$$s = \frac{p * d}{2t}$$

Por ejemplo para una botella no retornable, una aproximación de la superficie exterior de tensión de rotura a la tracción es de 4000 psi, por lo que las presiones de ruptura del cilindro p máxima, es dada por la siguiente expresión:

$$p_{max} = \frac{4000 * 2t}{d}$$

3.2.3 Tipo de aumento de presión hidrostática de un EVNR

La presión se aplica gradualmente durante un cierto período de tiempo hasta el fallo de la botella los valores obtenidos con una presión interna de 60 segundos han sido considerados como el "estándar" presión de rotura. Si la presión se mantiene durante quince minutos a una hora, la resistencia efectiva será de aproximadamente 85% del valor estándar. De un día para un año (líquidos gaseosos), la resistencia efectiva es de aproximadamente 70% de los valores normales.

El objetivo de las empresas vidrieras es hacer pruebas de presión que se lleva a cabo cuando se selecciona un envase lleno de líquido, y se desea elevar la presión interna de la botella a 175 psi. Esto es para comprobar que el tapón de sellado y que sostiene la botella de vidrio no se rompe o en alguna zona del envase.

3.2.4 Diseño de equipo de presión hidrostática

A continuación se muestra un diseño de un dispositivo para prueba de presión hidrostática ver figura 3.2, para pruebas de las muestras, el propósito es llenar con agua la cavidad del envase e inyectarle aire comprimido a una presión de 175 psi como mínimo siguiendo los métodos de los estándares de la norma.

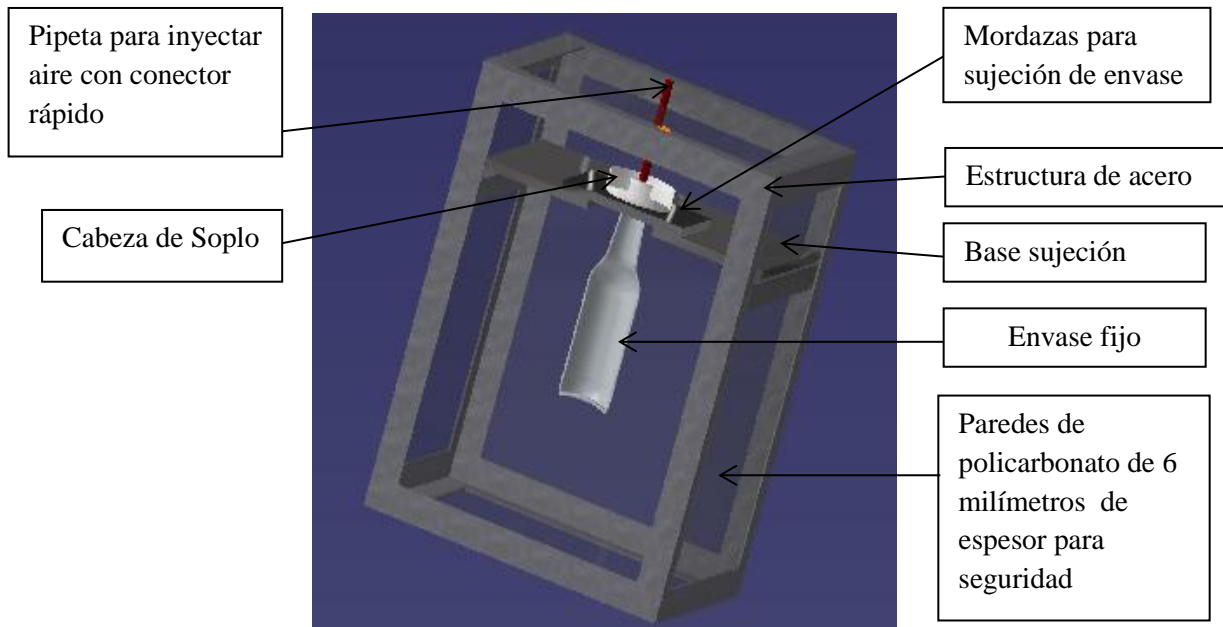
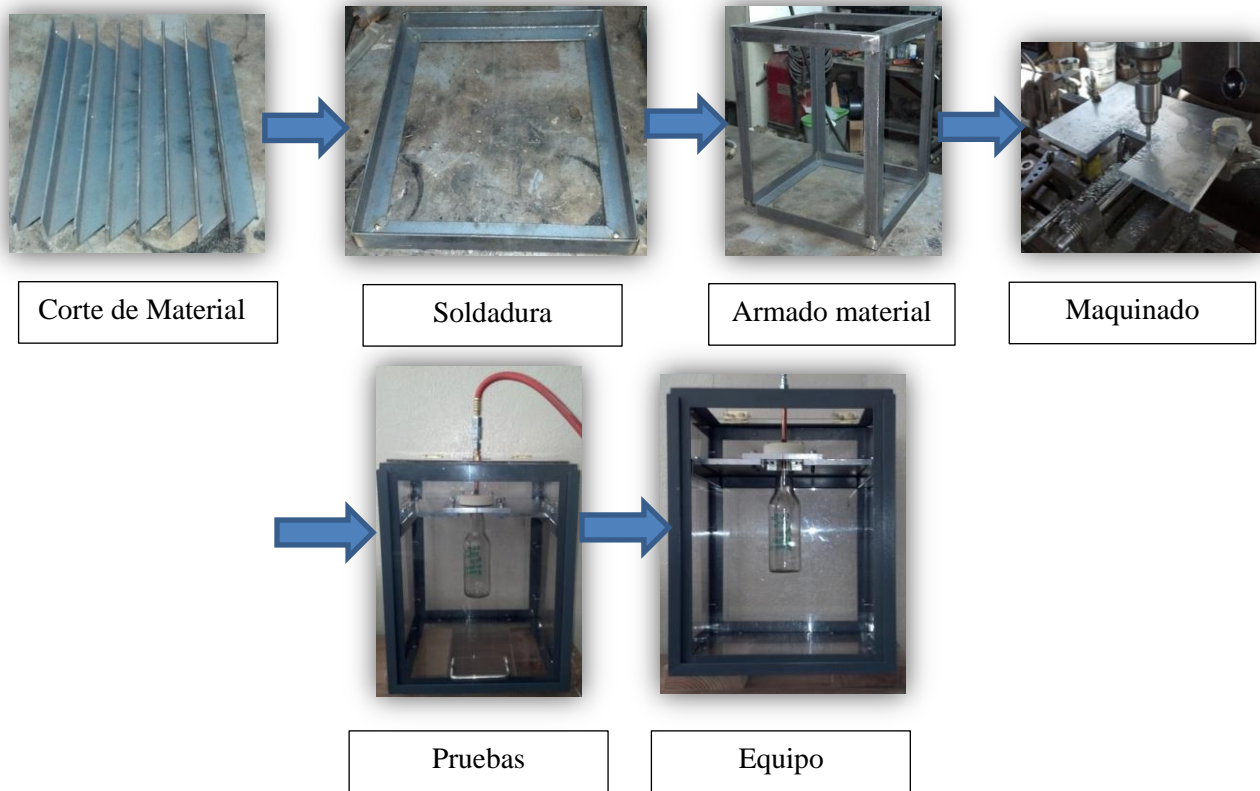


Figura 3.2 Equipo para pruebas de presión interna

3.2.5 Fabricación equipo para presión hidrostática

A continuación se describe el proceso de cómo fue fabricado el equipo, cabe mencionar que se utilizó material ferrosos y no ferrosos como el acero y aluminio y se colocaron paredes de policarbonato para tener más de seguridad. El equipo fue diseñado para poder soportar presiones superiores a los 450 psi. Se tiene que conectar una manguera de aire comprimido superior a 100 psi y una válvula con un medidor para poder agregar la presión gradualmente de acuerdo al procedimiento que se va a llevar a cabo para la parte experimental.



3.3 Metodología para la realización de pruebas

En este apartado se va a seguir la norma ASTM C-147 [26] para desarrollar una metodología para las pruebas en los envases de vidrio no retornables aplicando tres tipos de carga que son sometidos los envases de vidrio: presión interna, carga vertical e impacto, de acuerdo a las especificaciones y métodos de pruebas que se describen en los siguientes puntos.

3.3.1 Presión Interna

Los envases deben resistir la presión interna mínima establecida en la Tabla 3.1, cuando se prueben de acuerdo a lo establecido en la ASTM C-147. [26]

Tabla 3.1 - Presión interna mínima para envases que contienen cerveza.

Envase	MPa	Presión Interna Mínima	
		(lbf/in ²)	kgf/cm ²)
Retornable	1.2	175	12.3
No Retornable	1.0	150	10.5

De acuerdo a la norma se utilizan métodos que están diseñados para determinar la resistencia a la presión interna (principio de Pascal) en botellas que contengan productos a una presión de 1.406 kg/cm² de 20 psi (138 KPa) o mayor, después de ser elaboradas. En los siguientes apartados se utilizan dos métodos que a continuación se describen:

MÉTODO A. Aplicación de presión interna uniforme a un tiempo predeterminado

- a) Materiales a utilizar
 - Envases
 - Agua
- b) Equipo de presión interna
- c) Acondicionamiento del agua tiene que ser 23°C ±2°C.
- d) Preparación de los especímenes
- e) Llenar las botellas a capacidad al derrame con agua, la cual se usa como medio para aplicar presión.
- f) Las muestras a utilizar en la prueba de presión deben estar libres de defectos visuales, tales como fracturas, piedras y burbujas.

- **Prueba de aceptación:** Se considera prueba de aceptación aquella donde los resultados obtenidos en dicha prueba, pasaron el valor de la presión hidrostática mínima especificada para el envase de referencia.

- **Prueba progresiva (A un porcentaje predeterminado de ruptura):** Para propósitos de investigación, cuando se desea efectuar un análisis estadístico, se repite o continúa la prueba incrementando la presión paso a paso, en incrementos uniformes (generalmente de 1.750 a 3.501 Kg/cm³ 25 a 50 psi (172 a 335 KPa cada paso), hasta que el porcentaje predeterminado de botellas se rompa.

- **Prueba progresiva (total):** Como una alternativa a la prueba progresiva continúe.
Esta prueba hasta que todas las botellas se rompan.

g) Reporte debe incluir lo siguiente:

- Número de envases (botellas)
- Resultados de la prueba
- Presión establecida.
Presión aplicada.
Número de envases (botellas) rotos.
- Prueba progresiva.
Presión aplicada.
Número de envases (botellas) que fallaron a esas presiones.
Porcentaje predeterminado de prueba.
- Prueba progresiva (total).
Presión aplicada.
Número de envases (botellas) que fallaron a esas presiones.
Porcentaje predeterminado de prueba

MÉTODO B. Aplicación de presión interna incrementada a una velocidad constante predetermine.

Materiales a utilizar:

- Envases
 - Agua
 - Equipo de presión hidrostática
- a) Acondicionamiento del agua tiene que ser $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
 - b) Preparación de los especímenes
 - c) Llenar las botellas a capacidad al derrame con agua, la cual se usa como medio para aplicar presión.
 - d) Las muestras a utiliza en la prueba de presión deben estar libres de defectos visuales, tales como fracturas, piedras y burbujas.
 - e) Procedimiento:
 - **Prueba de aceptación:** Se considera prueba de aceptación aquella donde los resultados obtenidos en dicha prueba pasaron el valor de la presión hidrostática mínima, especificada para el envase de referencia.
 - **Prueba destructiva:** Para propósitos de investigación, cuando se desea efectuar la prueba como un análisis estadístico, incremente la presión interna hasta que cada botella se rompa.
 - h) Reporte debe incluir lo siguiente:
 - Número de envases (botellas)
 - Resultados de la prueba
 - Prueba de aceptación.
 - Niveles de presión aceptados.
 - Número de envases que fallaron a este o bajo nivel.
 - Prueba destructiva.
 - Valor de presión máxima, mínima, promedio, desviación estándar y rango.

3.3.2 Carga Vertical

De acuerdo a la norma ISO 8113: Resistencia a la carga vertical método de ensayo para envases de vidrio, establece una metodología para el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión axial en los envases de vidrio y consiste en la aplicación de una carga vertical creciente a los envases de vidrio hasta la rotura o no de los mismos, determinándose la resistencia del envase a la fuerza aplicada. En el ensayo evalúa la resistencia de los envases de vidrio, simulando el apilamiento de los empaques y embalaje en los almacenes [27].

a) Equipos y materiales

Prensa, unidad hidráulica o cualquier otro equipo con las siguientes características:

Módulo con dos platos; uno fijo y el otro móvil, para el posicionamiento del recipiente recolector de las muestras; esto debe permitir la aplicación de una carga en aumento, no necesariamente constante y que tengan un indicador de nivel de presión aplicada al ensayo. Su rango de trabajo debe estar entre 0 kg y 2676 kg (5900 lb) [27].

Debe contar con seguridad que permita asegurar; en caso de una apertura accidental de la compuerta, se termine automáticamente el ensayo y se libere la presión.

b) Procedimiento

- La temperatura del envase no puede diferir en más de 5°C con respecto a la temperatura ambiental.
- El envase debe de estar libre de defectos se requiere una inspección visual.
- No deben existir partículas de vidrio en la base donde va colocado el envase.
- El incremento o el promedio de velocidad en la fuerza debe ser constante y ser reportado

c) Prueba de paso

- Ajustar el valor deseado del nivel de carga para el ensayo en el indicador de nivel de la unidad hidráulica.

- Iniciar el ensayo y una vez culminado el ciclo, revise dentro del recipiente el estado del envase de vidrio.

d) Prueba de rotura

- Ajustar al máximo nivel de carga para el ensayo en el indicador de nivel de la unidad hidráulica.
- Iniciar el ensayo y observe en el indicador de nivel de carga el valor de la fuerza aplicada al momento de romper el envase.

e) Reporte debe contener la siguiente información:

- Fecha de realización de la prueba.
- Identificación completa de las muestras y cantidad de muestras ensayadas.
- Método de ensayo utilizado.
- Fuerza aplicada al envase en el momento de la rotura del mismo, expresada en kilogramos.
- Nombre de la persona que realizó el ensayo
- Observaciones

3.3.3 Impacto

Los envases de vidrio están sujetos a los impactos durante el manejo en líneas de producción, la carga, transporte y en el uso. El tipo de pruebas que son sometidos a un impacto comprende un péndulo simple que se utiliza para entregar una fuerza impactada que puede ser en el hombro o en el talón de un envase, siendo estos los puntos naturales de contacto. Cuando un envase de vidrio se impacta, desarrolla una fuerza sobre el área de contacto común entre el envase y el objeto impactante.

Las fuerzas de un impacto pueden aumentar cuando se tiene velocidad de choque, contacto de rigidez y masa efectiva.

A continuación se muestra en la Figura 3.3 equipo de impacto de un péndulo para probar las áreas de contacto en EVNR.



3.3 Equipo de prueba de impacto péndulo

La empresa American Glass Research (AGR) [21] es una empresa a nivel mundial que hace investigación y que actualmente tiene un diseño de un probador de péndulo y es uno de los más usados en la industria, es utilizado en todo el mundo pero no hay normas o procedimientos formales que son utilizados para cada producto por ejemplo, botellas no retornables, se utiliza el criterio en los departamentos de calidad de ser juzgados en un "pasa / no pasa". En la práctica,

los fabricantes de vidrio y laboratorios de prueba son conscientes de la fuerza que requieren los productos individuales y son guiados por la experiencia en la decisión de un nivel seguro. A continuación se muestran los tipos de impacto en los envases:

- **Impacto Severo:** Este sucede cuando hay un choque con un cuerpo rígido y este rebota, comúnmente sucede al momento del traslado de los envases en las líneas de producción como se muestra en la Figura 3.4.

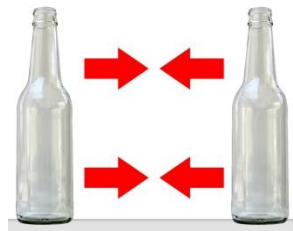


Figura 3.4 Impacto Severo

- **Impacto moderado:** Este sucede cuando hay un choque con otros que están estacionados por acumulamiento como se muestra en la Figura 3.5.

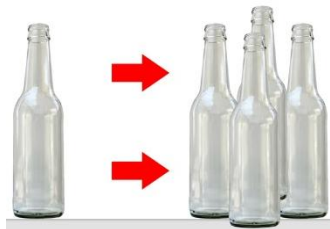


Figura 3.5 Impacto moderado

- **Impacto suave:** Este sucede cuando hay un choque con otro que está estacionado como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Impacto suave

Para las pruebas de impacto en el caso de EVNR que se utilizan para CO₂ da, valor mínimo de alrededor de 76 cm/s donde se considera es el mínimo apropiado para el impacto y aproximadamente en la prueba del péndulo son golpeados por un martillo con un ángulo de 120 grados de 30 a 40 golpes en la zona del hombro y talón del envase.

3.4 Experimentación

3.4.1 Información sobre especímenes

En la selección de la muestra se recolectaron envases producidos por primera vez y envases ya usados con líquido con 2 Vol. de gas de CO₂. A continuación se muestra la siguiente Tabla 3.2 donde muestra la información recabada del espécimen para la experimentación.

Tabla 3.2. Mediciones del espécimen

Tipo de envase	Long Neck
Tipo de líquido	Cerveza
Volúmenes de gas	2 Vol Gas CO₂
Color del vidrio	Cristalino
Altura del envase	228.6 mm
Altura del hombro	120 mm
Altura de zona de etiquetado	84.535 mm
Peso	186 grs
Volumen Total	471.55 cm
Tipo de corona	GPI 26502
Diámetro mayor	61.77 mm
Proceso de manufactura	NNPB
Capacidad de líquido al derrame	377.35 ml
Capacidad de líquido a la línea de llenado	355 ml
Centro de gravedad con líquido	Y=83.2
Centro de gravedad sin líquido	Y=90.5
Angulo de estabilidad	16.18°
Relación entre peso y capacidad	0.5239 grs/ml
Espesor teórico medio del envase	1.97884 mm
Espesor teórico medio min. del envase	1.08836 mm
Número de cavidad	60
Número de fabricante	45
Año de elaboración	2012
Código de puntos	Si

Es importante hacer una relación de las muestras obtenidas para la parte de experimentación. El primer muestreo se hizo con una relación de 20 envases como se dijo en el apartado anterior. Esto es para tener un mejor control y análisis de las muestras previamente identificadas. A continuación se muestra la Tabla 3.3 que es la relación de las muestras.

Tabla 3.3 Relación de muestras para experimentación

Muestra	No. Molde del envase	Peso del evase en gramos
1	17	186
2	49	185
3	43	186
4	27	188
5	7	186
6	41	186
7	20	185
8	12	186
9	13	186
10	63	185
11	51	186
12	31	186
13	12	185
14	56	186
15	47	186
16	17	185.5
17	18	186
18	43	186
19	6	186
20	30	186

3.4.2 Presión Hidrostática

Para la experimentación de presión hidrostática que se realizó con el equipo antes descrito se siguió el siguiente proceso como se muestra en la Figura 3.7 diagrama de proceso para someter presión a envases.

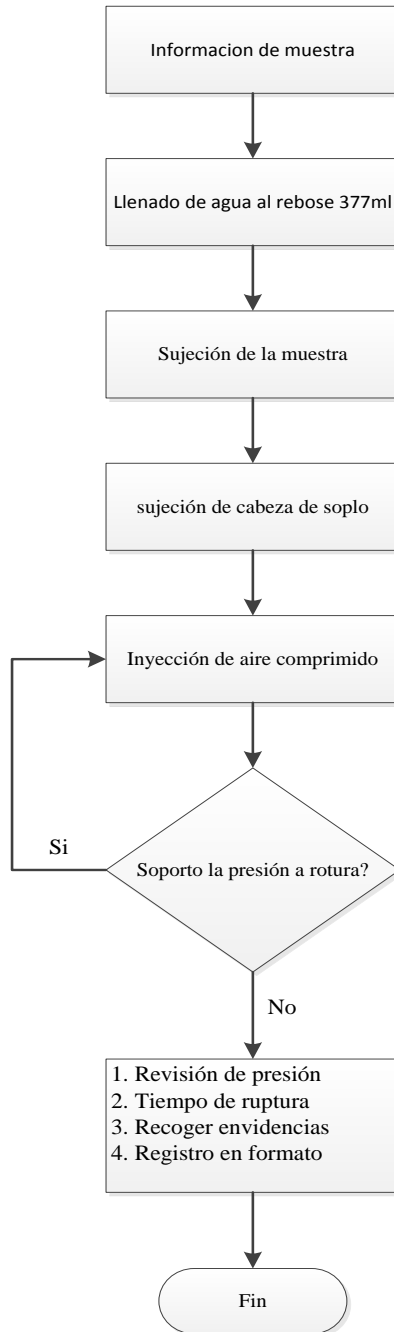


Figura 3.7 diagrama de proceso para someter presión a envases.

A continuación se muestra la Tabla 3.5 con los resultados de la presión interna registrada. El objetivo de este experimento es llegar hasta la ruptura del envase, para conocer a que presión falla. Se realizaron un total de 20 muestras con un peso promedio de 186grs. En tabla 3.4 se muestran los diferentes comportamientos con la presión de aire inyectada la cual provocó una variación entre 175 a 350 psi a excepción de la muestra #4 que tuvo una duración de 30 segundos, donde se aplicó una presión de 320 psi hasta su ruptura final. Todas las muestras fallaron a las condiciones de presión especificadas entre 1 y 4 minutos.

Tabla 3.4 Registro de pruebas elaboradas en la experimentación

Muestra	No. Molde del envase	Peso del evase en gramos	Presion (psi) sometida	Duracion	Resultados	Esfuerzo circunferencial
1	17	186	200	1 min	Ruptura total	3119
2	49	185	220	1 min	Ruptura total	3431
3	43	186	200	2 min	Ruptura total	3119
4	27	188	320	30 seg	Ruptura total	4991
5	7	186	250	1 min	Ruptura total	3899
6	41	186	200	1 min	Ruptura total	3119
7	20	185	200	1 min	Ruptura total	3119
8	12	186	200	1.30 min	Ruptura total	3119
9	13	186	200	1 min	Ruptura total	3119
10	63	185	200	1 min	Ruptura total	3119
11	51	186	200	4 min	Ruptura total	3119
12	31	186	145	3 min	Ruptura total	2261
13	12	185	300	1 min	Ruptura total	4679
14	56	186	200	1 min	Ruptura total	3119
15	47	186	200	2 min	Ruptura total	3119
16	17	185.5	350	1 min	Ruptura total	5459
17	18	186	200	1 min	Ruptura total	3119
18	43	186	200	1 min	Ruptura total	3119
19	6	186	200	1 min	Ruptura total	3119
20	30	186	200	2 min	Ruptura total	3119

A continuación se muestran las siguientes Figuras 3.8 imágenes de las muestras durante la experimentación presión hidrostática.



Figura 3.8 Imágenes durante experimentación presión hidrostática

A continuación se muestran la siguiente Figura 3.9 comportamiento del esfuerzo circunferencial de los ensayos realizados durante la experimentación presión hidrostática.

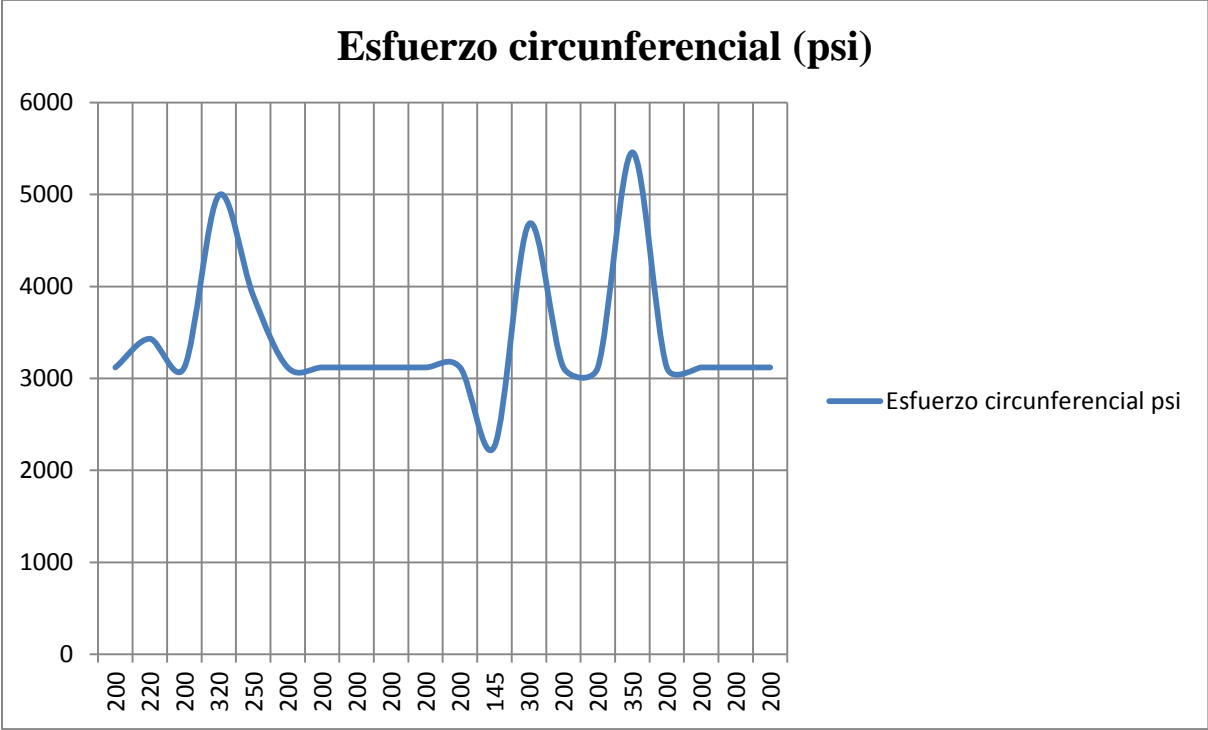


Figura 3.9 Comportamiento del esfuerzo circunferencial.

3.4.4 Análisis de experimentación sometidos a presión hidrostática

En las figura 3.10 se muestra los diferentes zonas donde inicio la fractura y además tuvo una propagación en la geometría esto es por la fragilidad del vidrio ya que se debe a la escasa velocidad con que se relajan en él las tensiones mecánicas que se generan cuando se aplica un esfuerzo determinado que en este caso fue presión interna.



Figura 3.10 Imágenes de espécimen experimentación presión hidrostática

El objetivo de este experimento es observar y estudiar su comportamiento mecánico del material y la geometría. Y así mismo analizar el inicio de la fractura para poder encontrar las posibles causas de la falla.

3.4.5 Carga Vertical

Se realizaron las pruebas de experimentación de carga vertical, se realizaron con una capacidad de carga de 70 toneladas a compresión. La prueba consistió aplicar carga hasta su rotura. A continuación se presentan el reporte del experimento de acuerdo a los datos que se siguió de acuerdo al estándar.

Reporte de prueba

Fecha de realización de la prueba.	14 Mayo 2013
Identificación completa de las muestras y cantidad de muestras ensayadas.	No. Molde 23 Peso 186grs
Método de ensayo utilizado.	Prueba de Rotura
Fuerza aplicada al envase en el momento de la rotura del mismo, expresada en kilogramos.	2554 kg/f
Nombre de la persona que realizó el ensayo	Jorge Anguiano L.
Observaciones	Envase llego hasta su punto de rotura total, la carga se le fue aplicando paulatinamente

Se muestran fotografías de las Figura 3.11 del proceso en la prensa de compresión.



Colocación espécimen



Ajuste espécimen



Rotura Total



Resultado 2,554 kg_f

Figura 3.11 Imágenes de espécimen experimentación carga vertical

El objetivo de este experimento es saber qué tanta presión de compresión soporta los EVNR y saber las zonas donde se empieza a romper el vidrio para poderlo comparar con la simulación numérica.

3.5 Análisis EVNR por el método de elemento finito

El método de elemento finito se ha convertido en el método estándar más usado actualmente para la simulación numérica. Este procedimiento no se emplea solo para grandes empresas, como en la industria vidriera, automovilística y la aeronáutica, si no que cada vez, mas también en las pequeñas empresas y medianas empresas se utiliza este programa. Este método es utilizado para resolver mediante ecuaciones matriciales las diversas ecuaciones diferenciales que se plantean en las distintas estructuras. [35]

Para el análisis en los envases se utilizó el paquete de la compañía MSC Patran que es un software pre y post-procesamiento de CAE. A continuación se muestra una lista con los siguientes parámetros para realizar en análisis de presión interna y carga vertical.

1. Creación de base de datos.
2. Importar geometría en Catia.
3. Creación de mallado.
4. Aplicar restricciones.
5. Aplicación de cargas
6. Selección de Materiales vidrio (Módulo de Young, Relación de poisson).
7. Seleccionar el tipo de análisis.
8. Procesamiento de datos.
9. Resultados.

Lo anterior con la finalidad de obtener la distribución de esfuerzos y deformaciones ocasionados por la presión interna aplicada; así como obtener las zonas de concentración de esfuerzos y a partir de aquí correlacionar los resultados teóricos de la simulación con los obtenidos en las pruebas experimentales.

Se muestran los resultados del análisis de presión interna por elemento finito del envase de vidrio. La presión que fue sometida fue a 175 (psi) que equivale a 2.0 vol. de CO₂ a 63°C. El objetivo de este análisis es indicar en que parte del envase es donde se concentran más los esfuerzos como en las zonas del hombro, talón y fondo. La información obtenida se va a correlacionar con el análisis experimental.

El análisis muestra las diferentes las zonas críticas que corresponden como lo son: al zona del cuello, zona del hombro, zona de contacto y zona del talón, del envase de vidrio, tal como se presenta en la Figura 3.12 Cabe mencionar que en la zona de cuello es donde se aplicó una restricción en el envase para dicho análisis.

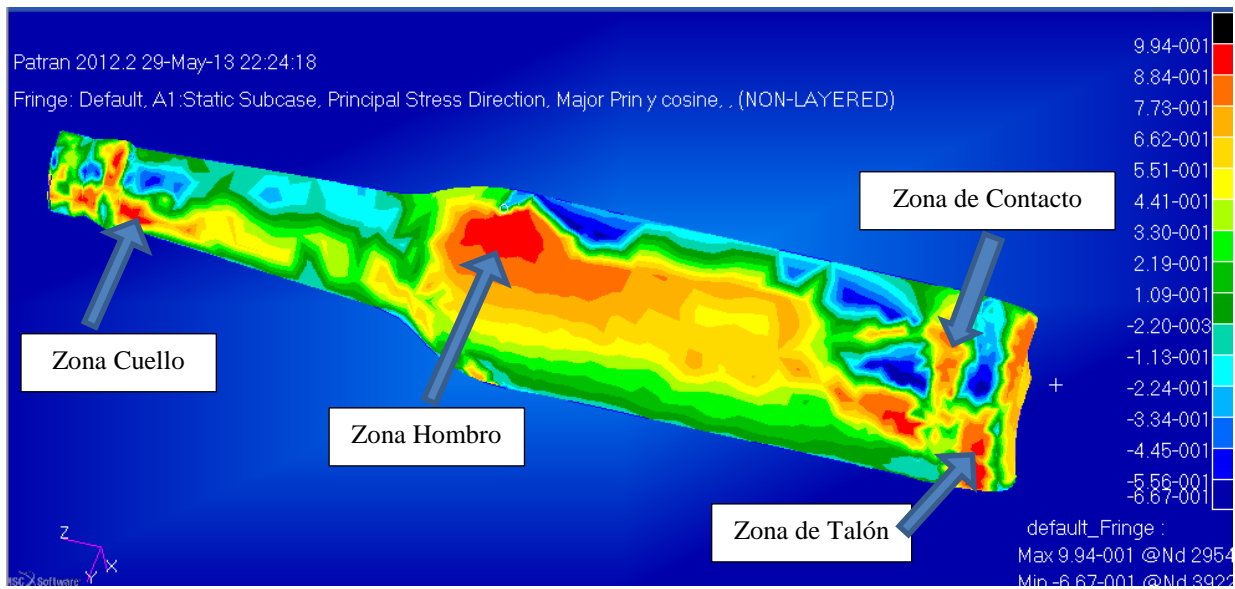


Figura 3.12 Análisis Elemento Finito de Presión Interna

En la Figura 3.13 se muestran los resultados del análisis de carga vertical por elemento finito del envase de vidrio. La fuerza en que fue sometido fue de 680 kg_f. En el análisis se muestran las diferentes zonas donde se concentran mayor esfuerzo que son identificadas como zona del hombro y talón del envase.

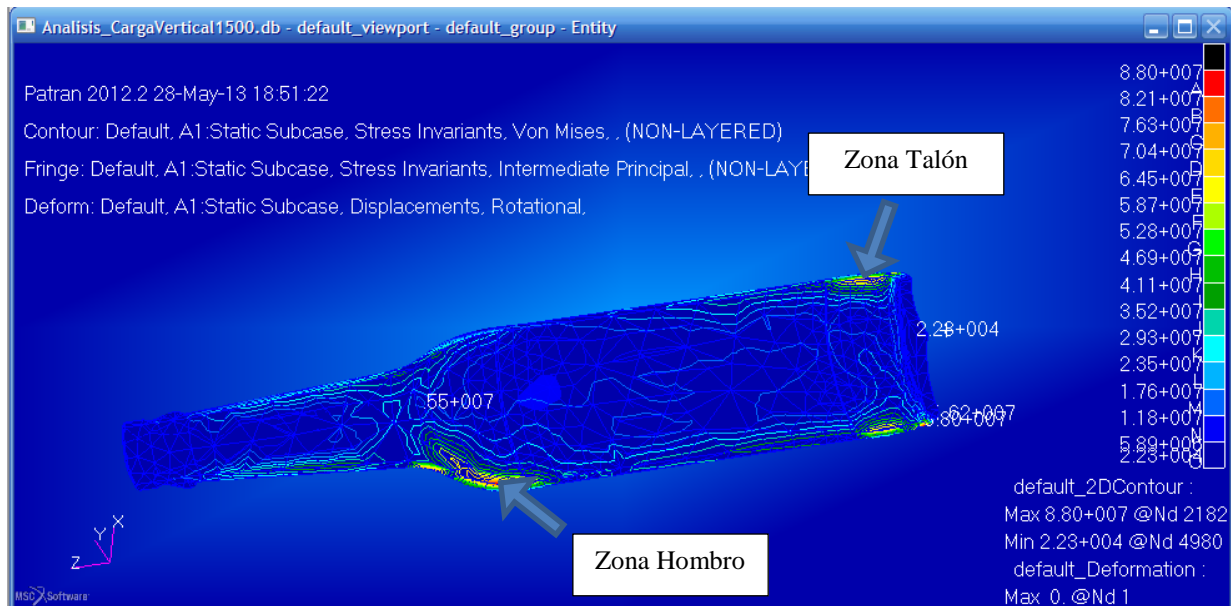


Figura 3.13 Análisis Elemento Finito de Carga vertical (compresión).

3.6 Método del uso de fractografía

El propósito de la fractografía en los EVNR es analizar las características de fractura y tratar de relacionar la topografía de la superficie de fractura de las causas y/o los mecanismos básicos de la fractura.

De acuerdo a la ASM por sus siglas en inglés (American Society Materials Handbook Fractography) dice que la fractografía se utiliza a menudo para ayudar a identificar los hechos que han dado lugar a la fractura de un objeto de vidrio. En esta práctica se define el aspecto de distintos elementos de superficie de fractura, así como su método de formación. [20,32,40]

Para observar una fractura en los EVNR se puede emplear desde la observación a simple vista, hasta la observación microscopía electrónica. Con el uso de la fractografía se pretende encontrar:

- a) Determinar la dirección de propagación de la grieta.
- b) Aprender la secuencia de la propagación de la grieta.
- c) Localizar el punto de origen de la grieta.
- d) Observar cualquier interacción entre el frente de la grieta o inclusiones y defectos inducidos.
- e) Deducir el estado sometida a una tensión en el momento de la fractura
- f) Encontrar las zonas de espejo, zona niebla y zona estrías.

3.6.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Es uno de los instrumentos más interesantes hoy en día para obtener imágenes de la fractura de los materiales, combina en un mismo aparato las ventajas de la lupa binocular, incluso mejorando su poder de profundidad de campo, y los elevados aumentos propios de la microscopía electrónica. En la tabla 3.5 se muestra un esquema de las principales técnicas que se pueden emplear para el estudio de la fractografía y técnicas auxiliares que ayudan a su interpretación. [36].

Las aplicaciones del MEB son muy variadas, y van desde la industria metalurgia hasta la medicina forense. Sus análisis proporcionan datos como textura, tamaño y forma de la muestra.

El MEB es muy utilizado en la caracterización microestructural de materiales. Identificación, análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en diversos materiales tales como metales, cerámicos, materiales compuestos, semiconductores, polímeros y minerales. Composición de superficies y tamaño de grano. Valoración del deterioro de materiales, determinación del grado de cristalinidad y presencia de defectos. Identificación del tipo de degradación: fatiga, corrosión, fragilización, etc. [22,33].

Tabla 3.5 Técnicas de microscopia empleadas en el estudio de la fractografía

TÉCNICAS PRINCIPALES		TÉCNICAS AUXILIARES	
Obtención de muestras			
Microscopia	<u>Óptica</u>	Microscopio Lupa Binocular	
	<u>Electrónica</u>	Microscopia Electrónica de Transición Microscopia Electrónica de Barrido	Difracción de electrones Análisis de Energía Dispersas (EDX) Análisis con cristal Analizador (WDX) Catodoluminiscencia Espectroscopia Auger Diagramas cristalograficos de canalizacion de electrones

3.6.2 Zonas estrías, espejo y fractura

Los materiales frágiles como el vidrio presentan una de las superficies de fractura más características. Cuando el vidrio se fractura, debido a un esfuerzo sometido, la nueva superficie creada, es denominada superficie de fractura, por la rotura se presenta tres zonas perfectamente delimitadas en la superficie de fractura tal y como se muestra en la Figura 3.14.

Con la ayuda de un microscópico se examinó las zonas de la superficie de fractura, y también podemos encontrar las regiones como zona de estrías, zona de espejo y origen de la fractura. En donde muestran que la rugosidad observada es un resultado de desviaciones microscópicas de secciones de superficie localizadas de distancia desde el plano principal de la fractura.

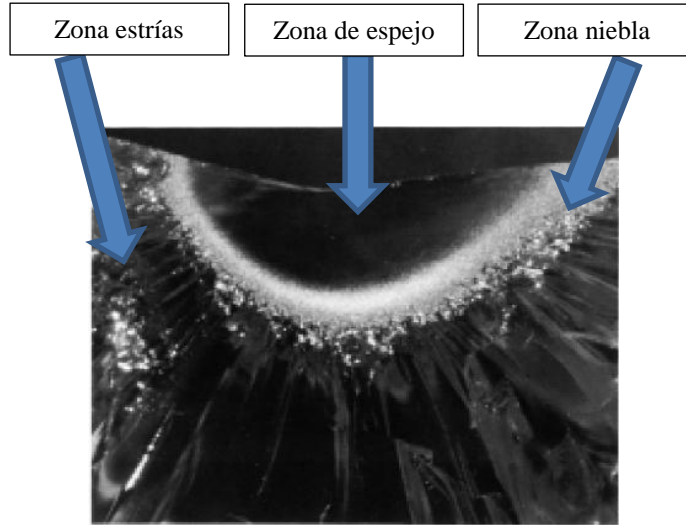


Figura 3.14 Origen de fractura y zonas de estrías y espejo.

A continuación se describen las zonas de estrías, espejo y zona de la fractura.

- Zona de espejo: Es donde inicia la fractura (origen) la forma nos da la idea de la distribución de las tensiones y el tamaño indica la magnitud de la tensión que generó la fractura.
- Zona de niebla: Está formada por un arco estrecho que rodea a la zona de espejo y si superficie de la fractura y esta presenta un aspecto rugoso.
- Zona de estrías: Zona de fractura propiamente dicha, está formada por dos tipos de líneas que comprenden a la interacción con defectos del material de las ondas de propagación.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

CAPÍTULO IV. RESULTADOS OBTENIDOS

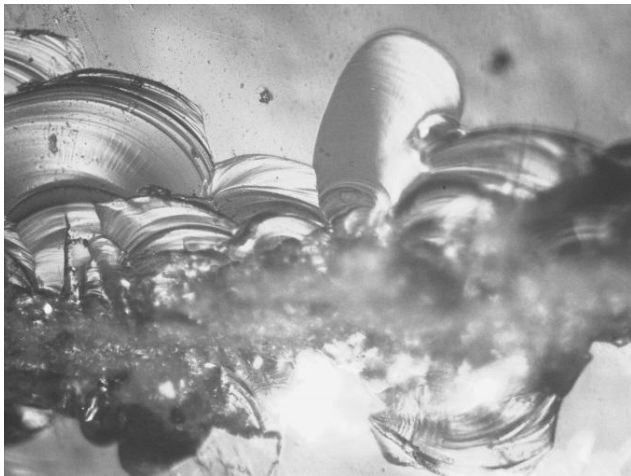
4.1 Análisis de fractografía

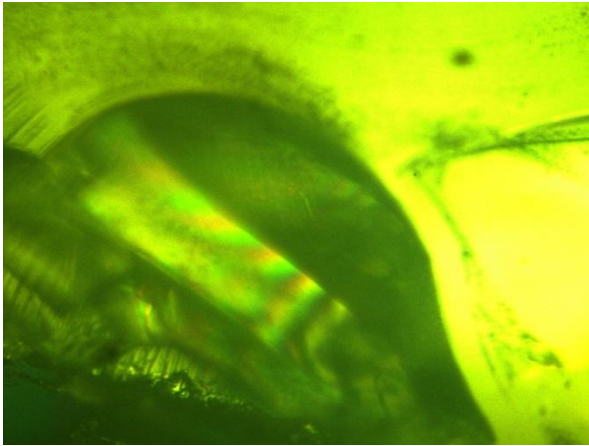
Se efectuó un análisis fractográfico, tomando fotografías con el microscopio electrónico de barrido en diferentes zonas de los envases una vez que estos fueron sometidos a pruebas de presión interna; las zonas principalmente analizadas fueron las correspondientes a la zona del hombro, zona de contacto y zona del talón de la botella.

Este análisis se realizó en dos etapas: la primera consistió en la toma de fotografías con el microscopio de muestras de vidrio a 400x, resultantes de las pruebas experimentales de presión interna, de diferentes zonas del envase como lo son: zona del hombro, zona de contacto y zona del talón, con la finalidad de detectar microfisuras; y la segunda fue la utilización del microscopio electrónico de barrido.

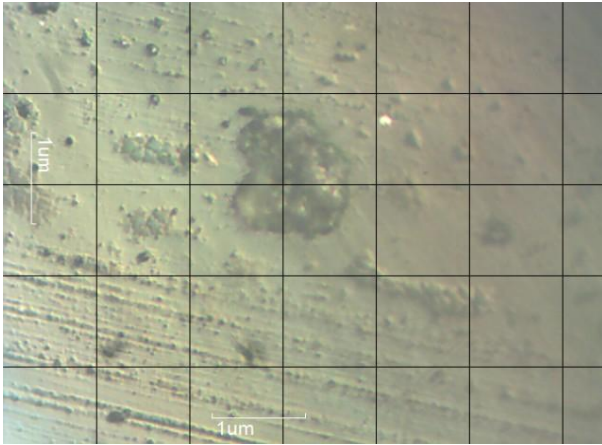
A continuación se muestran las siguientes observaciones en la tabla 4.0 con imágenes donde se observa el resultado de fractura de la superficie con el microscopio.

Tabla 4.0 Imágenes tomadas con microscopio y observaciones.

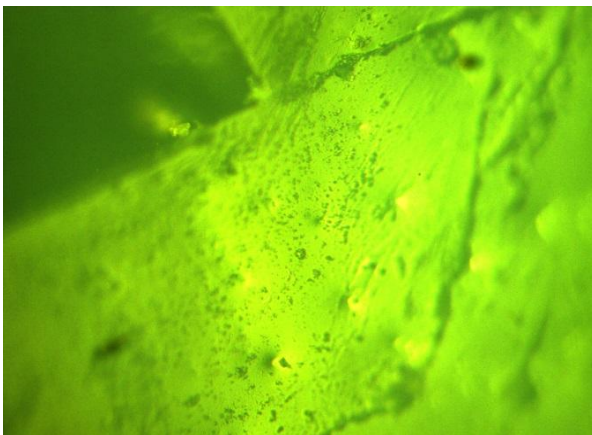
Imágenes Microscopio 400x	Observaciones
	<p>En esta imagen se observa el inicio de la fractura. La imagen fue tomada a 400x. Se visualiza las zonas de espejo del material que es donde inicia la fractura (origen).</p>



En esta imagen se observa la fractura del material y un tipo arcoíris esto se debe a que en esa zona el material no se alcanzó a recocer en el proceso de recocido del envase. Puede provocar tensiones en el material y que se fracture. Se utilizó un filtro de color amarillo para tener una mejor apreciación de la imagen. La imagen fue tomada a 400x.



En esta imagen se observa la topografía de la superficie con defectos como infundido de algún material. La imagen fue tomada a 400x.



En esta imagen se observa la topografía de la superficie con defectos como líneas y porosidad en el material. Se utilizó un filtro de color amarillo para tener una mejor apreciación de la imagen. La imagen fue tomada a 400x.

4.1.1 Resultados de microscopía electrónica de barrido (MEB)

Observaciones con el microscopio electrónico de barrido de las muestras de vidrio para su estudio, esto representa una aplicación del MEB en análisis de fracturas en materiales frágiles como lo es el vidrio. El material estudiado corresponde a muestras de envases de vidrio no retornables, para ello fue necesario estudiar el mecanismo de fractura de este material. Para llevar a cabo este estudio se han analizado un total de 7 muestras de vidrio.

Los objetivos de la caracterización de este material por medio del SEM son:

1. Observar la topografía de las superficies de fractura.
2. Analizar el mecanismo de fractura estudiada.
3. Detectar impurezas en las muestras.
4. Detectar defectos como microfisuras en superficies.
5. Analizar el material con EDS (Detector de Energía Dispersa) para caracterizar el material analizado.

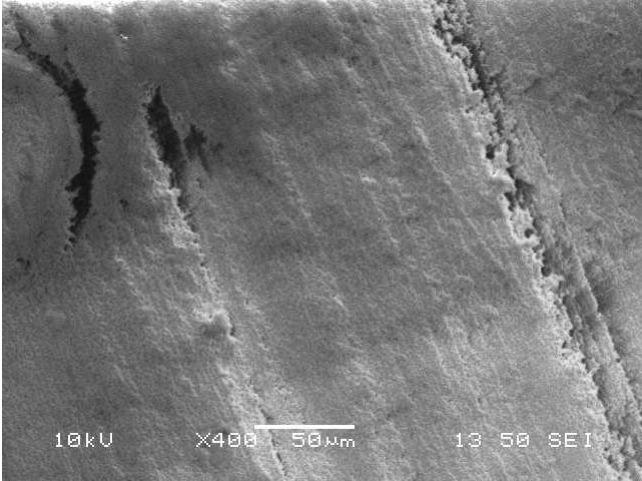
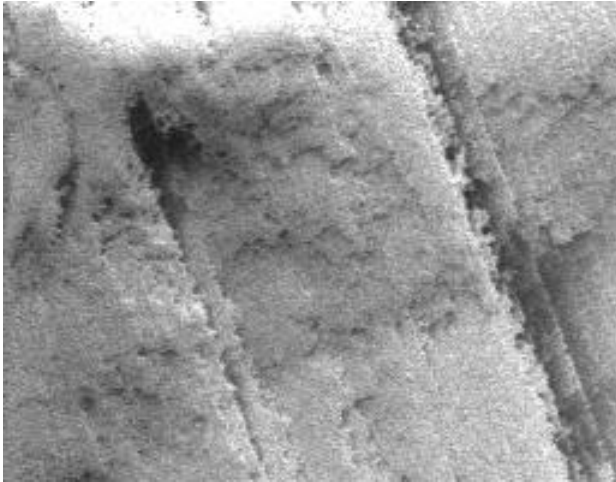
Procedimiento

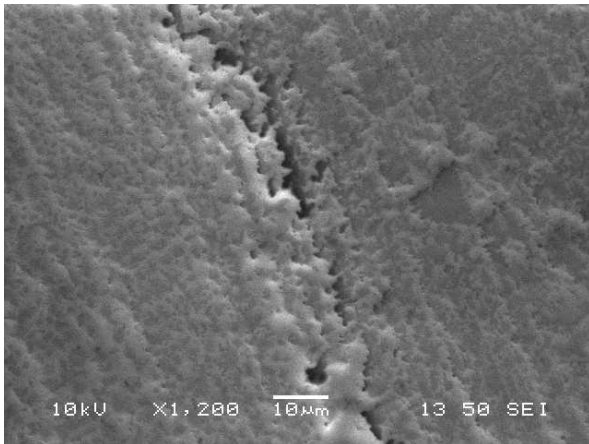
Se realizaron cortes con un disco liso con agua para extraer muestras de EVNR aproximadamente de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ en las zonas del hombro, cuerpo, talón y fondo. Se buscó que la superficie no estuviera muy curva.

1. Se realizó un mapeo de muestras para detectar las superficies con fracturas con un microscopio de 400x y después se tomó una fotografía para analizar y detectar la zona para analizarla en el SEM.
2. Se colocó un alambre de cobre delimitando la zona donde está el defecto y etiquetando la el defecto. Esto es para cuando entre al SEM detectar más rápido la zona a analizar.
3. Se analizó la superficie de fractura, para analizar el daño presente, tanto en la superficie interna y externa de las probetas. Para ello se utilizó una probeta de sección a $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Esta fue limpiada con alcohol isopropílico. Finalmente la muestra fue cubierta con una capa muy delgada de oro, para que sea una superficie homogénea y conductora, y colocada dentro de la columna de vacío del microscopio a través de una puerta hermética.

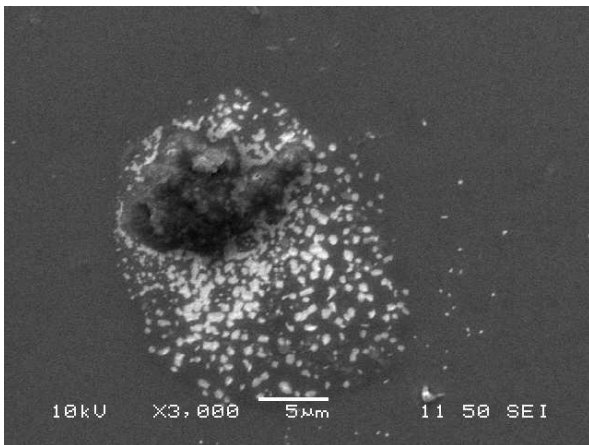
A continuación se muestran la siguiente tabla 4.1 con imágenes donde se observa el resultado del análisis con el microscopio electrónico de barrido y observaciones.

Tabla 4.1 Resultados de análisis con microscopio electrónico de barrido y observaciones.

Imágenes SEM	Observaciones
	<p>En esta imagen se muestra la topografía en la superficie la presencia de fracturas del espécimen analizado. El tamaño de la grieta que se presenta en la imagen tiene alta probabilidad de propagación por liberación de esfuerzos.</p>
	<p>En esta imagen se muestra la topografía en la superficie la presencia de fracturas del espécimen analizado. El tamaño de la grieta que se presenta en la imagen tiene alta probabilidad de propagación por liberación de esfuerzos.</p>



En esta imagen se muestra la topografía en la superficie se aprecia rugosidad y una apertura en la superficie. La imagen fue tomada a 1200x.



En esta imagen se muestra la topografía en la superficie se aprecia un defecto como lo es el infundido y partículas de aluminio. La imagen fue tomada a 3000x.

4.1.2 Resultados de análisis detector de energía dispersa (EDS) con MEB.

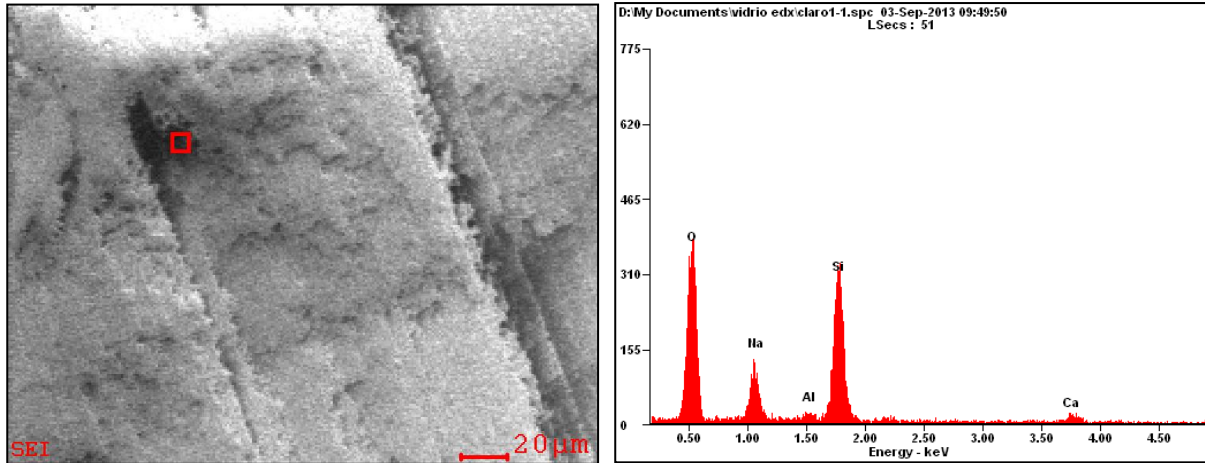


Figura 4.0 Muestra 1. Color cristalino

En la Figura 4.0 se muestra el análisis por EDS del MEB. Donde se muestra una micrografía de la imagen de la muestra tomada y un espectro, donde se identifican los elementos en los picos de un histograma espectral de un punto elegido de la muestra, en este caso se muestran la caracterización del material como: sílice, sodio, porcentaje bajo de aluminio y calcio.

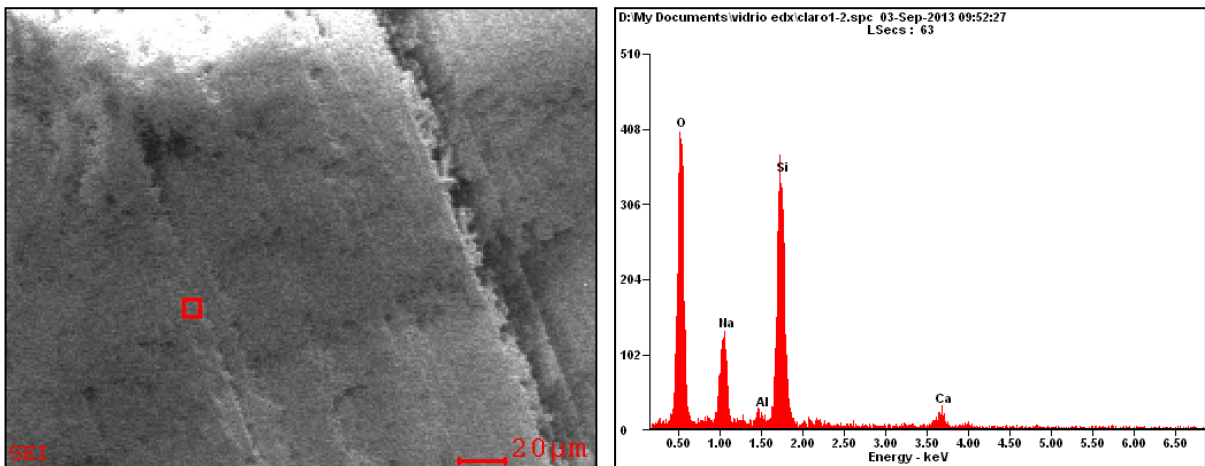


Figura 4.1 Muestra 2. Color cristalino

En la figura 4.1 se muestra el análisis por EDS del MEB. Donde se muestra una micrografía de la imagen de la muestra tomada y un espectro, donde se identifican los elementos en los picos de un histograma espectral de un punto elegido de la muestra, en este caso se muestran la caracterización de materiales como: sílice, sodio, aluminio y calcio.

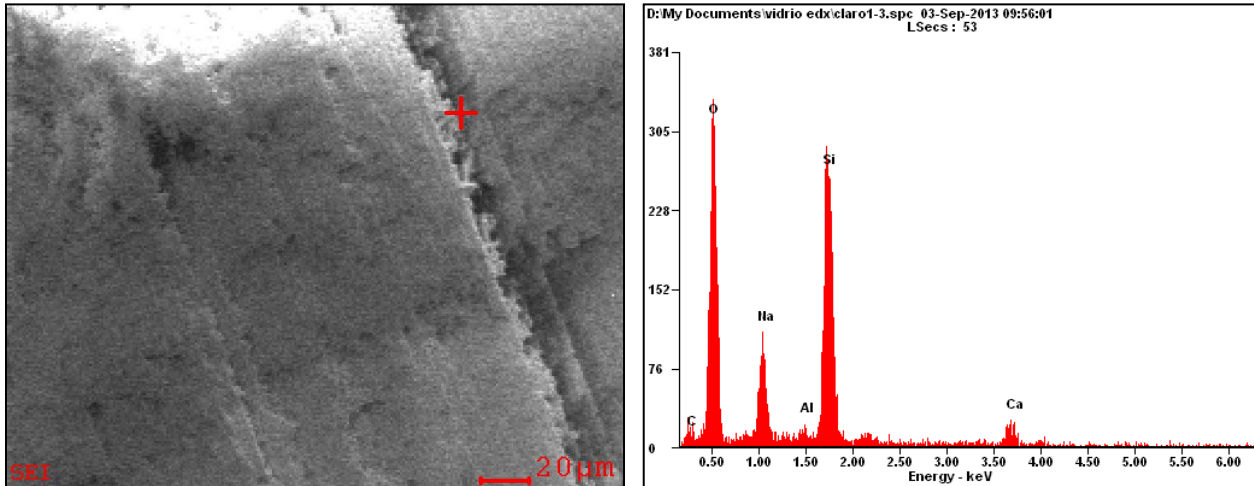


Figura 4.2 Muestra 3. Color cristalino

En la Figura 4.2 se muestra el análisis por EDS del MEB. Donde se muestra una micrografía de la imagen de la muestra tomada y un espectro, donde se identifican los elementos en los picos de un histograma espectral de un punto elegido de la muestra, en este caso se muestran la caracterización de materiales como: sílice, sodio, calcio, carbón y Aluminio.

4.1.3 Resultados del esfuerzo circunferencial

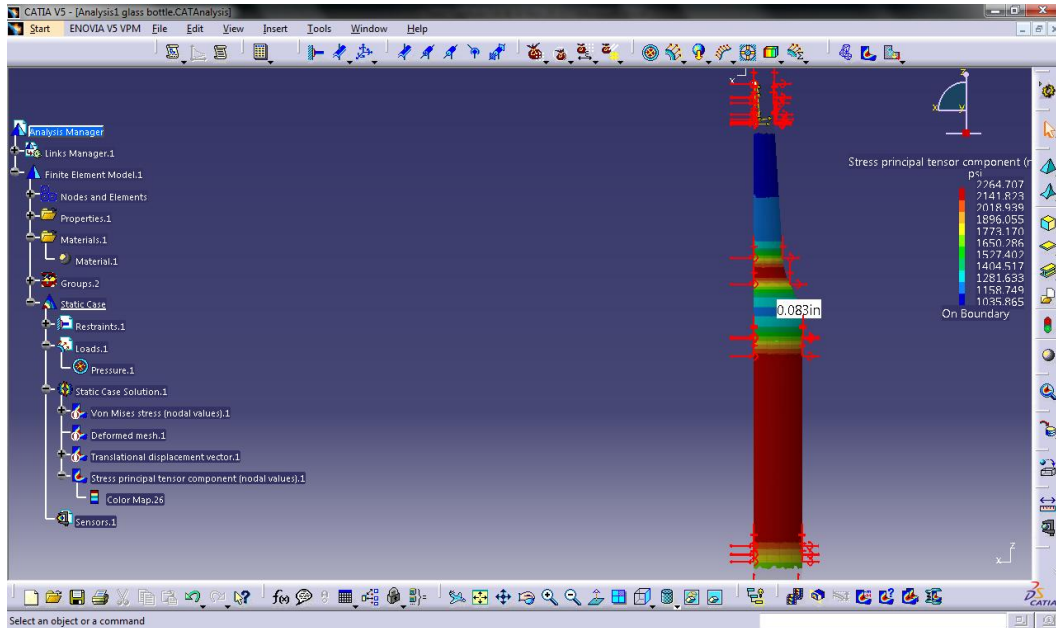
A continuación se muestran siete análisis del esfuerzo circunferencial y se ve el comportamiento del esfuerzo máximo realizados con el programa de CATIA en el módulo de análisis, el objetivo de este estudio es comparar los esfuerzos sometidos a presión hidrostática que se realizaron con el experimento en físico y calcularlo numéricamente para saber si hay relación entre ambos. Respecto a los resultados y la correlación se tomaron las presiones del esfuerzo máximo como se muestran en los siguientes análisis

Análisis 1. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 145 psi

Espesor de pared 0.083”

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 2264.70 psi.

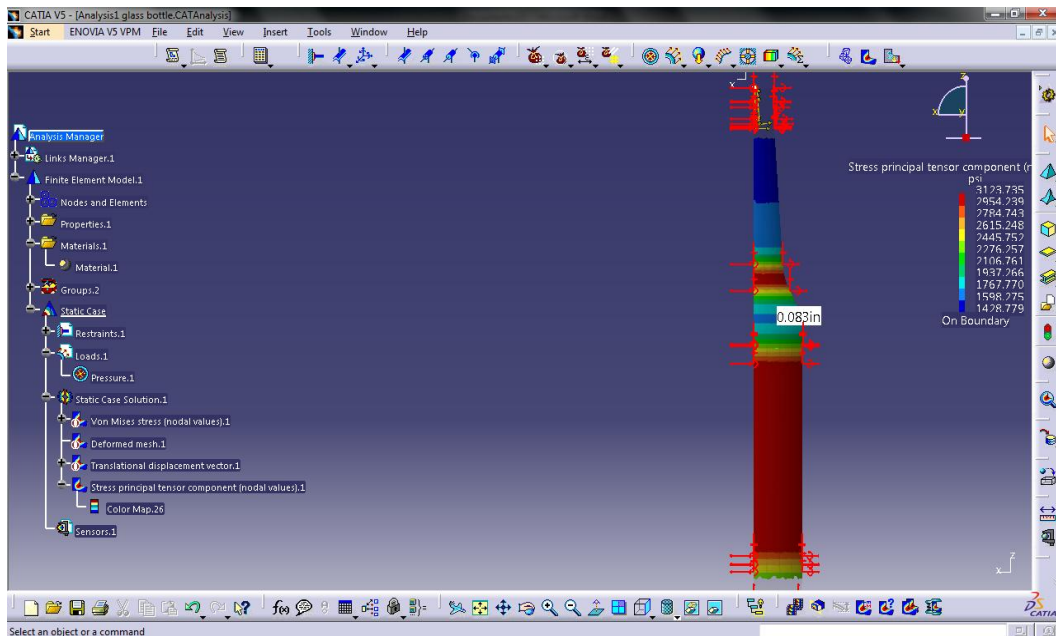


Análisis 2. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 200 psi

Espesor de pared 0.083”

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 3123.73 psi.

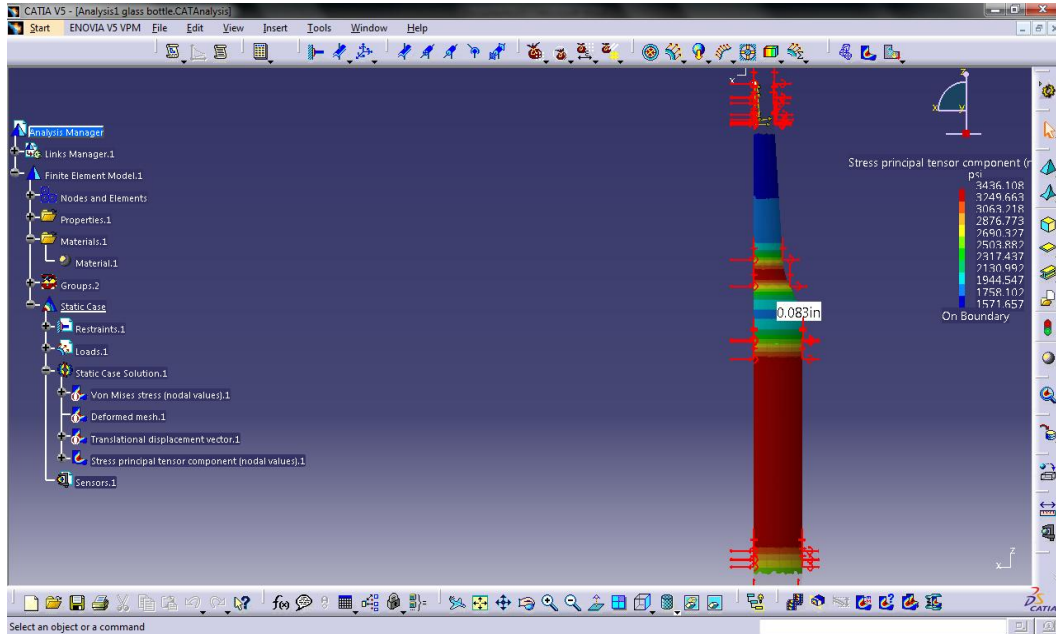


Análisis 3. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 220 psi

Espesor de pared 0.083"

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 3436.10 psi.

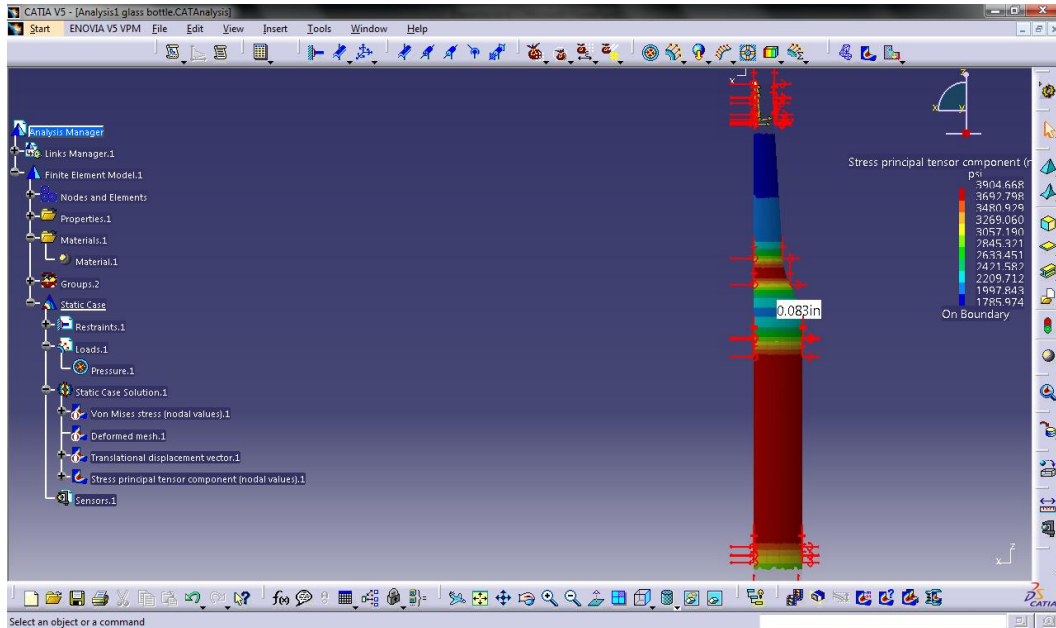


Análisis 4. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 250 psi

Espesor de pared 0.083"

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 3904.66 psi.

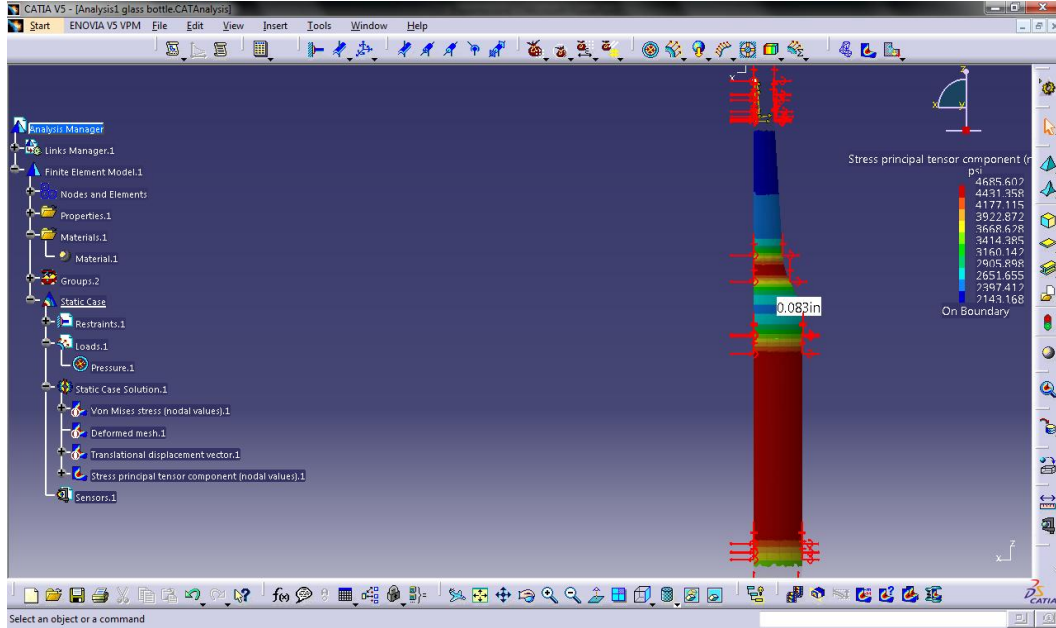


Análisis 5. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 300 psi

Espesor de pared 0.083”

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 4685.60 psi.

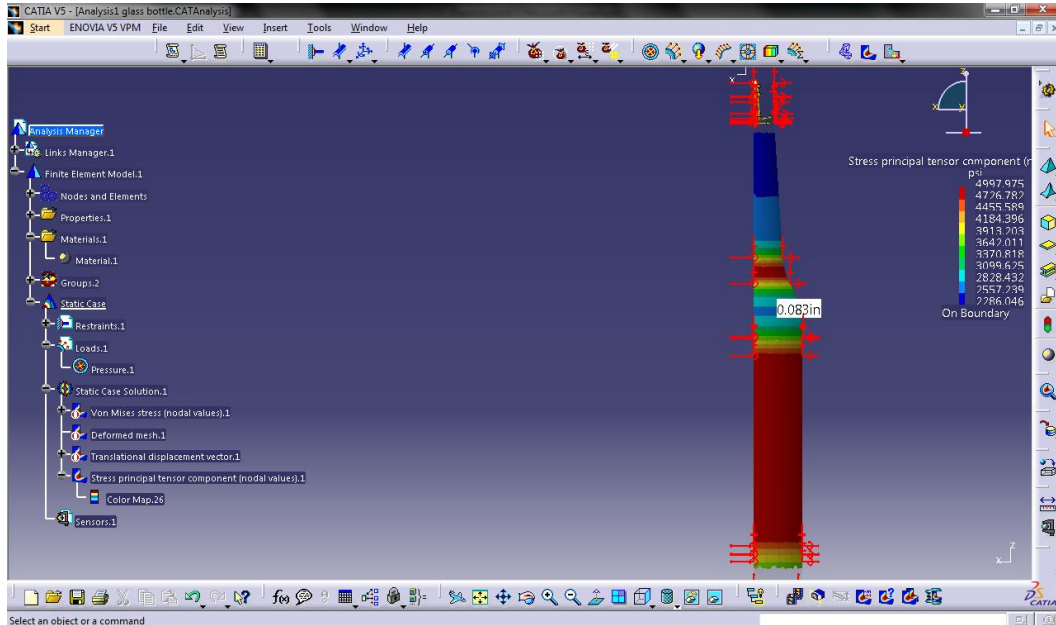


Análisis 6. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 320 psi

Espesor de pared 0.083”

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 4997.97 psi.

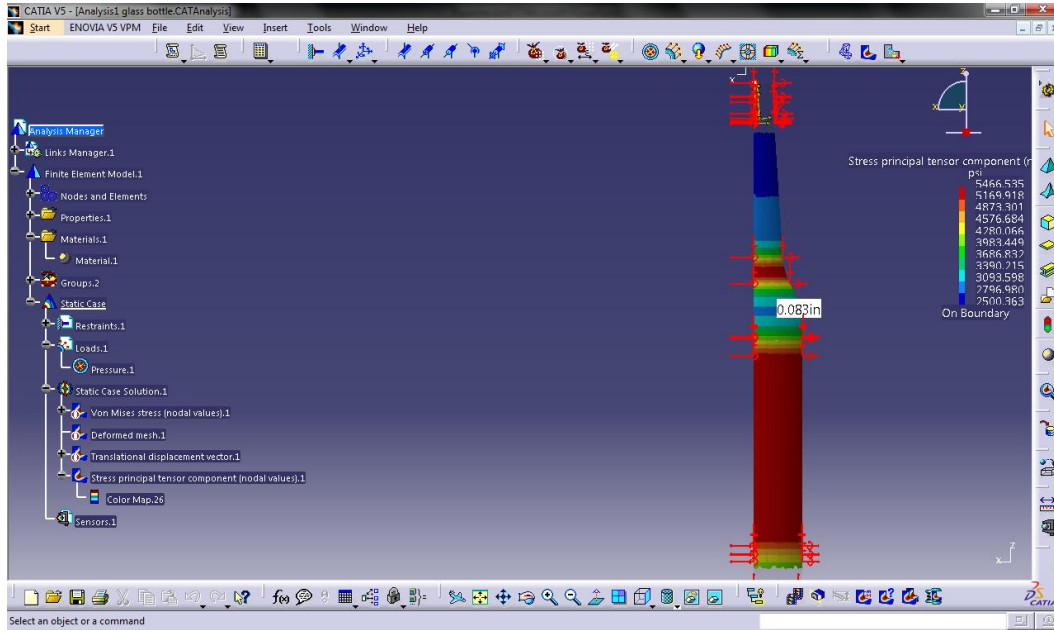


Análisis 7. Cálculo de esfuerzo circunferencial

Presión sometida 350 psi

Espesor de pared 0.083"

Resultado del esfuerzo circunferencial máximo 5466.53 psi.



CAPÍTULO V.
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las conclusiones están basadas en el estudio que se llevó a cabo en este trabajo de tesis, las cuales se mencionan a continuación:

1. Se encontró diferentes comportamientos con la presión de aire inyectada la cual provocó una variación entre 175 a 350 psi. Todas las muestras fallaron a las condiciones de presión especificadas entre 1 y 4 minutos.
2. Los resultados de las pruebas experimentales y de simulación numérica por método de elemento finito, concordaron en la determinación de las zonas críticas susceptibles a fracturarse y fallar por rotura, siendo estas identificadas como: zona del hombro, zona de contacto y zona del talón.
3. Los resultados de las pruebas experimentales del esfuerzo circunferencial y de simulación numérica del esfuerzo circunferencial dieron una aproximación de ambos resultados de acuerdo a la formula calculada y el análisis.
4. Con la examinación del microscopio, a un aumento de 400X se alcanza a percibir las fisuras y también se evidenció las características de la superficie en materiales frágiles como los son: zona de estrías, espejo y origen de la fractura.
5. La fractografía realizada a los especímenes de prueba, usando el microscopio electrónico de barrido evidenció la presencia de microfisuras en la topografía de la superficie.
6. De acuerdo a la mecánica de fractura y los modos de aplicación de cargas se encontró que para el vidrio falla en el modo I. “modo de apertura”.
7. Con la microscopia electrónica de barrido se encontró: microfisuras, infundidos, contaminaciones de otros metales, tales como el aluminio.
8. Se utilizaron dos tipos de estudio de la fractografía:

Cualitativa: Se determina la dirección y la ramificación de la propagación de grietas.

Cuantitativa: Que puede determinar la tensión original que causó la fractura.

En conjunto, estos métodos proporcionan una metodología eficiente y consistente para localizar y caracterizar los orígenes de fractura en el vidrio.

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones consideradas para la realización de trabajos futuros siguiendo ésta línea de investigación son las siguientes:

- Caracterizar el material del vidrio por tonalidad para determinar las propiedades mecánicas.
- Caracterizar por medio de la difracción de rayos x, el material para determinar su composición.
- Proponer una mejor diseño de la preforma del envase para tener una mejor distribución de paredes en los envases de vidrio al momento de su formado.

5.3 Trabajos futuros

- Analizar con microscopia electrónica de barrido las microfisuras y tomar mediciones de profundidad y longitud.
- Utilizar la Simulación numérica utilizando software que permita modelar el fenómeno de la propagación de la grieta.
- Aplicar la mecánica de la fractura empleando el criterio de Griffith.
- Analizar con técnicas de microscopia electrónica la estructura del material.

5.4 Publicaciones y participación en congresos

1. Jorge Ignacio Anguiano Lizaola, Juan de Dios Ocampo Diaz, Omar Alejandro Mata Lucero “**Envases de vidrio diseño, fabricación y pruebas de resistencia**”. Sexto Congreso Internacional de Ingeniería Arquitectura y Diseño Vértice 2012. ISBN: 978-1-4675-224-0 Pag. 381-386. Ensenada Baja California
2. Jorge Ignacio Anguiano Lizaola, Juan de Dios Ocampo Diaz, Benjamín Valdez Salas, Michael Shorr, Omar Alejandro Mata Lucero. “**Characterization of Fracture in Glass Bottle**”. XXI International Materials Research Congress. General Program Pag. 65 Symposium: 2D Materials Characterization. Cancún Quintana Roo México.
3. Jorge Ignacio Anguiano Lizaola, Juan de Dios Ocampo Diaz, Omar Alejandro Mata Lucero, Eduardo Cabrera, Marco A. Vilchis C. “**Analysis of Impact at Glass Bottle**” XXII International Materials Research Congress. General Program Pag. 216. Symposium: 8B Strategies for Academy-Industry Relationship. Cancún Quintana Roo México
4. Jorge Ignacio Anguiano Lizaola, Juan de Dios Ocampo Diaz, Elvira Rodriguez Velarde, Héctor Muñoz Valdez, Omar Mata Lucero, Marco Antonio Vilchis Cerón. “**Análisis de Fractura en envases de vidrio sometidos a presión interna**”. Seminario de Investigación Facultad de Ingeniería Mexicali UABC.

Referencias bibliográficas

- [1]. **Serope Kalpankjian, Steven R. Schmid.** *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* Mexico : Pearson, 2008.
- [2]. **Navarro, José María Fernández.** *El Vidrio.* España : Artegraf, S.A, 2003. 84-00-08158-7.
- [3]. **Corrales C., Salvador.** *La industria del vidrio en el noreste de México.* México: Redalyc, 2010.
- [4]. **Vidales Giovannetti, Ma. Dolores.** *El mundo del envase manual para el diseño y producción de envases y embalajes.* Barcelona : Gustavo Gili, 2007. 978-84-252-2199-6.
- [5]. **Tessy Lopez, Ana Martínez.** El mundo magico del vidrio. [En línea]
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/mundoma.html>.
968-164695-9 .
- [6]. **Shackelford, James F.** *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros.* Madrid : Pearson, 2010. 978-84-8322-659-9.
- [7]. **Mitchell, Brian S.** *An Introduction to material engineering and science.* New Jersey : s.n., 2004. 0-471-43623-2.
- [8]. **ASTM, Designation: C162-03.** "Standard Terminology of Glass and Glass Products".
- [9]. **Skrabec, Quentin R.** *Michael Owens And the Glass Industry.* 2007. 978-1-58980-385-5
- [10]. **Capel, Francisco.** *La fractura del Vidrio.* España: s.n., 2009.
- [11]. **Emhart, Glass.** *Glass Container Defect.* s/f. TW0738/1191.
- [12]. **Balankin, Alexander.** *Mecánica de la fractura: pasado, presente y futuro.* Mexico : s.n., 2000.
- [13]. **Hinojosa, Moises y Chavez Guerrero, Leonardo.** *Autoafinidad de superficies de fractura del vidrio.* 2001.

- [14]. **González Velázquez, Jorge Luis.** *Mecánica de fractura*. México : Limusa, 1998. 968-18-5544-2.
- [15]. **NMX-EE-032-1983, Norma Mexicana.** "*Envase y embalaje-envases de vidrio para bebidas alcoholicas en general.*"
- [16]. **NMX-EE-027, Norma Mexicana.** "*Envase de vidrio para contener cerveza especificaciones*"
- [17]. **NMX-EE-188 , Norma Mexicana.** "*Determinación de las dimensiones y métodos de prueba para los envases de vidrio bebida alcoholicas en general*".
- [18]. **ASTM, Designation: C224-78.** "*Standard Practice for Sampling Glass Containers*".
- [19]. **ASTM, Designation: C158-02.** "Standard Test Methods for Strength of Glass by Flexure" (Determination of modulus of rupture).
- [20]. **ASM, International Handbook.** Fractography. 1987. Vol. 12.
- [21]. **AGR.** American Glass Research. [En línea]
<http://www.americanglassresearch.com/index.asp>.
- [22]. **Gomila, Marc J. Anglada.** *Fractura de Materiales*. Barcelona: s.n., 2002. 84-8301-592-7.
- [23]. **Ferrer Giménez, Carlos y Amigó Borrás, Vicente.** *Tecnología de Materiales*. Valencia, España: Alfaomega, 2005. 970-15-0879-3.
- [24]. **ASTM, Designation: C1256-93.** "*Standard Practice for Interpreting Glass Fracture Surface Features*".
- [25]. **GPI.** Glass Packaging Institute. [En línea] www.gpi.org.
- [26]. **ASTM, Designation: C147-86.** "*Standard Internal Pressure Strength of Glass Containers*".
- [27]. **ISO, 8113:2004.** *Glass containers Resistance to vertical load Test method*.

- [28]. **Ropp, R.C.** *Handbook of Glass Fractography*. Bloomington, Indiana: Aatorhouse, 2008. 978-1-4343-9883-3.
- [29]. **W.D, Casllister**. *The Science and Engineering of materials*. Eighth edition
- [30]. **Shelby, J. E.** *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge: s.n., 2005. 0-85404-639-9.
- [31]. **R.C. Bradt, R.E. Tressler.** *Fractography of Glass*. New York : Plenum Press, 1994. 0-306-44880-7.
- [32]. **J. Ma. Rincón, P. Callejas, F. Capel.** *Fractografía de vidrios y materiales vitrocerámicos*. Madrid: s.n., 1989.
- [33]. **Arana, Jose Luis y Gonzalez, Javier Jesús.** *Mecánica de Fractura*. Bilbao : s.n., s/f. 84-8373-455-9.
- [34]. **James M. Gere, Barry Goodno.** *Mecánica de Materiales*.
- [35]. **MSC Software.** [En línea] <http://www.mssoftware.com/product/patran>
- [36]. **Rincón, J.Ma, Callejas, P., Capel, F.** *Fractografía de vidrios y materiales vitroceramicos*. Instituto de cerámica y vidrio. C.S.I.C. Arganda del Rey Madrid España.
- [37]. **ASTM, Designation: C1322** “*Fractography and Characterization of Fracture Origins in Advanced Ceramics*.”
- [38]. **J. Rösler , H. Harders, M. Bäker.** “*Mechanical Behaviour of Engineering Materials*” Springer ISBN 978-3-8351-0008-4
- [39]. **A. Emblem, H. Emblem.** “*Packaging technology Fundamentals, materials and processes*” ISBN: 978-0-85709-570-1
- [40]. **Charles A. Harper.** “*Handbook of ceramics, glasses and diamonds*” McGraw-Hill 2001

ANEXO 1

Norma NMX-EE-032-1983

Definiciones

Para los efectos de esta Norma se establecen las definiciones siguientes:

1. **Cuerpo:** Toda la parte inferior a la corona.
2. **Corona:** Parte superior del envase que sirve para sujetar la tapa.
3. **Defecto crítico:** Es el defecto que puede producir condiciones peligrosas o inseguras para quienes usen o mantienen el producto. Es también el defecto que puede llegar a impedir el funcionamiento o el desempeño de una función importante del producto del cual depende la seguridad personal.
4. **Defecto Mayor:** Es el defecto que sin ser crítico tiene la posibilidad de ocasionar una falla, o de reducir materialmente la utilidad de la unidad para el fin que se le destina.
5. **Defecto menor:** Es el defecto que no reduce materialmente la utilidad de unidad para el fin que se destina, representa una ligera desviación de las especificaciones establecidas y no tiene un efecto decisivo en el uso u operación de la unidad por tratarse de un defecto de apariencia.
6. **Crinolina:** Huella de unión del fondo y cuerpo en el premolde la cual al momento de cambiar la botella del bombillo al molde, interiormente se corre coincidiendo las uniones por consiguiente aparecen sobre el cuerpo.
7. **Gorro:** Rebaba que sobresale en la boca de la corona.
8. **Columpio:** Filamentos de vidrio que aparecen internamente uniendo las paredes de la botella.
9. **Ovalamiento:** El ovalamiento es una deformación en el cuerpo de la botella el cual causa dos diámetros, mayor y menor, la diferencia entre estos dos, no debe ser mayor a la tolerancia total.
10. **Diámetro del cuerpo:** Sección transversal mayor del envase en sus puntos a estos.
11. **Altura total:** dimensión de la base del envase al ras de la corona de los envases.

CLASIFICACIÓN

El producto objeto de ésta Norma se clasifica en cuatro estilos por su representación de venta con un solo grado de calidad.

- Estilo I Miniaturas.
- Estilo II Ánforas.
- Estilo III Botellas.
- Estilo IV Botellones y garrafones

Todos los modelos o diseños de los envases de esta Norma están sujetos al acuerdo entre fabricante y consumidor.

Clasificación de defectos.

Para los efectos de esta Norma se establecen los siguientes defectos:

Defectos críticos A y B, defectos mayores y defectos menores.

Defectos críticos A.- NCA 0.25

- a) Rebaba en el interior de la corona.
- b) Columpio.
- c) Partículas de vidrio en el interior.
- d) Burbujas en el interior (tipo ampollas) fácil de romperse.
- e) Vidrio en el exterior (pegado) que sea cortante al manejo.

Defectos críticos B.- NCA 0.65

- a) Gorro o rebaba en la corona (exterior).
- b) Estrelladuras en superficie de sello.
- c) Ranura (pelo) en superficie de sello.

Defectos mayores.- NCA 2.5

1. Dimensiones fuera de tolerancia.
2. Capacidad fuera de tolerancia.
3. Verticalidad fuera de tolerancia.
4. El ovalamiento máximo tolerable es el 75% de la tolerancia total del diámetro del envase.
5. Hundimiento y/o abombamiento (de acuerdo a funcionalidad y/o capacidad).
6. Esfuerzos residuales teniendo como máximo real 4.
7. Estrelladuras en cualquier parte del cuerpo que afecten la resistencia del vidrio en el proceso o distribución.

8. Corona incompleta u ondulada más de 0.6 mm.
9. Piedras burbujas o puntos negros mayores de 1.0 mm.
10. Mala distribución del vidrio o paredes delgadas.
11. Costuras (molde abierto) mayor de 1.0 mm.
12. Corona caída o chueca que impida el cerrado.
13. Corona corrida o abierta que impida el cerrado.
14. Arrugas que disminuyan la resistencia al envase.
15. Degollada.
16. Rayas brillosas.

Defectos menores.- NCA 4.0

1. Piedras, burbujas o puntos negros menores de 1.0 mm externas o entre el vidrio.
2. Rayos, arrugas o grietas superficiales (no en superficie de corona).
3. Fracturas pequeñas, que no afecten la resistencia del vidrio.
4. Mancha de aceite exterior (lubricación).
5. Distorsión óptica (molde frío).
6. Huellas de cuchillas en la corona (no en superficie de sella).
7. La desviación del espesor del fondo no debe ser mayor de la proporción 2:1.
8. Molde sucio.
9. Marca del obturador (crinolina, sí está arriba la conexión).
10. Salientes de vidrio en el exterior no peligrosas en el manejo.

Cuando los defectos menores no son perceptibles a simple vista a una distancia de 60 cm no deben ser causa de rechazo. Cualquiera que sea su número; cuando estos son perceptibles a simple vista, la aceptación de la pieza depende del tamaño, forma, color y localización del defecto o defectos que puedan causar una mala apariencia de la pieza, por lo que deben ser motivo de acuerdo entre fabricante y consumidor su aceptación o rechazo.