



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



**LUGAR DE REALIZACIÓN DE RESIDENCIA PROFESIONAL
Instituto de Investigaciones Eléctricas**

TEMA

**“Evaluación de propiedades mecánicas de materiales a usarse como
sellos en Celdas de Combustible tipo PEM”**

DESARROLLO

Jesús Alegría de los Santos

No. DE CONTROL

08270636

ASESOR INTERNO

Ing. Roberto Cifuentes Villafuerte

ASESOR EXTERNO

M.I Felix Loyola Morales

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

DICIEMBRE DE 2012



Contenido

Resumen.....	3
Problemática	4
Objetivos	4
1. Celdas de combustible	5
2. Materiales	20
3. Prueba de sellabilidad de material comercial seleccionado	72
4. Resultados.....	78
Conclusión	82
Referencia Bibliográfica.....	83

Resumen

En esta investigación se presenta el desarrollo de un tema relacionado con materiales a usarse como sellos en una celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC, por sus siglas en inglés). También se presenta las funciones del sello, así como la problemática relacionada con estos componentes y los requisitos necesarios con que debe contar un material destinado a usarse como sello en este dispositivo.

Se realizó una investigación sobre los materiales usados en la actualidad como sellos en PEMFC. A partir de una lista de 12 materiales se hizo una selección basada en sus propiedades mecánicas y químicas, entre los cuales se seleccionaron 3: viton, neopreno y nitrilo; por presentar las mejores características de acuerdo a la aplicación. Adicionalmente, se hizo una comparación de estos materiales basados en su desempeño en pruebas de “Esfuerzo de relajación” y “Compression set” reportados en la literatura. Los resultados mostraron que el material que mostró el mejor desempeño fue el Viton; con lo que se concluyó que el mejor candidato para su uso como sello en PEMFC es el viton.

Como pruebas de sellabilidad del material, se llevaron a cabo experimentos sobre un o-ring de viton en un dispositivo provisto de dos grupos de pequeñas cavidades de profundidad variable. El primer grupo de cavidades se caracterizó por tener 2 paredes y el segundo 3 (caja para o-ring en conductos de gas entre celdas y canal para o-ring entre placas, respectivamente). Las pruebas neumáticas de sellabilidad se llevaron a cabo a 10 psi usando gas nitrógeno. Los resultados mostraron que el porcentaje de deformación propuesto de 20 % para garantizar el sellado del sistema fue adecuado en ambos tipos de caja.

Problemática

En las celdas de combustible tipo PEM, los problemas que se suelen presentar y que ocasionan un bajo rendimiento del sistema, es la fuga de gas (hidrógeno), así como el mal contacto eléctrico entre los componentes porosos del sistema.

Estos problemas se suelen presentar debido a la degradación del sello al entrar en contacto con las reacciones químicas, que se suelen presentar en el sistema durante su operación. Los resultados de este suceso son los causantes de que el material usado como sello se deteriore y pierda muchas de las propiedades mecánicas y químicas que son necesarias para su uso en las PEMFC. Tales propiedades son las que garantizan un buen funcionamiento así como un alto rendimiento del sistema.

Objetivos

El desarrollo de este proyecto de investigación tiene como propósito encontrar, mediante un estudio profundo del tema, un material que por sus características y cualidades, ofrezca un buen rendimiento, para que pueda ser utilizado como sello en una Celda de Combustible tipo PEM.

Además de la determinación de valores óptimos de las propiedades mecánicas que debe poseer un material a usarse como sello. Así como el mejor diseño de caja que permita un buen alojamiento del sello para obtener un alto valor de sellabilidad del sistema PEMFC y se logre las expectativas deseadas o más próximas a estas, y partir de los resultados obtenidos, establecer conclusiones concretas que puedan servir a futuras investigaciones que se relacionen con materiales a usarse como sellos en una PEMFC y que sirva como punto de partida para mejorar los resultados que en esta investigación se logre obtener.

1. Celdas de combustible

Las celdas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible en energía eléctrica, mediante la oxidación del combustible [1]. Normalmente, un proceso de generación de electricidad proveniente de combustibles abarca varias etapas de conversión de energía, es decir:

1. La combustión convierte la energía química de un combustible en calor.
2. Este calor se utiliza para hervir el agua y generar vapor.
3. El vapor se utiliza para hacer funcionar una turbina en un proceso que convierte energía térmica en energía mecánica.
4. Finalmente, la energía mecánica se utiliza para hacer funcionar un generador que genera electricidad.

Una celda de combustible evita todos estos procesos y genera electricidad en un solo paso sin la participación de las partes móviles [2]. Existen varios tipos de celdas de combustible que se caracterizan de acuerdo a su eficiencia, aplicación y temperatura de operación como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Tipo de Celdas de Combustible

Tipo de celda de combustible	Ion móvil	Temperatura de operación	Eficiencia	Aplicaciones
Alcalina (FKC)	OH^-	50-200°C	70%	Usada en vehículos espaciales
Membrana de intercambio de protones (PEMFC)	H^+	25-80°C	≈40%	Transporte, aplicaciones móviles y sistemas CHP de baja potencia
Metanol directo (DMFC)	H^+	50-80°C	≈40%	Transporte, aplicaciones móviles y sistemas CHP de baja potencia
Acido fosfórico (PAFC)	H^+	~220°C	>40%	Sistemas CHP de 200KW. de potencia
Carbonato fundido (MCFC)	CO_3^{2-}	~650°C	>60%	Adecuada para sistemas CHP de media y alta potencia (MW)
Oxido solido (SOFC)	O^{2-}	500-1000°C	>70%	Adecuada para todos los niveles de potencia (baja, media y alta)

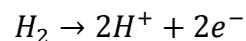
El tema central del presente trabajo de investigación es sobre materiales empleados en la fabricación de sellos usados en celdas tipo PEM, por lo cual, en las siguientes secciones se presenta una descripción de la operación de este tipo de celdas así como de la función de sus componentes, particularmente de los sellos.

1.1 Celdas de Combustible tipo PEM

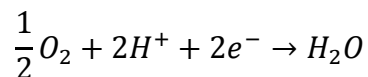
En las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), también llamadas celdas de combustible tipo PEM, el combustible corresponde al hidrogeno y el oxidante al oxígeno.

La estructura básica de las PEMFC se compone de una membrana electrolítica que se encuentra entre dos capas catalíticas una para el ánodo (hidrógeno) y la otra para el cátodo (oxígeno). Donde la generación de energía se lleva a cabo mediante el siguiente proceso.

El combustible, en este caso hidrogeno, se suministra a la celda mediante ductos y canales que pasan a través de cada uno de los componentes, hasta llegar al ánodo, al estar en contacto con este y en presencia de un catalizador se produce una reacción de oxidación del hidrógeno, que separa los electrones y los iones positivos o protones (ver figura 1.1). La reacción global que ocurre en el ánodo es como sigue:



Los protones fluyen a través de la membrana electrolítica desde el ánodo hasta el cátodo. El oxidante en este caso oxígeno reacciona con los protones y electrones (reducción) produciendo agua y calor, al ser una reacción exotérmica (ver figura 1.1). En este caso la reacción global que ocurre en el cátodo es como sigue:



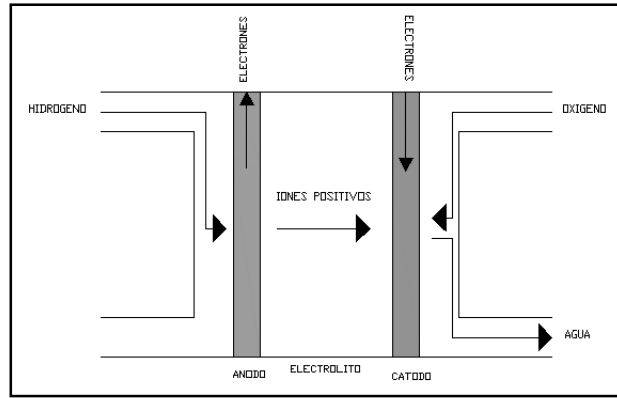


Figura 1.1 Representación del funcionamiento de una PEMFC

Estas reacciones se llevan a cabo en el componentes conocido como “Ensamble Membrana-Electrodo”, ubicado en el centro de una PEMFC y al que puede llamarse el corazón de las celdas de combustible ya que sin este no habría reacciones químicas y por lo tanto tampoco habría producción de energía. Adicionalmente, la celda está integrada por otros componentes que también ayudan a este proceso y que forman parte de la estructura de una PEMFC, tales componentes se pueden observar en la figura 1.2.

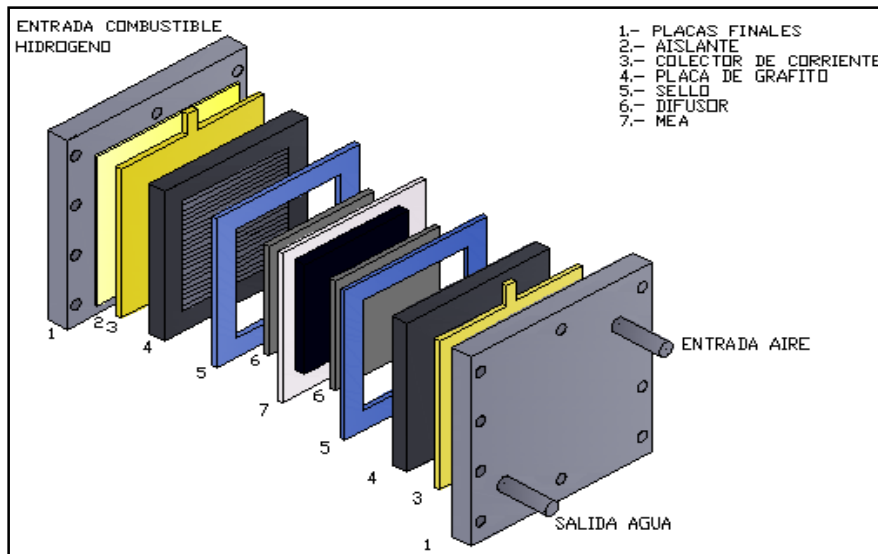


Figura 1.2 Componentes de una Monocelda de combustible tipo PEM

1.2 Sellos

Las reacciones químicas que se producen en una PEMFC pueden ocasionar la degradación de los componentes, entre los más afectados se encuentra los sellos. Los sellos de las PEMFC se localizan entre la placa bipolar y la membrana electrolítica, el cual, como su nombre lo dice, tiene la función de sellar y mantener a los gases hidrógeno y oxígeno en sus debidos compartimentos, además de muchas otras funciones adicionales que son de suma importancia en el desempeño de las PEMFC, las cuales se describirán más adelante en la sección 1.2.1.

Un sello para poder ser utilizado en las celdas de combustible tipo PEM debe cumplir con ciertas características necesarias para lograr un buen funcionamiento, entre dichas características están las propiedades químicas y mecánicas, las cuales son las que nos llevan a elegir el sello más adecuado para un desempeño óptimo.

1.2.1 Funciones adicionales del sello

El sello en las PEMFC tiene muchas funciones, las cuales son cruciales para el buen funcionamiento de las PEMFC. A continuación se hace mención detallada de cada una de ellas:

- Permitir un buen contacto eléctrico entre la capa catalítica y el difusor

Se afirma que una de las funciones del sello es la de que se produzca un buen contacto eléctrico en las celdas de combustible. Esto se debe a que como el sello nos ofrece un valor de espesor, es este valor el cual hace que la placa de grafito se aleje o se acerque a el difusor y el difusor de igual manera a la capa catalítica, y el buen contacto eléctrico se produce a una distancia óptima entre cada componente.

- Cuidar la estructura porosa de la CL y DL

El CL y DL son componentes muy importantes de la PEMFC porque son las encargadas del contacto eléctrico y constituyen los medios porosos a través de los cuales viajan los gases para llegar a los puntos en donde reaccionan. Cuidar y evitar que sufran daño alguno durante el ensamblado y operación de las PEMFC, es una de las funciones primordiales del sello.

- Contribuir a la estabilidad mecánica del sistema

Mantener en equilibrio un sistema es parte primordial de la estabilidad, en este caso el sello es el encargado de que nuestra celda se mantenga estable durante su uso ya que si este presentara algún fallo durante su funcionamiento ocasionaría la falla del sistema completo, por lo que el sello a usar debe ser el mejor para evitar posibles fallas y como consecuencia un desequilibrio del sistema.

1.2.2 Requerimientos del sello

Para poder lograr que nuestro sello realice las funciones anteriormente descritas, es de suma importancia que este componente cumpla con varios requisitos para la función correcta, dichos requerimientos son:

- Fácil de manejar

Encontrar un material para el sello que no presente sensibilidad alguna cuando sea manejado durante el ensamblado.

- Facilidad de manufactura

La manufactura es un proceso que conlleva todo producto, hacer que el sello sea fácil de manufacturar dependerá del material que se elija y las condiciones en las cuales se lleve a cabo el proceso de fabricación.

- Bajo costo

Fabricar sellos de un material que tenga un alto costo es un punto en contra para las celdas de combustible ya que incrementaría el costo de fabricación de estas, por lo tanto el costo del material siempre debe estar presente al momento de elegir uno.

- Químicamente inerte

Los sellos no deben presentar reacción alguna cuando entren en contacto con reactivos o productos de las reacciones químicas, además de ser resistentes para evitar la degradación del sello mismo, incluso bajo el ambiente corrosivo causado por las condiciones de acidez presentes en una PEMFC.

- Resistencia a la humedad

La humedad es una condición permanente al interior de la celda de combustible (gases húmedos, membrana hidratada y presencia de agua condensada), por lo que el material a usarse como sello, debe tener alta resistencia a esta condición.

- Estabilidad térmica (mínimo de 80°C)

La temperatura juega un papel muy importante en el sellado, ya que en las celdas de combustible se presenta la elevación de la temperatura como resultado de las reacciones químicas, la cual puede variar de los 60 °C hasta los 80 °C, por eso se requiere de un sello que mantenga su estabilidad mecánica y evitando la degradación de dicho sello a estas temperaturas.

- Baja elución de iones

Este requisito sirve para mantener la conductividad en la membrana electrolítica y también mantener los catalizadores de platino previstas en la membrana activa.

- Absorbente de vibraciones y del impacto

Los sellos deben ser un componente capaz de eliminar/atenuar cualquier perturbación ocasionada por las vibraciones que pueda recibir. De igual manera un sello debe ser resistente al impacto ocasionado por alguna fuerza externa.

- Buenas propiedades mecánicas (compression set, resiliencia, elasticidad, dureza entre otras).

Estas propiedades son de mucha importancia por que un buen sello debe permitir la compresión, por lo tanto ser deformable para permitir un buen sellado.

- Aislante eléctrico

Este requisito es para evitar algún corto circuito que se produzca en las celdas de combustible.

- Que permita el diseño “ah-doc”

La flexibilidad en la fabricación de un diseño particular de sello, potencializa su aplicabilidad en celdas de combustible (acoplamiento adecuado del diseño de sello al de la placa de grafito).

1.2.3 Identificación de la problemática

En las celdas de combustible todo componente tiene una función muy importante, y el buen desempeño de cada uno tendrá como resultado una buena eficiencia de la celda, en caso contrario si su desempeño es bajo se tendrá una celda que posiblemente funcione pero no con las expectativas deseadas.

Por eso es necesario hacer énfasis en los principales problemas que se presentan en las celdas. En nuestro caso, el componente de interés es el sello, por lo tanto hay que hacer un análisis sobre los problemas relacionados con ellos, que nos puedan afectar gravemente al funcionamiento de nuestra PEMFC. En los sellos, los problemas que se presentan son muy variados, a continuación se describe cada uno de ellos.

La fuga y mezcla de gases; este tipo de problemas se presentan debido al mal diseño del sello o a las propiedades de los materiales con que se fabrican, cuando el sello no tiene el diseño correcto de acuerdo a las características necesarios no permite un buen sellado, este problema también puede ser el resultado de una degradación del sello, producto de fabricar el sello con un material que no cumple con las propiedades mecánicas y químicas necesarias para sellos utilizados en una PEMFC, y como consecuencia el gas de un compartimento puede fugarse y pasar al compartimento del otro gas actuante y producir una mezcla de ambas o simplemente escaparse al ambiente.

Las fugas se pueden presentar de dos formas:

Fugas de borde, se llama así cuando el gas se escapa al medio ambiente desde el lado del ánodo, o por el lado del cátodo [3].

Fugas de cruce, se llama así cuando el gas desde un lado de la membrana cruza al otro lado de la misma. Este tipo de fuga al igual puede ocurrir de dos maneras: entre el sello y la membrana en los puertos de entrada y de salida y fuga a través de la membrana [3].

Otro problema producto de un mal diseño del sello es cuando este es colocado y comprimido por los otros componentes, la parte del sello que pasa justamente por encima de los canales de entrada de gas a la placa de grafito presenta un hundimiento en dicho canal debido a la deformación del sello, dicho hundimiento obstruye una pequeña parte de los canales y como consecuencia no permite el flujo correcto de gas. La figura 1.3 representa lo que ocasiona un mal diseño de sello.

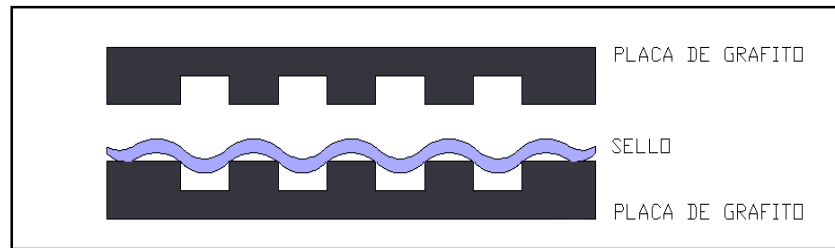


Figura 1.3 Ondulaciones presentadas en el sello cuando este se comprime entre las placas de grafito.

La resistencia eléctrica; este es otro de los problemas que se presenta y esta relacionado con el espesor, este punto es importante porque el espesor del sello es el que nos permite el buen o el mal contacto eléctrico en nuestra PEMFC. Los problemas que se han presentado con el espesor del sello es de que si es demasiado grueso y este es mayor a la suma de los espesores del difusor y la capa catalítica habrá un buen sellado, no se destruirá la estructura porosa y se permitirá un buen flujo de los gases actuantes, pero el sello no permitirá que la placa de grafito se acerque al difusor y esta a su vez a la capa catalítica y como consecuencia se tendrá un contacto eléctrico deficiente [4].

Pero en el caso del espesor delgado, si la suma del espesor del difusor y la capa catalítica es mayor al espesor del sello, habrá un excelente contacto eléctrico, pero se destruye su estructura porosa y como consecuencia se impide el paso de los gases lo cual provocara la deficiencia en las celdas de combustible [4].

1.3 Propiedades de los materiales

La mayoría de las ingenierías están relacionadas de manera cotidiana con los materiales en los procesos, manufactura, diseño o construcción de componentes o estructuras. De los cuales el uso de algún tipo de material, debe ser seleccionado de acuerdo a la aplicación que vaya a tener, esto con el fin de poder obtener los mayores beneficios que el material pueda ofrecer [5].

Para la selección de alguna clase de material ya sea metal, cerámico, polímero, semiconductores o materiales compuestos, conocer sus propiedades es muy importante, ya que son estas características las únicas que nos dará una orientación del comportamiento del material en condiciones de trabajo.

Las propiedades son las características que distingue un material de otro, las cuales se suelen clasificar en 2 categorías propiedades mecánicas y físicas. Las propiedades mecánicas describe la forma en que un material responde al momento de aplicarle una fuerza y las propiedades físicas son la que describen el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, térmico y químico que dependen tanto de la estructura como del procesamiento de un material.

1.3.1 Propiedades Mecánicas

Como se definió las propiedades mecánicas son aquellas que describen la forma de respuesta de un material al ser sometido a una fuerza repentina o una fuerza continua durante un tiempo determinado. Además las propiedades mecánicas determinan la facilidad de deformación de un material para llegar a una forma útil o simplemente como reacción de alguna fuerza aplicada sobre dicho material.

La aplicación de la fuerza en los materiales puede ser de 3 formas, en tensión, compresión y cortante. Las diferentes tipos de fuerzas provocan ciertas reacciones, en caso de la tensión provoca un alargamiento (figura 1.4a), la compresión produce una reducción en el tamaño (figura 1.4b) y por último el cortante provoca un deslizamiento en el sentido de la aplicación de la fuerza (figura 1.4c) a estos cambios producidos por los diferentes aplicaciones de fuerzas se le conoce como deformación.

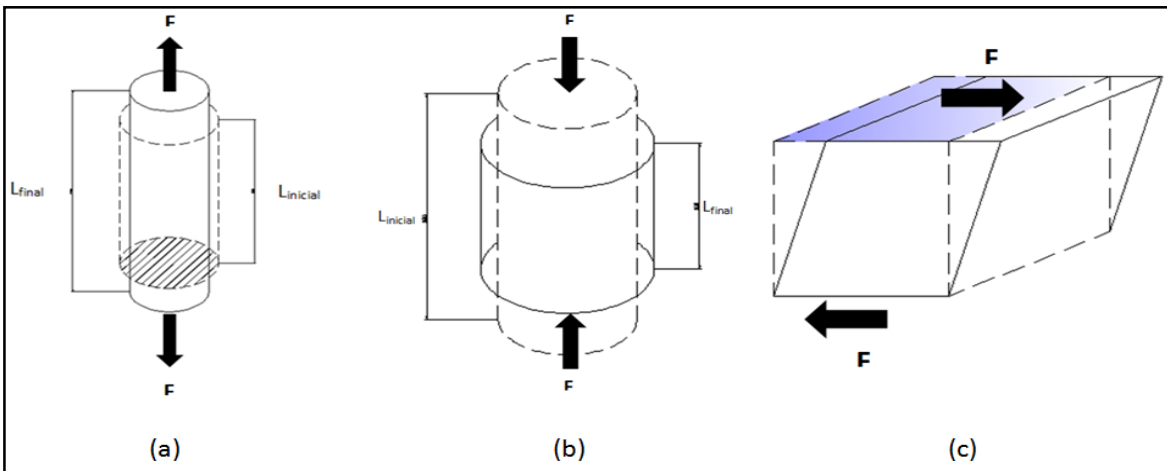


Figura 1.4 Tipos de aplicación de fuerza

Deformación

Se define a la deformación como el cambio en las dimensiones originales del cuerpo de la muestra en dirección de la fuerza aplicada. La deformación es una magnitud adimensional que es representada en porcentaje de deformación, que puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$\% \xi = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$$

Donde:

l = Longitud después de la fuerza

l_0 = Longitud inicial

Deformación elástica y plástica

Cuando un material es sometido a tensión la deformación en los materiales puede ser de 2 maneras, conocida como deformación elástica y plástica. La deformación elástica se produce cuando un material sometido a tensión se deforma y cuando dicha fuerza cesa el material regresa a su forma original, caso contrario en la deformación plástica el material se deforma pero cuando cesa la fuerza está no regresa a su forma original.

Esfuerzo de cedencia

También llamado límite elástico, esta propiedad se define como el punto en el cual el material pasa de la zona de deformación elástica a la zona de deformación plástica y como consecuencia dicho material presenta una deformación permanentemente. Para cuestiones de diseño esta propiedad es muy importante ya que el material puede fallar en cualquier momento una vez excedido el valor de su límite elástico. Si se desea diseñar un componente que no se deforme plásticamente se debe elegir un material con un límite elástico elevado [7].

Una forma para definir el valor de esta propiedad es mediante la construcción de la gráfica que resulta de aplicar una fuerza en tensión al material, en donde el eje de las abscisas corresponde a las deformaciones generadas por la fuerza aplicada y el eje de las ordenadas corresponde a los esfuerzos a los cuales fue sometido el material.

El valor del esfuerzo de cedencia se obtiene al trazar una línea paralela a la zona elástica en la grafica generada pero con un desplazamiento del 0.2% sobre el eje de las abscisas, el punto donde esta línea se intersecta con la gráfica ese es el valor del esfuerzo de cedencia. En la figura 1.5 se muestra una gráfica esfuerzo-deformación.

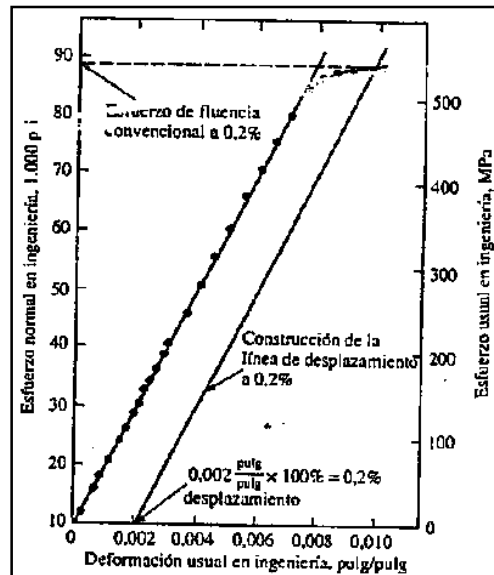


Figura 1.5 Gráfica esfuerzo-deformación donde se representa como obtener el limite elástico

Módulo de elasticidad

También conocido como módulo de Young, determina la rigidez de un material, la cual se define como la capacidad de resistencia a la deformación, esto nos indica la capacidad que tiene un material a ser deformado [7]. En la gráfica esfuerzo-deformación es la pendiente en la región elástica (ver figura 1.6).

Este módulo esta íntimamente relacionado con la energía de enlace de los átomos. Una pendiente muy abrupta en la gráfica esfuerzo-deformación nos indica que se requieren de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Por lo tanto el material tiene un alto módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad esta definido por la siguiente fórmula conocida como la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

σ = Esfuerzo

ε = Deformación

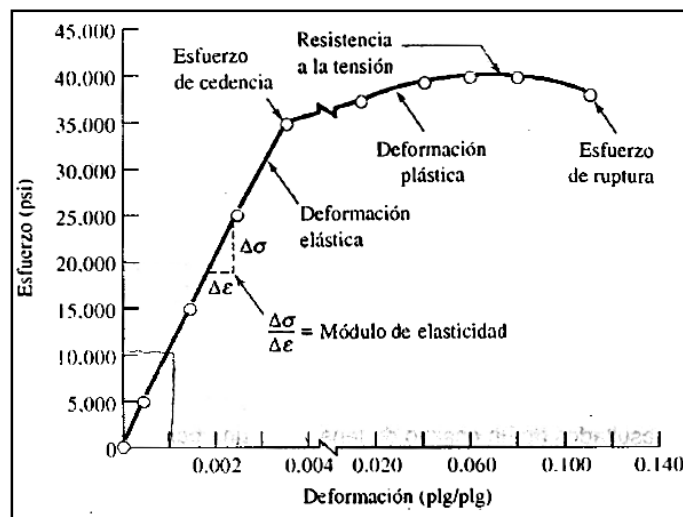


Figura 1.6 Representación del módulo de elasticidad en la gráfica esfuerzo-deformación

Modulo de resistencia

Es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación o liberación de la carga aplicada respectivamente. En la gráfica esfuerzo-deformación el módulo de resistencia corresponde al área que aparece bajo la porción elástica de la curva.

Dureza

Esta propiedad se define como la resistencia que opone un material a ser rayado, cortado o penetrado. La dureza de un material depende de varios factores físicos. Pueden ser expresadas en términos de dureza Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop y dureza shore esta última es utilizado en materiales elastómeros.

La dureza es considerada como un ensayo no destructivo que se determina rápidamente con un equipo poco costoso.

Existen 3 métodos para calcular la dureza cada uno de ellos utiliza distintos parámetros en consideración, tales métodos son los siguientes:

- ✓ Prueba de penetración
- ✓ Prueba de rebote
- ✓ Prueba de rayado

Ductilidad

Es la capacidad que tienen algunos materiales para deformarse de manera permanente sin romperse cuando se le aplica una fuerza. La ductilidad en los materiales permite obtener alambres o hilos a partir de la acción de una fuerza.

Fragilidad

Se define como la capacidad de un material de romperse con escasa deformación. La rotura frágil absorbe poca energía, a diferencia de la rotura dúctil, que absorbe mucha energía.

Tenacidad

Es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura. También puede ser entendida como la habilidad de un material para absorber energía durante la deformación plástica. La tenacidad se utiliza mucho, pero es difícil de medir. La forma de concretar el concepto es calcular el área bajo la curva de esfuerzo - deformación.

Resilience

La resiliencia es una magnitud que cuantifica la cantidad de energía por unidad de volumen que almacena un material al deformarse elásticamente debido a una tensión aplicada. También puede entenderse como la cantidad de energía que almacena un material en una rápida recuperación completa de una muestra deformada. La resiliencia es esencialmente la capacidad de un compuesto para volver rápidamente a su forma original después de una deformación temporal [8]. La resiliencia depende de la velocidad de deformación.

Compression Set

Es la deformación de un material después de haber estado sometido a una fuerza en compresión durante un tiempo y temperatura específico [9]. El valor de la compresión set se da en % cuando el valor de esta propiedad es de 100% quiere decir que el material se deforma por completo y si el valor es de 0 nos indica que el material no ha sufrido ninguna deformación [8] (ver figura 1.7).

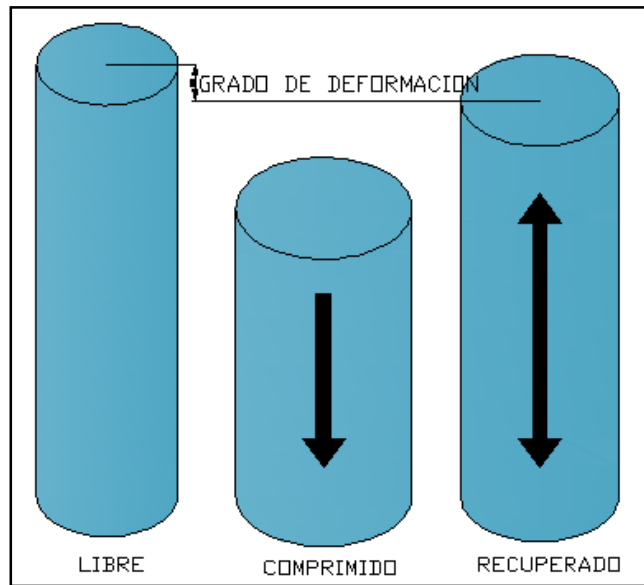


Figura 1.7 Representación de la compresión set

Elasticidad

Capacidad de algunos materiales de sufrir deformaciones cuando se encuentran sujetos a una fuerza ya sea de compresión o de tensión y recuperar la forma original una vez que se eliminan estas fuerzas que lo deforman.

Maleabilidad

Es la propiedad de un material de adquirir una deformación mediante una compresión sin fracturarse. Mediante esta propiedad se pueden obtener láminas delgadas de ciertos materiales con esta propiedad.

Resistencia a la tracción

Se define como la máxima carga soportada por el material durante la prueba de tensión entre el área de sección transversal original sin romperse [10]. También se puede definir como el esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada, que es el esfuerzo más alto sobre la curva esfuerzo-deformación.

Resistencia al impacto

Se define como la resistencia a la fractura bajo fuerza de choque. Esta propiedad se puede determinar por medio de un ensayo de Charpy o Izod, esta prueba es utilizada como un método de control de la calidad para evaluar la calidad de los materiales.

Resistencia a la abrasión

Es la resistencia al desgaste o pérdida del material producida por la fricción contra otro material, se mide mediante unos aparatos llamados abrasímetros.

Esfuerzo de relajación

Sucede cuando un material sometido a un esfuerzo mantiene una deformación constante y el esfuerzo necesario para producir dicha deformación irá disminuyendo paulatinamente.

Para ampliar más los conceptos sobre las propiedades mecánicas se pueden consultar las referencias bibliográficas [11], [12], [13], [14], [15], [16] de este trabajo.

2. Materiales

La ingeniería y especialmente el área de materiales han tenido un gran desarrollo con el paso de los años. La creación de nuevos materiales e incluso la modificación de las propiedades de algunos ya existentes, ha generado que en la selección de un material para cierto uso, sus propiedades sea una de las principales consideraciones.

2.1 Selección de materiales

Para la buena selección de un material se debe de seguir los siguientes pasos:

- 1.- Analizar la aplicación, esto se hace con el fin de poder conocer las condiciones de trabajo sobre las que estará sometido el material a seleccionarse, para determinar las propiedades más importantes que el material debe poseer.
- 2.- Conociendo las propiedades más importantes se podrá seleccionar el material más apropiado, utilizando la información incluida en manuales y reportes de pruebas realizadas.

Sin embargo se debe de conocer como se llevo a esas propiedades establecidas en los manuales y reportes por lo que es necesario conocer bajo que norma se llevo a cabo dichas pruebas.

En el proceso de selección de nuevos materiales para sellos para una PEMFC se siguió los pasos establecidos en párrafos anteriores en donde el punto uno quedo establecido en el tema 1.2 que trata sobre, funciones y requerimientos del sello.

Para el punto dos se llevo a cabo una selección de fuentes de información como patentes, artículos y sitios web quedando seleccionados aquellos que hablan exclusivamente sobre sellos y los cuales fueron consultados para obtener la información requerida. Estas fuentes de información se pueden encontrar en la bibliografía correspondiente a este trabajo por si se requieren sus datos para una consulta próxima.

De las fuentes seleccionadas se obtuvo información sobre que materiales se han estado utilizando como sellos, de los cuales se hablan sobre polímeros pero en especial en un tipo de polímero sintético que ofrece muchos beneficios para su uso como sello como son los elastómeros y de nuevas tecnologías de sellado como es el proceso LIM Hydrocarbon. A continuación se describe cada material.

2.1.1 Polímeros

Los polímeros son materiales cuyas moléculas están compuestas por varios miles de moléculas más pequeñas, llamadas monómeros, que están unidas entre sí para formar cadenas largas. Los polímeros pueden ser de origen natural como sintético. En los polímeros elásticos estas cadenas son muy flexibles, desordenado, y se entrelazan.

Los polímeros sintéticos se pueden clasificar en tres diferentes tipos de materiales: **Elastómeros:** Sustancias que poseen la elasticidad que caracteriza al caucho y que se emplean para fabricar gomas, mangueras o neumáticos.

Fibras: Materiales capaces de orientarse para formar filamentos largos y delgados como el hilo. Poseen una gran resistencia a lo largo del eje de orientación, tal como ocurre con el algodón, lana y la seda. Tienen su principal aplicación en la industria textil.

Plásticos: Son polímeros que pueden ser moldeados a presión y transformados en diversos objetos con formas diferentes, o bien, usados como pinturas o recubrimientos de superficies [17].

2.1.2 Elastómeros

El término elastómero se refiere a cualquier miembro de una clase de sustancias poliméricas que son elásticas, es decir, la capacidad para recuperar la forma después de la deformación. En otras palabras los elastómeros o también conocidos como cauchos pueden deformarse grandemente de forma elástica cuando se las aplica una fuerza y pueden volver a su forma original (o casi) cuando se le elimina la fuerza [6].

2.1.3 LIM Hydrocarbon

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrogeno. La mayoría de los elastómeros son hidrocarburos. Los LIM Hydrocarbon son materiales elastómeros que son sometidos al proceso LIM para ser utilizados como sellos.

El proceso LIM consiste es un proceso que consiste en inyectar un tipo de elastómero en estado fundido sobre un molde que posee la forma de lo que se desea obtener para que después de cierto tiempo transcurrido este se solidifique y se obtenga la pieza deseada.

Después de ver la definición de cada material nos podemos dar cuenta de que todos están íntimamente relacionados, ya que un polímero es la base de todo material elastómero, y hablar de LIM Hydrocarbon es hablar de sellos de elastómeros que son fabricados mediante el proceso LIM que proporciona mejores características de sellado.

Entre los materiales mas recomendados establecidos en las referencias bibliográficas se encuentran los elastómeros (también conocidos como Rubber) ya que estos ofrecen buenas características para ser usadas en las PEMFC, de entre los elastómeros existen muchos tipos, los cuales en cada uno varía sus características tanto de condiciones de trabajo como de rendimiento.

En la tabla 2.1 se muestra una recopilación de todos estos materiales, de igual manera se presentan sus características mas sobresalientes las cuales nos ayudaran para una mejor selección. Las características ahí mostradas son propuestas por datos técnicos de empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de sellos y de las cuales las mayorías concuerdan. Estos datos técnicos pueden ser consultados para una mayor comprensión o para obtener la información de forma ampliada en las referencias bibliográficas [43]-[68] establecidos en este trabajo.

Las propiedades establecidas en la tabla 2.1 fueron obtenidas a partir de ensayos y pruebas ideales establecidas en documentos por organizaciones que regulan estas tipos de pruebas a los cuales se les conoce como normas. Para estas pruebas las normas utilizadas son las ASTM.

CARACTERISTICAS		EPDM	NEOPRENE	HYPALON	SILICONE	NITRILE	BUTYL	VITON	HNBR	URETHANE	POLYACRYLATE	FLUOROSILICONE (FVQM)	ETHYLENE ACRYLATE
TERMICAS	ESTABILIDAD TERMICA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	S/E	BUENA	EXCELENTE	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E
	TEMPERATURA DE TRABAJO °C	(-28 a 177)	(-30 a 135)	(-35 a 160)	(-80 a 250)	(-48 a 107)	(-15 a 150)	(-26 a 204)	(-32 a 149)	(-30 a 170)	(-51 a 149)	(-62 a 121)	(-40 A 163)
	TEMPERATURA DE RIGIDEZ °C	(-75)	(-50)	(-35 a -45)	(-50 a -82)	(-55)	(-25 a 45)	S/E	S/E	(-25 a -35)	S/E	S/E	S/E
QUIMICAS	RESISTENCIA QUIMICA	MUY BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	EXCELENTE	REGULAR	REGULAR	BAJA	REGULAR	S/E
	PERMEABILIDAD DE LOS GASES	REGULAR	BAJA	BUENA	REGULAR	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	S/E	REGULAR	BUENA	ALTA
MECANICAS	COMPRESSION SET	20%	18%	27%	25%	20%	21%	15%	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E
	RESILIENCIA	BUENA	ALTA	BUENA	BUENA	BUENA	BAJA	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	BAJA	S/E
	ELASTICIDAD	300%	200%	250%	300%	300%	350%	250%	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E
	DUREZA (SHORE A)	70	65	70	60	75	60	70	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E
	RESISTENCIA A IMPACTO	BUENA	BUENA	BUENA	REGULAR	REGULAR	EXCELENTE	BUENA	S/E	EXCELENTE	S/E	EXCELENTE	S/E
DIELECTRICAS	RESISTENCIA ELECTRICA	EXCELENTE	BUENA	BUENA	EXCELENTE	REGULAR	EXCELENTE	BUENA	REGULAR	BUENA	S/E	EXCELENTE	S/E
APLICACIONES		O-RINGS, SELLOS, USO INDUSTRIAL	O-RING, SELLOS, CABLES	JUNTAS, AISLAMIENTO DE CABLES	O-RING, SELLOS, DISPOSITIVOS MEDICOS	O-RINGS, SELLOS, SISTEMAS DE COMBUSTION	O-RING, SELLOS	O-RINGS, SELLOS, JUNTAS DE MOTORES DE AVION E INDUSTRIALES	O-RINGS	O-RINGS	O-RINGS	O-RINGS	O-RINGS
OTRAS CARACTERISTICAS		RESISTENTE AL ENVEJECIMIENTO	BUENA ADHESION A METALES	BUENA ADHESION A METALES	FACILIDAD DE MANUFACTURA	RESISTENTE AL ENVEJECIMIENTO	RESISTENTE AL DESGASTE	MUY RESISTENTES Y DE LARGA DURACION DE SERVICIO	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E
FUENTE		[18], [19]	[26]	[42]	[19], [20], [26]	[26]	[26]	[26], [42]	[26]	[26]	[26]	[26]	[26]
COMENTARIOS		APROBADO PARA USO EN EL SECTOR ALIMENTICIO	OFRECE EL CONJUNTO MAS EQUILIBRADO DE PROPIEDADES DESEABLES	S/E	NO ES RECOMENDADO PARA JUNTAS DINAMICAS DEBIDAS A SUS PROPIEDADES DE FRICCION	ES EL MATERIAL MAS USADO COMO SELLO EN EL MUNDO	UTILIZADO PARA EL SELLADO HERMETICO PARA AIRE	RECOMENDADO PARA APLICACIONES QUE REQUIEREN ALTAS TEMPERATURAS Y BUENA COMPRESION	S/E	S/E	S/E	S/E	S/E

Tabla 2.1 Materiales utilizados en la actualidad como sello y características

2.2 Normas ASTM

La Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) es un documento que ha sido desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización, y que cumple los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM [69].

La ASTM es una de las mayores organizaciones en el mundo que desarrollan normas voluntarias por consenso. ASTM es una organización sin ánimo de lucro, que brinda un foro para el desarrollo y publicación de normas voluntarias por consenso, aplicables a los materiales, productos, sistemas y servicios. Los miembros de ASTM, que representan a productores, usuarios, consumidores, el gobierno y el mundo académico de más de 100 países, desarrollan documentos técnicos que son la base para la fabricación, gestión y adquisición, y para la elaboración de códigos y regulaciones [69].

Para la selección de las normas se consultaron los volúmenes 8 y 9 del “Annual book of ASTM standards” que trata sobre plásticos y materiales Rubber. Los dos volúmenes seleccionados están integrados por un total de 2232 normas estandarizadas de las cuales se selecciono aquellas que evalúan las propiedades requeridas, quedando un total de 17 normas ASTM que cumplen las expectativas buscadas.

Además en la referencia bibliográfica [70] correspondiente a la Fuel Cell and Hydrogen Energy Association se establece una serie de normas ASTM que son recomendadas para pruebas en materiales para sellos. En la tabla 2.2 se muestra las normas recomendadas por la Fuel Cell and Hydrogen Energy Association en comparación con las seleccionadas, muchas de las normas pueden coincidir pero otras no, ya que no son tan necesarias conocerlas.

Tabla 2.2 Comparación de las normas recomendadas y las seleccionadas

Normas ASTM según la Fuel Cell and Hydrogen Energy Association	Normas ASTM seleccionadas
<p>1.- D156605a – Standard Terminology Relating to Rubber</p> <p>2.- D88300 – Standard Terminology Relating to Plastics</p> <p>3.- D604802 – Standard Practice for Stress Relaxation Testing of Raw Rubber, Unvulcanized Rubber Compounds, and Thermoplastic Elastomers</p> <p>4.- D643602 – Standard Guide for Reporting Properties for Plastics and Thermoplastic Elastomers</p> <p>5.- D614797 – Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer Determination of Force Decay (Stress Relaxation) in Compression</p> <p>6.- D39503 – Standard Test Method for Rubber Property Compression Set</p> <p>7.- D122903 – Standard Test Method for Rubber Property Compression Set at Low Temperatures</p> <p>8.- D41298ae1 – Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer Tension</p> <p>9.- D224004e1 – Test Method for Rubber Property Durometer Hardness</p> <p>10.- D47198e2 – Standard Test Method for Rubber Property Effect of Liquids</p> <p>11.- D57304 – Test Method for Rubber Deterioration in an Air Oven</p> <p>12.- D74604 – Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact</p> <p>13.- D57204 – Standard Test Method for Rubber Deterioration by Heat and Oxygen</p> <p>14.- D79200 – Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement</p> <p>15.- D88202 – Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting</p> <p>16.- D114999 – Standard Test Method for Rubber Deterioration Surface Ozone Cracking in a Chamber</p> <p>17.- D133004 – Standard Specification for Rubber Sheet Gaskets</p> <p>18.- D141494 – Standard Test Methods for Rubber O-Rings</p> <p>19.- D143482 – Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting</p> <p>20.- D572599 – Standard Test Method for Surface Wettability and</p>	<p>1.- D39503 - Standard Test Methods for Rubber Property Compression Set</p> <p>2.- D57304 Standard Test Method for Rubber Deterioration in an Air Oven</p> <p>3.- D74604 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact</p> <p>4.- D88300 - Standard Terminology Relating to Plastics</p> <p>5.- D141494 - Standard Test Methods for Rubber O-Rings</p> <p>6.- D156600 - Standard Terminology Relating to Rubber</p> <p>7.- D224004e1 – Test Method for Rubber Property Durometer Hardness</p> <p>8.- D604802 - Standard Practice for Stress Relaxation Testing of Raw Rubber, Unvulcanized Rubber Compounds, and Thermoplastic Elastomers</p> <p>9.- D64369902 - Standard Guide for Reporting Properties for Plastics and Thermoplastic Elastomers</p> <p>10.- E43291 - Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method</p> <p>11.- E47991 - Standard Guide for Preparation of a Leak Testing Specification</p> <p>12.- E69105 - Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method</p> <p>13.- F3700 - Standard Test Methods for Sealability of Gasket Materials1</p> <p>14.- F11804 - Standard Definitions of Terms Relating to Gaskets</p> <p>15.- F14604 - Standard Test Methods for Fluid Resistance of Gasket Materials</p> <p>16.- F36399 - Standard Test Method for Corrosion Testing of Gaskets</p> <p>17.- F60703 - Standard Test Method for</p>

<p>Absorbency of Sheeted Materials Using an Automated Contact Angle Tester</p> <p>21.- E2904 – Standard Practice for Using Significant digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications</p> <p>22.- E96/E96M05 – Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials</p> <p>23.- E43291 – Standard Guide for Selection of a Leak Test Method</p> <p>24.- E47991 – Standard Guide for Preparation of a Leak Testing Method</p> <p>25.- E595* 93(2003)e2 – Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Out-gassing in a Vacuum Environment</p> <p>26.- E69199 – Standard Practice for Conducting an Inter-laboratory Study to Determine the Precision of a Test Method</p> <p>27.- E148802e1 – Standard Guide for Statistical Procedures to Use in Developing and Applying Test Methods</p> <p>28.- E155903 – Standard Test Method for Contamination Out-gassing Characteristics of Spacecraft Materials</p> <p>29.- F60703 – Standard Test Method for Adhesion of Gasket Materials to Metal Surfaces</p>	<p>Adhesion of Gasket Materials to Metal Surfaces</p>
---	---

A continuación se describe cada una de las normas ASTM seleccionados para conocer que propiedad evalúa, condiciones y proceso de las pruebas. Las normas serán clasificadas en teóricas y prácticas.

2.2.1 Normas ASTM teóricas

2.2.1.1 D1566 - 00 Standard Terminology Relating to Rubber

Esta norma establece todos los términos técnicos utilizados en la industria del Rubber. Los términos aquí mostrados son establecidos por organismos reconocidos, expertos en el campo, después haber sido aprobado por votación.

Los términos se insertan en esta norma sin modificaciones y además se especifica la fuente. La información aquí mostrada es para conocer e identificar palabras que se podrán estar utilizando en otras normas y que es necesario saber el significado que tiene para una mayor comprensión.

2.2.1.2 D 883 – 00 Standard Terminology Relating to Plastics

Esta terminología abarca las definiciones de los términos técnicos utilizado en la industria de los plásticos. Al igual que la norma D1566-00 estos términos son establecidos por organismos reconocidos, expertos en el campo y aprobados por votación.

Estos términos son de ayuda para tener una mejor comprensión de los procesos establecidos en las normas que más adelante se describen.

2.2.1.3 F 118 – 04 Standard Definitions of Terms Relating to Gaskets

Esta norma es una compilación de terminología, definiciones y descripciones de términos utilizados en la industria de los gaskets. Los términos incluidos son los que se utilizan para definir los materiales, tecnología de las pruebas, y resultados de las pruebas relacionadas con los gaskets.

Dentro de los términos incluidos en las normas anteriormente descritos podemos hacer mención de aquellos que son muy importantes, a continuación se muestran estos términos:

- **Gasket:** Se define como un material deformable sujeto entre caras esencialmente estacionarias para impedir el paso de la materia a través de una abertura.
- **Rubber:** Un material que es capaz de recuperarse de grandes deformaciones rápidamente.
- **Impact resistance:** resistencia a la fractura bajo fuerza de choque.
- **Resilience:** La resiliencia es esencialmente la capacidad de un compuesto para volver rápidamente a su forma original después de una deformación temporal.
- **Stress:** Es la carga en términos de fuerza aplicada a una cierta área de sección transversal de un objeto.
- **Stress relaxation:** La disminución en el esfuerzo después de un tiempo dado.
- **Viscoelasticity:** Una combinación de propiedades viscosas y elásticas de un material.

- **Compression Set:** La deformación de un material después de la eliminación del esfuerzo de compresión.

2.2.1.4 E 432 – 91 Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method

Esta norma es una guía que ayuda a seleccionar el método correcto de prueba para fugas. La correcta elección optimiza sensibilidad, costo y fiabilidad de la prueba. Los distintos métodos son examinados para determinar su idoneidad para el sistema en particular. Sólo entonces el método apropiado será elegido.

En la elección del método correcto un punto importante a considerar es la sensibilidad del instrumento a utilizar. Un instrumento muy sensible puede influir en los resultados obtenidos en dicha prueba, generando variaciones con los resultados obtenidos con otros instrumentos menos sensibles. El proceso se puede consultar en el anexo a este trabajo en la norma E432-91.

2.2.1.5 E 479 – 91 Standard Guide for Preparation of a Leak Testing Specification

Es un método que sirve como guía para la preparación de pruebas. El proceso de preparación de la prueba de fuga es mostrado mediante un ejemplo. Ya que enumera los factores a considerar en la preparación de una prueba específica.

En la preparación se presentan dos tipos de especificaciones:

- 1.- Especificaciones operacionales: en ella se indican los límites de tasa de fugas permitidos utilizando criterios como la falta de funcionamiento o la seguridad.
- 2.- Especificaciones de prueba: en ella se describe las especificaciones para la detección, localización y la medición de las fugas.

Estos factores son mostrados mediante un ejemplo claro que describe todo el proceso basándose en las dos especificaciones mostradas. El ejemplo se puede consultar en el anexo de este trabajo en la norma E479-91.

2.2.1.6 D 6436 – 9902 Standard Guide for Reporting Properties for Plastics and Thermoplastic Elastomers

Es una guía que proporciona recomendaciones para reportar los resultados de las propiedades obtenidas en los ensayos que se lleven a cabo. Esta norma está pensada para tener un mayor control de la información, para tener un acceso fácil al nombre de la prueba recomendada, referencia y el número máximo de dígitos significativos para los resultados así como también unidades estándar recomendadas.

Es especialmente útil para quienes participan en la redacción y corrección de los datos de los documentos que contienen un gran número de pruebas. En la tabla 2.3 se representan las características de cómo reportar los resultados de las pruebas.

2.2.1.7 E 691 – 05 Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

Esta norma describe las técnicas para la planificación, realización, análisis y tratamiento de los resultados de una prueba mediante estudios en laboratorios (ILS, Interlaboratory Studies).

La norma no se preocupa sobre el desarrollo de los métodos de prueba, sino más bien de la recopilación de la información necesaria para la determinación de la precisión de la prueba. Para declarar si la prueba necesita de una mejora o proporciona la precisión que se requiere. El uso de esta norma es exclusivamente para aquellos métodos que producen una sola cifra numérica como el resultado de la prueba.

El procedimiento presentado en esta práctica consiste en tres pasos básicos: la planificación del ILS, la guía de la prueba a estudiar y el análisis de datos de los resultados obtenidos en las pruebas. El análisis utiliza tablas, gráficas y diagnóstico estadístico, herramientas para evaluar la consistencia de los datos de modo que los valores inusuales pueden ser detectados e investigados, y también incluye el cálculo de las medidas numéricas de la precisión del método de ensayo. El proceso completo puede ser consultado en el anexo de este trabajo en la norma E691-05.

Tabla 2.3 Forma de reportar los resultados de la pruebas

Property Reported	Units, SI (U.S. Customary)	ASTM Test Method	Maximum Number of Significant Digits	Conversion Factor (CV) (SI × CV = U.S. Customary)
Arc Resistance	s (s)	D 495	2	1
Bulk Density	kg/m ³ (lb/ft ³)	D 1895	3	0.06242797
Coefficient of Friction	—	D 1894	2	—
Coefficient of Linear Thermal Expansion	mm/mm × °C (in./in. × °F)	D 696	2 (expressed in scientific notation)	0.5555556
Color, CIE, L*, a*, b*	—	E 308	3	—
Crystalline Peak Melting Point (T _m) 2nd Heating Cycle	°C (°F)	D 3418	3	(°C × 1.8) + 32
Dart Impact	g (g)	D 1709	2 (1 if value is <100)	1
Deflection Temperature @ 1.82 MPa (264 psi) @ 0.455 MPa (66 psi)	°C (°F)	D 648	3	(°C × 1.8) + 32
Density	kg/m ³ (g/cm ³) g/cm ³ (g/cm ³) g/cm ³ (g/cm ³)	D 792 D 1505 D 4883	3 3 3	0.001 1 1
Dielectric Strength (Specify Method Used)	V/mm (V/mil)	D 149	3	0.0254
Dissipation Factor (Specify Test Frequency)	—	D 150	2	—
Durometer Hardness Shore A Shore D	—	D 2240	2	—
Elmendorf Tear Resistance	N (gf)	D 1922	3	101.9716
Elongation @ Break	% (%)	D 638 D 882 D 412	2 2 2	1 1 1
Elongation @ Yield	% (%)	D 638 D 882 D 412	2 2 2	1 1 1
Flammability	cm/min (in./min)	D 635	2	0.394
Flexural Modulus	MPa (10 ⁵ psi)	D 790	3	0.001450377
Flexural Modulus, ___% Secant	MPa (10 ⁵ psi)	D 790	3	0.001450377
Flexural Strength	MPa (psi)	D 790	3	145.0377
Flexural Yield Strength	MPa (psi)	D 790	3	145.0377
Flow Rate, Condition ___°C/___kg	g/10 min (g/10 min)	D 1238	2	1
Gardner Impact Strength @ F ₅₀	J (in. × lbf)	D 5420	2	8.8507452
Gas Permeability, CO ₂	cm ³ × mm/m ² × 24 h × atm (cm ³ × mil/100 in. ² × 24 h × atm)	D 1434	2	2.54
Gas Permeability, O ₂	cm ³ × mm/m ² × 24 h × atm (cm ³ × mil/100 in. ² × 24 h × atm)	D 3985	2	2.54
Gas Transmission Rate, CO ₂	cm ³ /m ² × 24 h × atm (cm ³ /100 in. ² × 24 h × atm)	D 1434	2	0.064516128

2.2.2.8 D 1414 – 94 Standard Test Methods for Rubber O-Rings

Esta norma enlista una serie de procedimientos recomendados para llevarse a cabo en O-Rings o materiales para sellos, para la determinación de sus propiedades físicas y los cambios presentados por el envejecimiento. Además se presenta una breve descripción de cada uno de los procesos. Estos procedimientos son aceptables para fines de control de calidad.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades recomendadas para que sean evaluadas con la norma correspondiente que permite su evaluación.

PROPIEDAD	NORMA
Tension test	D412
Compression set	D395
Low temperatura	D1349
Density	D297
Fluid aging	D471
Heat aging	D865 y D573
Hardness	D2240 y D1415

De las normas mostradas en la tabla anterior algunos fueron considerados y en las normas siguientes se describe el proceso que conlleva dicha prueba.

2.2.2 Normas ASTM prácticas

2.2.2.1 D 395 – 03 Standard Test Methods for Rubber Property Compression Set

Esta prueba mide la capacidad de los Rubber para mantener las propiedades elásticas después de estar sometidos a una prolongada acción de esfuerzos de compresión, ya sea en aire o en medios líquidos, como en los asientos de las maquinarias o en los sellos. La función principal de esta norma es dar el procedimiento para determinar la variación de la propiedad “compression set” en los materiales Rubber, ya sea al instante de someterlo a una carga o a través del tiempo.

Esta norma presenta dos tipos de procedimientos para la determinación de la propiedad como son:

- A – Compression set under constant force in air
- B – Compression set under deflection in air

El proceso consiste en someter una muestra del material a ensayar con cualquiera de las siguientes dimensiones.

Opciones	1	2
Espesor mm	12.5 ± 0.5	6.0 ± 0.2
Diámetro mm	29.0 ± 0.5	13.0 ± 0.2

La muestra es colocada en un dispositivo de compresión. En la figura 2.1 se muestra el dispositivo correspondiente para cada tipo de procedimiento.

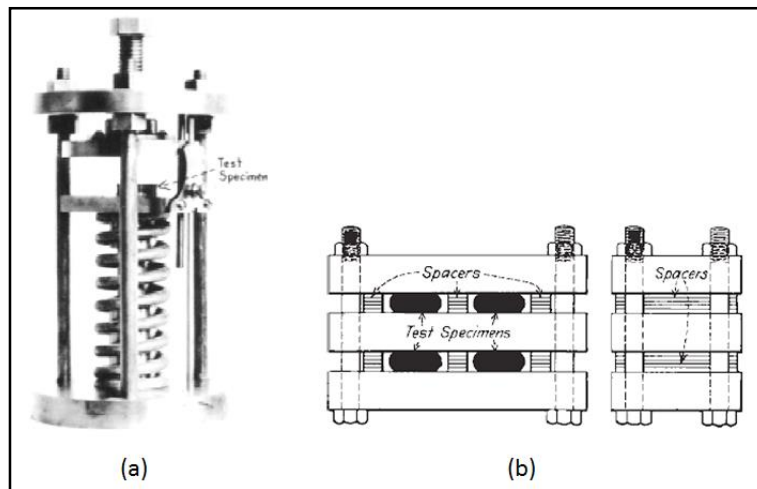


Figura 2.1 Tipos de dispositivos (a) para el procedimiento A y el (b) para el procedimiento B.

Para el dispositivo (a) la fuerza aplicada máxima es de 1.8KN esto se logra mediante el apriete de los tornillos, en caso del dispositivo (b) la aplicación de fuerza se logra mediante la adición de masas hasta lograr una compresión máxima del 25% de la muestra a ensayar.

Una vez colocado la muestra en el dispositivo con su respectiva apriete se deja descansar 2 horas, para después ser introducido en un horno de laboratorio tipo IIB recomendada por la norma E145 para el inicio del proceso.

El período de prueba tendrá una duración de 20 a 70 horas al menos que se especifique lo contrario. Si la temperatura no se especifica se recomienda utilizar las establecidas en la norma E1349-99.

Una vez transcurrido el tiempo de prueba la muestra es retirada inmediatamente del horno así como del dispositivo, y colocada en una superficie de baja conductividad térmica (madera), para dejarla descansar durante 30 minutos para después tomar la medida del espesor. Una vez obtenido el dato se realiza la siguiente operación matemática para encontrar el valor del compression set. El valor se da expresado en % de la deformación del espesor original.

Para el método A la fórmula es la siguiente:

$$C_A = \left[\frac{(t_0 - t_1)}{t_0} \right] \times 100$$

C_A = Compression set %

t_0 = Espesor original

t_1 = Espesor final

Para el método B la formula es la siguiente:

$$C_B = \left[\frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_n)} \right] \times 100$$

C_B = Compression set %

t_0 = Espesor original

t_1 = Espesor final

t_n = Espesor de la barra especiadora usada

2.2.2.2 D 573 – 99 Standard Test Method for Rubber—Deterioration in an Air Oven

Esta es una prueba que describe el procedimiento ha seguir para la determinación de los cambios en las propiedades físicas de los Rubber al estar sometidos a elevadas temperaturas durante un tiempo determinado.

La función principal de esta prueba es la obtención de las variaciones de las propiedades físicas de los materiales, mediante la comparación de las muestras antes y después de haber sido sometidos a la prueba, representando la variación en porcentajes.

La muestra que se someterá a la prueba deberá ser de un tamaño considerable, esto se hace con el fin de poder realizar las mediciones de sus propiedades después del proceso. La cámara de envejecimiento será un horno con las características especificadas en la norma E145, de tal forma que la muestra no toque ninguna de las paredes del horno.

La temperatura para este proceso será de acuerdo a los requerimientos de la prueba, si no se especificas se utilizara las propuesta por la norma E1349-99. El medio de calentamiento deberá ser aire distribuido a una presión atmosférica de 101Kpa.

El proceso inicia cuando la muestra se introduce en el horno una vez que este ha sido precalentado a la temperatura de la prueba. El tiempo de prueba será de 3, 4, 7, o 14 días, intervalos adecuados para evitar que el deterioro no sea tan grande como para evitar medir después las propiedades físicas de la muestra.

Una vez transcurrido el tiempo de prueba la muestra será retirada y colocada en una superficie plana y de baja conductividad térmica para enfriarse a temperatura ambiente. Las propiedades físicas serán medidas a no menos de 16 horas ni más de 96 horas una vez terminada la prueba.

Los cambios presentados serán expresados en porcentaje de cambio, esto será calculado mediante la siguiente expresión matemática.

$$P = \left[\frac{(A - O)}{O} \right] \times 100$$

P = % de cambio en propiedad

O = Valor original

A = Valor después del envejecimiento

2.2.2.3 D 746 – 04 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact

En esta prueba, el procedimiento descrito sirve para determinar la temperatura en el cual los elastómeros y los plásticos presentan fragilidad al ser sometidos al impacto. Además de poder conocer el comportamiento del material a la temperatura de prueba.

Para la realización de esta prueba se pueden utilizar dos tipos de instrumentos que consisten en una pinza para sujetar una o varias muestras desde un extremo, quedando en voladizo. Tal y como se muestran en la figura 2.2.

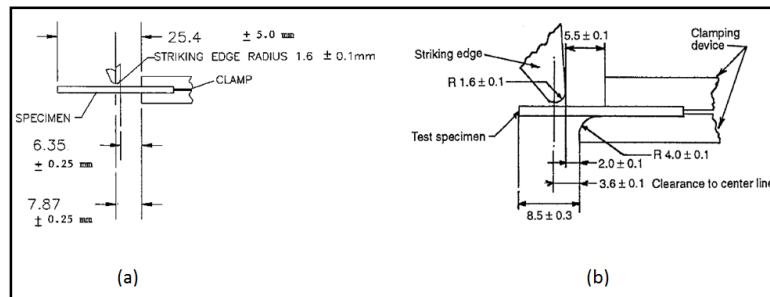


Figura 2.2 Tipos de instrumentos para pruebas de fragilidad

Las dimensiones de las muestras para esta prueba se pueden observar en la figura 2.3 donde se presentan las dimensiones que puede tomar la muestra.

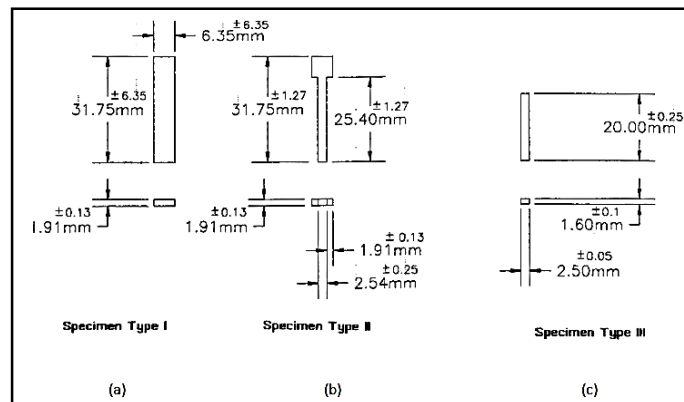


Figura 2.3 La muestra tipo I es para el instrumento de la figura 2.2a y la muestra tipo II y III es para el de la figura 2.2b

El proceso inicia cuando se coloca la muestra en el instrumento de sujeción asegurándolo con un torque de 0.56Nm para evitar una deformación excesiva del material, si se presenta deslizamiento del material aumentar una cantidad mínima necesaria del torque. Después se introduce la muestra en un depósito aislado que se encuentra al 50% de la temperatura de fragilidad del material (si se conoce), en caso de que no se conozca dicho valor se inicia a una temperatura arbitraria.

Durante la prueba se debe tratar de mantener la temperatura inicial, mediante la adición de hielo seco, para pruebas en depósitos aislados, si se utilizan un equipo de enfriamiento se debe seguir la indicación del fabricante.

La prueba tendrá una duración de 3 minutos, una vez transcurrido este tiempo se le propiciara un impacto a la muestra para después ser retirado del instrumento de sujeción y se deje calentar a temperatura ambiente durante 1 minuto o 10 a 15 segundos en agua tibia. Examinar la muestra para saber si presenta grietas, si presentara esta falla se debe anotar el número y la temperatura a la cual se produjo.

Si en los ensayos las muestras fallan a la primera prueba aumentar 10°C y realizar nuevamente el ensayo. Si la muestra no presenta ningún fallo se deberá disminuir 10°C a la temperatura de prueba y se deberá realizar nuevamente el procedimiento. Realizar estas pruebas hasta encontrar la temperatura más baja en el cual las muestras no presenten ninguna falla.

Para el cálculo de la temperatura de fragilidad se utiliza la siguiente expresión matemática.

$$T_b = T_h + \Delta T \left[\left(\frac{S}{100} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \right]$$

T_b = Temperatura de fragilidad

T_h = Temperatura mas alta a la que el fracaso de todas las especímenes se produce (el signo apropiado deber ser utilizado)

S = Suma de % de roturas en cada temperatura

2.2.2.4 F 37 – 00 Standard Test Methods for Sealability of Gasket Materials

El procedimiento descrito en esta norma es para evaluar las características de sellado de un material bajo diferentes cargas de compresión a temperatura ambiente y determinar la tasa de fuga. Esta norma nos describe dos métodos para llevar acabo la evaluación de los materiales, tales métodos son:

- A - Mediciones de fugas de líquidos
- B - Mediciones de fugas para líquidos y gases

Para la pruebas de fugas de líquidos se utiliza un combustible, que es establecido por los que realizan la prueba y para la prueba de fuga de gases se utiliza el nitrógeno. Para cada método se utiliza instrumentos de prueba distintos en la figura 2.4, 2.5 y 2.6 se presentan los diferentes tipos.

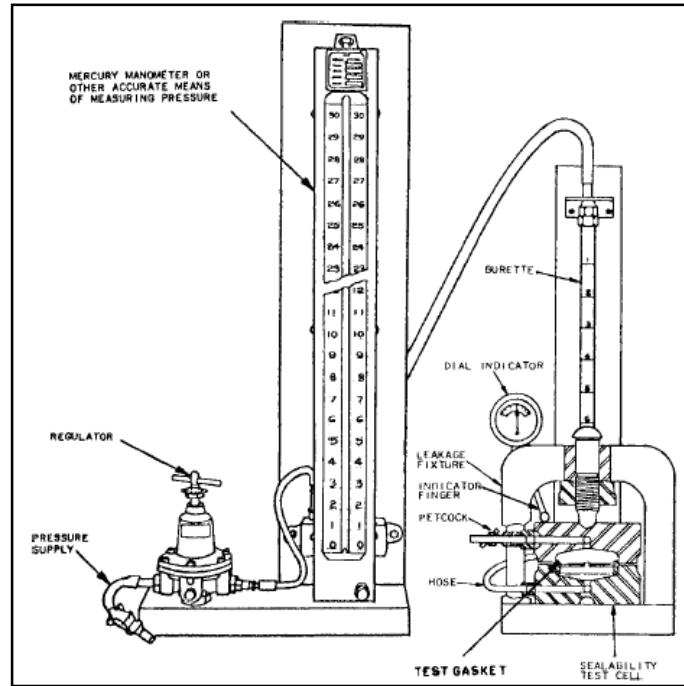


Figura 2.4 Instrumento utilizado para el método A

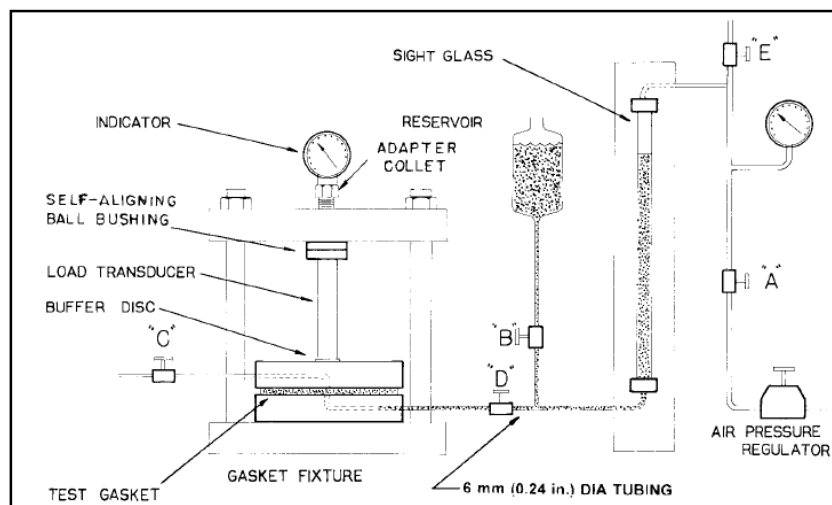


Figura 2.5 Instrumento utilizado para el método B para pruebas con líquido

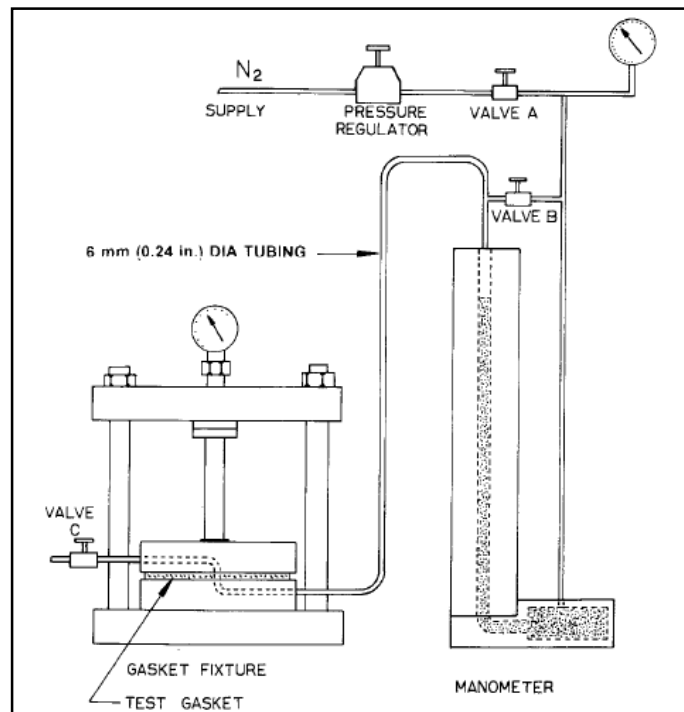


Figura 2.6 Instrumento utilizado para el método B para pruebas con gas

Para la realización de esta prueba la muestra para el método A deberán de ser de 32.26 a 32.31mm de diámetro interior y de 44.20 a 44.32 mm de diámetro exterior con un espesor de 0.76 mm. Para el caso del método B la muestra deberá ser de ciertas medidas que sean adaptable al instrumento de ensayo pero si con un espesor de 0.76mm.

El proceso para llevar acabo la prueba con el método A se inicia colocando la muestra en la superficie del instrumento de pruebas y aplicar la carga recomendada que debe oscilar entre un rango de 862 kPa a 27.6 MPa de forma lenta dentro de un tiempo de 20 segundos. Después se deberá llenar la bureta con el combustible a ensayar y se deberá de purgar el sistema para evitar la presencia de aire por los conductos del instrumento.

Cuando el instrumento se encuentre completamente purgado se deberá aplicar la presión específica de 760mm de mercurio al combustible de ensayo. Durante los siguientes 5 minutos se deberá verificar las fugas que se pueda presentar. Si no se presentan ninguna fuga se deberá leer el nivel de combustible en la bureta. Continuar el proceso hasta que se presente un cambio insignificante de 0.05ml y registrar el tiempo.

Los pasos para la realización de la prueba con el método B es el mismo que la del método A con la única diferencia en que en el método B la tasa de fuga se empieza a medir una vez transcurrido 2 minutos, este es para la prueba de líquidos. Para el caso de la prueba de gases es el mismo proceso que las pruebas ya mencionadas, pero para este caso la tasa se mide con la variación de la presión que puede ser medida mediante el uso de un manómetro.

2.2.2.5 F 363 – 99 Standard Test Method for Corrosion Testing of Gaskets

Este método de pruebas está diseñado para conocer el comportamiento de los materiales bajo condiciones simuladas de campo operativo, sirve para evaluar a los materiales en condiciones corrosivas a temperatura y presión variable.

Esta prueba se logra al poner en contacto directo al material a ensayar con la sustancia seleccionada, para conocer los efectos que esta puede tener en el material.

El procedimiento consiste en someter una muestra de 114mm de diámetro interior y 175mm de diámetro exterior con un espesor que depende del uso esperado.

El cual deberá ser colocado en la brida inferior de la unidad de prueba a utilizar tal y como se muestra en la figura 2.7.

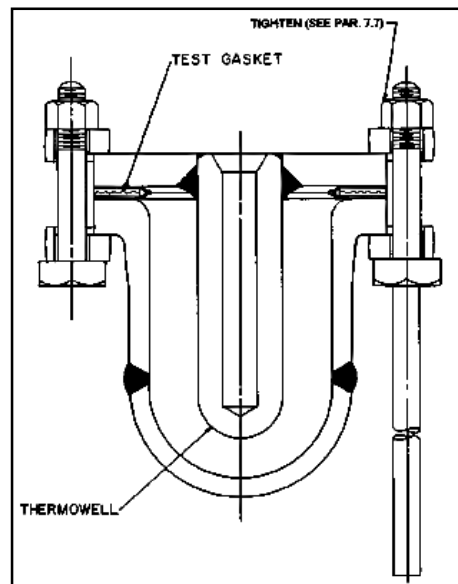


Figura 2.7 Unidad para pruebas de corrosión

Una vez colocada la muestra se deberá introducir 500mL de la sustancia corrosiva a ensayar, para después montar la tapa del instrumento de prueba. Se deberá apretar con un torque de 39 Nm, esto es establecido por la norma F112 que además recomienda añadirle un 25% más del torque especificado por razones de seguridad.

El apriete de los pernos se deberá hacer gradualmente y de manera uniforme llevando un orden tal y como se muestra en la figura 2.8. El incremento del torque será de 20Nm.

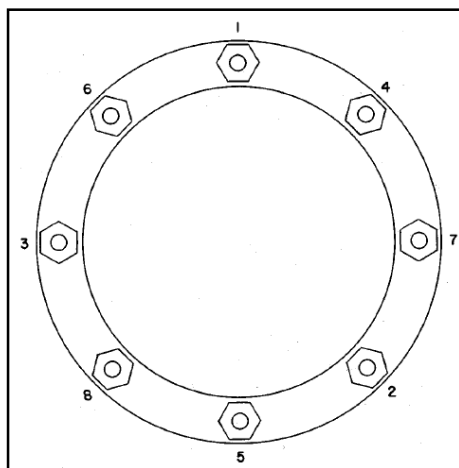


Figura 2.8 Orden de apriete del instrumento para la prueba de corrosión

Una vez transcurrido dos horas después de apriete, se deberá dar otro torque con el mismo valor que el inicial, y se dejara que la prueba continúe a la temperatura deseada durante 2 semanas que es la más recomendada para proporcionar la información del rendimiento significativo.

Una vez transcurrido este tiempo se deberá desmontar la muestra hasta que se haya sido enfriado a temperatura ambiente, para después medir la cantidad de líquido que quedo y examinarlo así como también examinar la muestra buscando si hay cambios como decoloración, grietas, envejecimiento, endurecimiento entre otros índices de ataque.

2.2.2.6 F 607 – 03 Standard Test Method for Adhesion of Gasket Materials to Metal Surfaces

Esta norma proporciona el procedimiento a seguir para determinar el grado en el que los materiales bajo cierta carga de compresión se adhieren a las superficies metálicas. Esta prueba es para una temperatura máxima de 205°C.

El proceso se inicia cuando una muestra del material a ensayar de 32.25 a 32.31 mm de diámetro interior con 51.7 a 51.9 mm de diámetro exterior se monta en el instrumento de prueba mostrado en la figura 2.9, 30 minutos después de haber sido limpiado formando un sándwich con la muestra cuidadosamente centrado entre las placas.

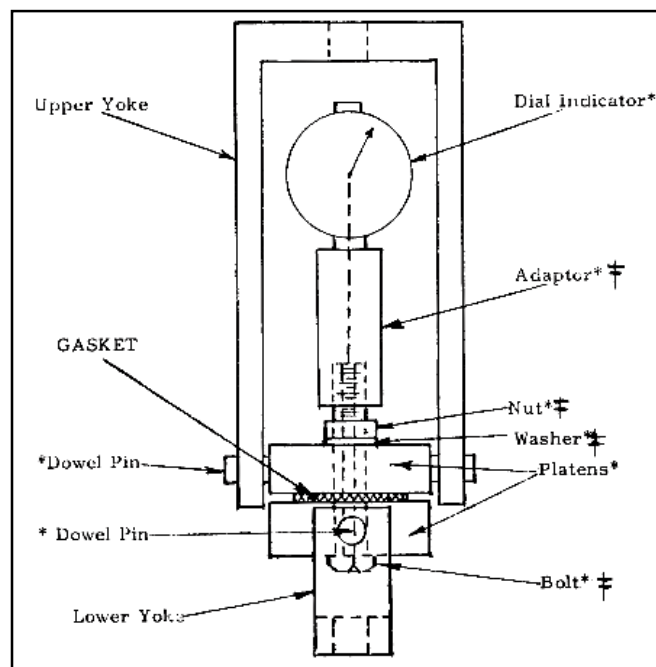


Figura 2,9 Dispositivo a usarse para pruebas de adhesión a metales

Una vez colocado se apretara hasta el valor deseado de apriete, para después colocar el conjunto placa-gasket en aire caliente que circula en un horno a una temperatura de 100°C o al menos de que se especifique lo contrario. El conjunto estará en el horno durante un tiempo de 22 horas.

Una vez transcurrido este tiempo se deberá retirar del horno y se enfría a temperatura ambiente de 21 a 27°C o con un ventilador durante 1 hora. Retirar las tuercas del conjunto y dejar descansar durante 30 minutos, una vez pasado este tiempo colocar sujetadores sobre la muestra y sobre la placa y someterlos a cargas de tracción a una velocidad de 1.3mm/min para determinar el valor en el cual la muestra es separada de la placa de metal.

2.2.2.7 F 146 – 04 Standard Test Methods for Fluid Resistance of Gasket Materials

Este método de prueba proporciona un procedimiento estandarizado para medir el efecto en los materiales cuando son sumergidos en fluidos especificados, bajo determinadas condiciones de tiempo y temperatura.

Después de la inmersión de las muestras en los diversos fluidos de ensayo, el efecto sobre las propiedades físicas se expresa como cambio en la resistencia a la tracción, compresión en estado ablandado, la flexibilidad, el cambio de volumen, el grosor y peso, cambios con respecto a la condición original.

El proceso consiste en colocar muestras de 25.4 por 50.88 mm o de 28.6mm de diámetro en tubos de ensayos usando un solo material por tubo, vertiendo suficiente liquido de ensayo dentro del tubo para cubrir la muestra en su totalidad y asegurar que este bien inmerso tapándolos con unos tapones y colocarlo en un estante dentro de un horno. El tiempo y la temperatura de prueba serán establecidos por la norma F104.

Al terminar el tiempo de prueba se deberá retirar los tubos de ensayos del horno y se deberán sumergir inmediatamente en un lugar fresco a una temperatura de 21 a 29°C durante 30 a 60 minutos. Después se deberá retirar la muestra del fluido y secarse con papel absorbente para después realizar las pruebas requeridas a dicha muestra y compararlas con los resultados de las pruebas realizadas al material antes de dicho proceso, y así obtener los cambios que se produjeron en el material al estar en contacto con el fluido de prueba.

2.2.2.8 D 6048 – 02 Standard Practice for Stress Relaxation Testing of Raw Rubber, Unvulcanized Rubber Compounds, and Thermoplastic Elastomers

Esta norma esta destinada a la medición de la relajación de los esfuerzos en los materiales, proporcionan una medida de la respuesta viscoelástica de un material durante un período de tiempo sin destruir la estructura de la muestra. Las pruebas están destinados para materiales que tienen módulos de relajación en el intervalo de 10^3 a 10^8 Pa ($0,1$ a $1,5 \times 10^4$ psi) y para temperaturas de ensayo de 23 a 225 ° C (73 a 437 ° F).

Por medio de esta norma se puede conocer las propiedades viscoelásticas así como las propiedades mecánicas de los materiales, ya que la determinación de la viscoelasticidad de un material proporciona información para predecir el rendimiento cuando se encuentra en servicio.

El proceso consiste en someter una muestra a un esfuerzo cortante a una velocidad constante por un período de tiempo muy corto. En la figura 2.10 se puede observar un diagrama esquemático de lo que sucede al someter muestras a este tipo de esfuerzos.

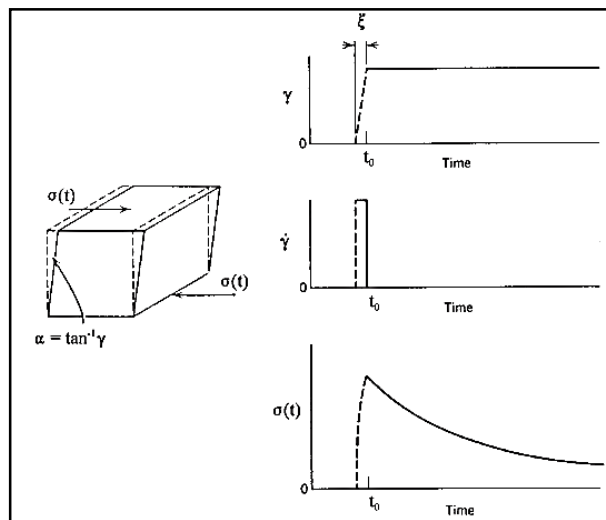


Figura 2,10 Diagrama de un material sometido a esfuerzo cortante

En este tipo de pruebas el cambio de la forma de la muestra de ensayo no va acompañado de ningún cambio en el volumen.

Para un material sometido a esfuerzo de compresión el proceso es el mismo que el del cortante ya que la muestra es sometido a compresión a una velocidad constante durante un periodo de tiempo muy corto. En la figura 2.11 se muestra un diagrama esquemático de la deformación por compresión.

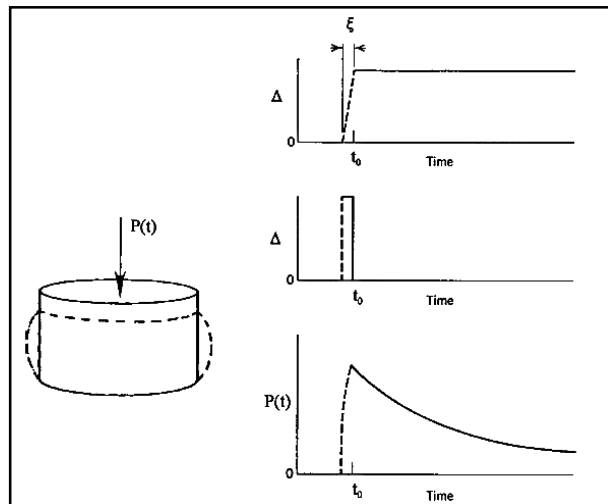


Figura 2.11 Representación del comportamiento de un material sometido a compresión

Todas las normas que fueron brevemente descritas en los subtemas anteriores pueden ser consultadas en su totalidad en los anexos de este trabajo, para una mayor comprensión y para tener mayores detalles del proceso a desarrollar, también se incluyen otras normas que son mencionadas en las ya descritas y por lo tanto también requieren de una consulta para el mejor desarrollo de los procesos. Entre dichas normas tenemos las siguientes:

1. D 1349 – 99 Standard Practice for Rubber—Standard Temperatures for Testing
2. F36-99R03 Standard Test Method for Compressibility and Recovery of Gasket Materials
3. F147-87R03 Standard Test Method for Flexibility of Non-Metallic Gasket Materials

2.3 Características y especificaciones de material usado actualmente como sello

Actualmente en el área de celdas de combustible del departamento de energía no convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). El material utilizado como sello en las PEMFC es de un material llamado “silicone Rubber”, ya que este material hasta el momento ha ofrecido las características buscadas y también un buen desempeño como sello.

El silicone Rubber es un compuesto sintético o inorgánico (es decir, no contiene átomos de carbono en su cadena principal) inodoro e incoloro, cuya base estructural es el elemento químico silicio, que se encuentra de forma natural en la arena, en el cuarzo y en las rocas, cuando se combina principalmente con oxígeno, carbono e hidrógeno, el silicio se transforma en silicona. El polímero de silicona tiene unidades estructurales repetitivas que contienen silicio y oxígeno [71].

Según la norma ASTM 1418 la silicona tiene diferentes designaciones como MQ, PMQ, VMQ, PVMQ.

También puede tomar diferentes nombres comerciales como los que se mencionan a continuación.

- Baysilicone (Bayer Corp.)
- KE (Shincor Silicones)
- Silastic (Dow Corning Corp)
- Silplus (General Electric)
- Tufel (General Electric)

A continuación se presentan las características más sobresalientes de la silicona

➤ Temperatura

Temperatura de trabajo	-80°C a 250°C
Temperatura de rigidez	-50°C a -82°C

➤ Resistencia eléctrica

Ohm-cm	$10^{15} - 10^{16}$
---------------	---------------------

➤ **Permeabilidad de los gases**

Hidrógeno $\frac{cm^2}{seg}$	<i>a 25°C – 495x10⁻⁸</i>
	<i>a 93°C – de 1570 a 2070x10⁻⁸</i>
	<i>a 149°C – de 3300 a 8760x10⁻⁸</i>

➤ **Resistencia química**

Aceites vegetales y animales	Buena
Ácidos concentrados	Regular
Ácidos diluidos	Buena
Calor	Excelente
Frio	Excelente
Gas natural	Regular
Hidrocarburos alifáticos	Mala
Hidrocarburos aromáticos	Mala
Hidrógeno	Regular
Llama	Regular
Nitrógeno	Excelente
Oxidación	Excelente
Oxígeno	Excelente
Ozono	Excelente

➤ **Propiedades mecánicas**

Dureza	60 Shore A
Compression set	70h a 150°C - 20%
Elasticidad	300%
Resistencia a la tracción	11MPa
Esfuerzo de relajación	1000h a 150°C – 30%
Resiliencia	Buena
Resistencia al impacto	Regular
Adhesión a metales	Excelente
Resistencia a la flexión	Mala
Resistencia a la abrasión	Mala
Envejecimiento	Excelente

Ventajas

- Capacidad de conservar sus propiedades físicas a temperaturas elevadas.
- Buena flexibilidad a muy bajas temperaturas
- Extraordinaria resistencia a la oxidación
- Buen aislante eléctrico
- Inodoro e insípido
- Auto extingible
- Idóneo para la aplicación en la medicina
- Baja absorción de agua
- Inalterable por el ozono, la intemperie y la radiación ultravioleta

Desventajas

- No son adecuadas para uso dinámico debido a su baja resistencia a la abrasión al desgarre y resistencia a la tracción.
- Muy permeable a los gases
- Muy permeable al vapor de agua

2.4 Determinación de los valores y características óptimos de las propiedades mecánicas para sellos

Como se sabe los elastómeros son materiales que presentan propiedades de elasticidad, capacidad para recuperar la forma después de la deformación [9]. Junto con esta propiedad la mayoría de los elastómeros poseen otras propiedades útiles como:

- Baja permeabilidad a diferentes gases
- Buenos aislante térmicos y eléctricos
- Buenas propiedades mecánicas

Los valores de las propiedades pueden variar en los diferentes tipos de elastómeros de acuerdo al tipo de proceso de fabricación o en ocasiones por las características requeridas para su uso. Para la determinación de los mejores valores en las propiedades, se debe de hacer un análisis sobre el comportamiento que tendría el material a ciertos valores y elegir aquel valor que nos ofrezca mejores beneficios. En los párrafos siguientes se muestra un análisis para la determinación del valor mas adecuado para ciertas propiedades mecánicas del material.

2.4.1 Dureza

Como se definió en el tema 1.3.1, la dureza es la resistencia que opone un material a ser rayado, cortado o penetrado. El conocer el valor de la dureza de un material es de mucha importancia ya que el valor nos indica que tan duro o blando puede ser un material.

Esta característica es de vital importancia porque un material duro ofrece de una u otra manera resistencia a la deformación y un material blando puede permitir mejor la deformación. Ya que la dureza esta relacionada con una característica fundamental de la materia como lo es módulo de elasticidad o módulo de Young [11].

La dureza expresa la rigidez del material a esfuerzos moderados (deformaciones bajas). Sin embargo la dureza se deriva de pequeñas deformaciones de la superficie, mientras que las medidas de rigidez se derivan de mayores deformaciones [11].

Para medir la dureza de los elastómeros es utilizada la dureza Shore A, cabe mencionar que existen otras escalas Shore para medir la dureza como la Shore B, D, DO, O, OO pero que no son utilizadas para los elastómeros. En la tabla 2.4 se puede observar una tabla de las diferentes durezas shore y sus respectivas equivalencias.

Tabla 2.4 Tipos de dureza

°Shore A DIN 53505	°IRHD ASTM D 1415	°Shore D DIN 53505	°Shore O ASTM D 2240	°Shore OO ASTM D 2240
100	100	58		
95	95	46		
90	90	39		
85	85	33		
80	80	29	84	98
75	74	25	79	97
70	68	22	75	95
65	64	19	72	94
60	62	16	69	93
55	54	14	65	91
50	49	12	61	90
45	44	10	57	88
40	39	8	53	86
35	35	7	48	83
30	28	6	42	80
25			35	76
20			28	70
15			21	62
10			14	55
5			8	45
<i>Elastómeros compactos y celulares</i>	<i>Elastómeros compactos</i>	<i>Poliuretanos, PTFE rígido, Termoplásticos y Elastómeros muy duros</i>	<i>Elastómeros compactos y celulares de media densidad</i>	<i>Elastómeros celulares de media y baja densidad</i>

La lectura de dureza en los elastómeros pueden ser de 4 tipos; elastómeros blandos cuyo rango oscila entre 30 a 50, rígidos de 60 a 80, duros de 85 a 95 y los elastómeros inflexibles con un valor por arriba de 98. La dureza por debajo de 30 es en la mayoría de los casos para productos tales como borradores [71].

Para la determinación del valor de dureza o el rango de valores sobre las que debe oscilar un material para qué ofrezca mejores características de sellado se tomaron en cuentas los siguientes dos criterios.

1.- Los materiales con una dureza baja conocidos como materiales blandos fluirán más fácilmente en las ranuras e imperfecciones de las piezas de acoplamiento, pero si el material suele ser demasiado blando se puede producir un fenómeno llamado extrusión del material las cuales no son benéficas para el sellado además de poder generar una deformación más grande de la requerida [8]. En la figura 2.12 se muestra la extrusión.

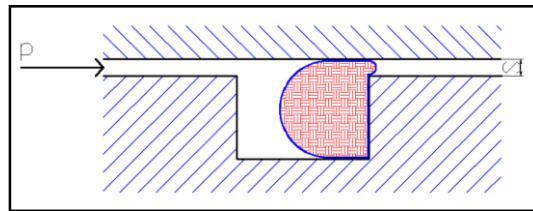


Figura 2.12 Extrusión presentada en los sellos cuando esto tiene una dureza muy baja

2.- En el caso de un material duro se tendrá una mayor resistencia a la extrusión pero esto puede ocasionar que no se adapte bien a las imperfecciones de las piezas de acoplamiento además de no permitir la deformación del material, como consecuencia no permitirá un buen sellado [8].

Por lo tanto podemos establecer que un material con una alta o baja dureza no es de lo más convenientes para usarse como sello, si revisamos párrafos anteriores podemos ver los cuatro tipos de dureza de los elastómeros de los cuales podemos descartar el rango de valores que se establecen para materiales blandos y duros, y no incluyendo a los de dureza inflexibles por tener valores por encima de los duros, quedando como única opción de dureza los del rango de valores de 60 a 80 Shore A, conocidos como rígidos. Para la mayoría de las aplicaciones, los materiales que tienen una dureza de 70 a 80 shore A son las que presentan un compromiso más adecuado para sellos.

Basándonos en los 2 criterios descritos anteriormente podemos decir que el rango de dureza donde deben oscilar los materiales para sellos es entre 60 y 80 shore A, pero para que haya un mejor sustento a esta conclusión en la siguiente figura 2.13 se muestra una grafica que relaciona la presión-ranura –dureza para una aplicación estática de un sello.

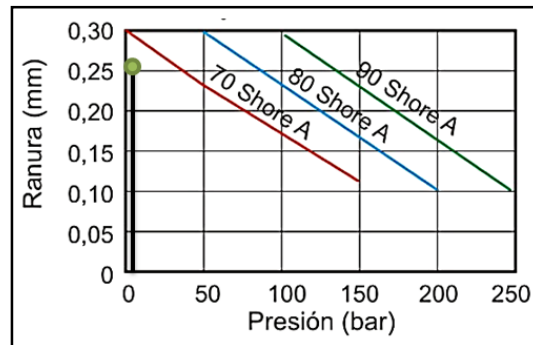


Figura 2.13 Gráfica presión-ranura- dureza para sellos

De la gráfica mostrada en la figura 2.13 podemos interpretar que la dureza más recomendada para nuestro sello es la de 70 shore A, ya que si trazamos una línea correspondiente tal y como se muestra en la imagen a la presión de trabajo del sistema y la ranura aproximada a utilizar, obtenemos que el valor de dureza mas próximo es la de 70 shore A.

La industria EPIDOR empresa dedicada a la fabricación y comercialización de sellos recomienda que para un sellado estático la dureza del material se deberá elegir de acuerdo a su presión, así como de la altura de sus tolerancias (altura de la ranura de extrusión). Estableciendo sus resultados de la siguiente manera.

Presión (bar)	Dureza del material
≤ 160	70 shore A
> 160	90 shore A

De los análisis presentados en párrafos anteriores podemos concluir que la dureza recomendada para un material a usarse como sello debe de estar en un rango de 60 a 80 shore A pero el mas recomendado es 70 shore A ya que este valor es recomendado por la industrias y además es el valor más próximo obtenido en el análisis de la gráfica de la figura 2.13.

2.4.2 Compression set

Como se sabe la compression set es una propiedad de los materiales que especifica la deformación de un material una vez que se ha eliminado la fuerza de compresión.

Cuando un material presenta un 100% de su compression set indica que el material se ha deformado por completo, 0% significa que no hubo ninguna deformación. El valor de la compresión set depende de la temperatura y del tiempo [9].

El valor de compression set más adecuado con la que debe contar un material para usarse como sello no se encuentra establecido, pero para la elección de un buen material que nos ofrezca una buena compression set se debe de considerar los siguientes requisitos.

- 1.- El material debe conservar una baja compression set a la temperatura de servicio.
- 2.- La compression set nunca debe ser de 100% una vez transcurrido largos periodos de tiempo. Ya que la tendencia de regresar a su forma original es la que permite la fuerza necesaria para el sellado entre las superficies.
- 3.- El material no debe presentar una combinación entre compression set y contracción, ya que esta combinación da lugar a fugas.

Estas tres condiciones son importantes de considerar en la elección de un material con la compression set adecuada.

2.4.3 Esfuerzo de relajación

El esfuerzo de relajación de un material se define como la pérdida de esfuerzo cuando es sometido a una deformación constante en un período de tiempo. En los sellos esta propiedad es un parámetro muy importante. La medida del esfuerzo de relajación en compresión es utilizada para evaluar la eficiencia del sellado y es expresado en % de retención de la fuerza de sellado [9].

Al igual que la compression set, el valor mas adecuado del esfuerzo de relajación de un material no se encuentra establecido pero si existen recomendaciones para elegir un buen material con buen esfuerzo de relajación.

1.- El material deberá tener un alto esfuerzo de relajación durante su tiempo de servicio.

2.- El esfuerzo de relajación nunca deberá ser de 0% una vez transcurridos largos periodos de tiempo. Ya que la retención de los esfuerzos es la que permite el sellado entre la superficies.

Si tomamos en consideración estas recomendaciones al elegir los materiales a usarse como sello se lograra el objetivo buscado que es el de tener un alto % de sellado de nuestro sistema.

Todas las características descritas en párrafos anteriores están íntimamente relacionados con la fuerza a la que es sometido la PEMFC, por lo tanto también es importante determinar el valor de la presión necesaria que permite el sellado en el sistema. Esta determinación es descrita en el punto 2.5

2.5 Determinación de torque y fuerza de sellado

Para conseguir un sellado que tenga como resultado la hermeticidad de nuestro sistema en este caso de las PEMFC se deben de considerar todas las fuerzas actuantes, para calcular el valor de torque que se deberá dar a cada perno del sistema.

Estos valores de torque son determinados a partir de conocer la presión del gas a vencer, área del sello y de la brida. A partir de estos datos se analiza el sistema y se determina las fuerzas ocasionadas por el gas actuante las cuales se deberán de contrarrestar por medio de la implementación correcta de la fuerza que resulte del análisis.

Si analizamos el sistema de la celda combustible nos podemos dar cuenta que la presión interior del gas ejerce una fuerza en contra de las paredes de la parte interna de la celda así como del sello, ocasionando la separación de pared-sello-pared y en el caso del sello sea empujado hacia los bordes de la celda, lo que ocasionaría graves problemas de sellado.

Por lo tanto el análisis del sistema implica la determinación de las fuerzas ocasionada por la presión interna del gas, así como encontrar la fuerza necesaria sobre la cual se deberá de someter el sistema para evitar estos tipos de fallos.

La presión interna del gas es el encargado de generar 3 tipos de fuerzas como son:

Fuerza radial: es originada por la presión interna y es la que tiende a expulsar a la junta.

Fuerza de separación: es también originada por la presión interna y tiende a separar las bridas.

Carga de las bridas: es la fuerza que comprime las bridas contra la junta.

Para la determinación de la fuerza así como del torque necesario en cada perno para contrarrestar dichas fuerzas se logra mediante la implementación de las siguientes fórmulas que a continuación se describen.

Para el cálculo de la F_1 que es la encargada de contrarrestar la fuerza de separación así como la carga de las bridas se logra mediante la implementación de la formula 1 en donde se involucra la presión del gas a vencer así como el área de la brida en donde para el cálculo de este valor se tomara la distancia existente entre el punto medio de un extremo del sello al punto medio del otro. Tal y como se muestra en la figura 2.14, además de otros factores a considerar, como es el área del sello, se debe tomar en cuenta un factor de empaque que es el que da una mayor seguridad al cálculo. De tal manera que la formula queda establecida de la siguiente manera:

$$F_1 = P_g(A_b + A_s m_s) \dots\dots\dots (1)$$

Donde

- P_g = Presión del gas
- A_b = Área de la brida
- A_s = Área del sello
- m_s = Factor de empaque

El valor de la m_s viene dado en la tabla 2.5 establecido por el código ASME

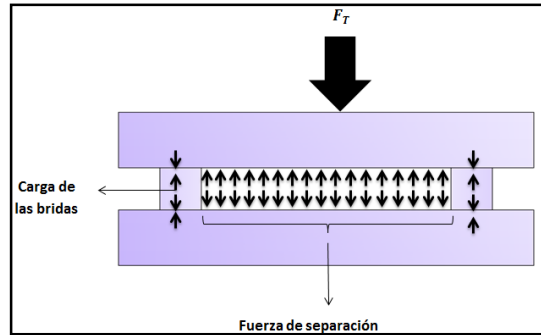


Figura 2.14 Representación de las fuerzas producidas por la presión interna del gas

Para la determinación de la F_2 que es la encargada de contrarrestar la fuerza radial (ver figura 2.15), el único factor importante a considerar es el área de la pared interna del sello. De tal manera que la formula queda establecida de la siguiente manera.

$$F_2 = P_g(A_{bi}) \dots\dots\dots (2)$$

Donde

A_{bi} = Área del borde interno del sello

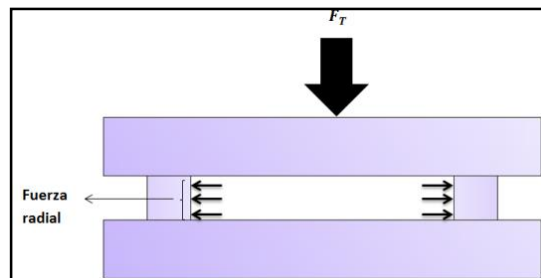


Figura 2.15 Representación de la fuerza radial producida por la presión interna del gas

El valor de la fuerza total necesaria en el sistema esta dado por la formula 3. En esta formula no se incluye la fuerza 2 porque su valor es tan pequeño comparado con la fuerza 1 que se desprecia. Por lo tanto la fuerza total necesaria que permite un sellado hermético del sistema queda establecida de la siguiente manera:

$$F_T = P_g (A_b + A_s m_s) \dots\dots\dots (3)$$

Con la fórmula 3 se logra obtener la fuerza total requerida en el sistema para permitir el sellado. A partir del valor que se obtenga en la formula 4 podemos conocer la fuerza se debe aplicar a cada uno de los pernos del sistema siempre y cuando se conozca la cantidad de pernos que se pretende usar.

En la siguiente fórmula que se establece como la numero 4 se presenta como calcular la fuerza por perno.

$$F_p = \frac{F_T}{N_p} \dots\dots\dots (4)$$

Donde

F_T = Fuerza total

F_P = Fuerza por perno

N_P = Número de pernos

La aplicación de la fuerza por perno en el sistema se logra mediante un torque, pero para la determinación de este valor se deben de considerar otros puntos importantes como son el diámetro nominal del perno así como el coeficiente de fricción del sistema.

El coeficiente de fricción es un valor que se nos indica si el perno a utilizar se encuentra lubricado o no, para el cual se establece los siguientes valores.

Condición del perno	Valor de coeficiente de fricción
Lubricado	0.15
Sin lubricación	0.20

De tal manera que la fórmula queda establecida de la siguiente manera:

$$T = KF_p D \dots\dots\dots (5)$$

Donde

K = Coeficiente de fricción

D = Diámetro nominal

De esta forma queda establecido las formulas para determinar la fuerza y el torque necesario que se deben de usar para permitir un sellado perfecto. La determinación de estos valores pueden ser calculados de manera rápida utilizando la hoja de cálculo de Excel que se diseño para el calculo de estos valores. Esta hoja va anexa a este trabajo para su uso.

Estos cálculos fueron llevados acabo para determinar la fuerza y el torque necesario para una PEMFC de dimensiones reales las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Datos	Sistema internacional	Sistema ingles
Presión del gas	6.894 N/cm ²	10 lb/in ²
Área de la brida	69.44 cm ²	10.763 in ²
Área sello	5.524 cm ²	0.856 in ²
Diámetro nominal de paso	0.46 cm	0.1811 in
Numero de pernos	10	10

Los cálculos fueron llevados acabo en la hoja de cálculo de Excel como se observa en la figura 2.16 obteniendo los siguientes resultados

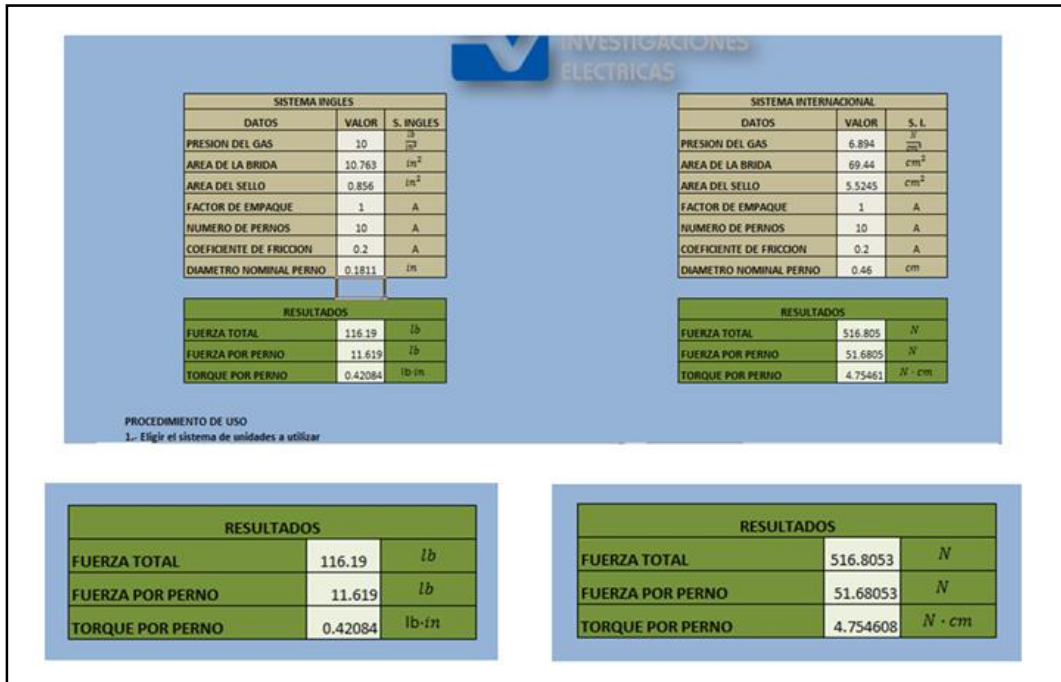


Figura 2.16 Resultados obtenidos del cálculo de torque

Los resultados obtenidos en los cálculos anteriores demuestran que no se necesita de un torque muy grande para sellar al sistema ya que los valores obtenidos son de un torque bastante bajo (0.42804 lb-in o 4.7546 N-cm).

En la realidad este sistema es sometido aun torque de 5 lb-in que es un valor bastante elevado al obtenido por los cálculos. Esta variación de torque se presenta debido a muchos factores con los cuales se puede dar explicación a este cuestionamiento.

Si en el sistema se aplicara el torque obtenido en los cálculos este si sellaría impidiendo el escape de los gases, por lo tanto al momento de someter el sistema al torque de 5 lb-in desde un torque de 0.428 lb-in el sistema ha sellado por completo impidiendo el escapa de gases. Pero -¿Que pasa con el otro porcentaje de torque?- La cantidad de torque extra por así decirlo al que se somete el sistema sirve para deformar al sello y llevarlo a la deformación requerida para permitir una de las tantas funciones del sello que es la de permitir el buen contacto eléctrico.

Sin este torque extra no se lograría las expectativas buscadas, porque si sometieramos nuestro sistema al torque obtenido en los cálculos si obtendríamos unos de los objetivos (el sellado), pero dejaríamos de cumplir con otras características también requeridas, por lo tanto tendríamos que adaptarnos a las condiciones que mas nos convengan en este caso someter nuestro sistema a un torque mas elevado al adecuado pero esto se hace con el fin de tener los mejores beneficios, ya que llevar el torque hasta el valor de 5lb-in hasta el momento no ha presentado ningún problema.

Tabla 2.5 Factores de empaque para diferentes materiales

GASKET MATERIALS AND CONTACT FACINGS ¹				
Gasket Factors <i>m</i> for Operating Conditions and Minimum Design Seating Stress <i>y</i>				
Gasket Material	Gasket Factor <i>m</i>	Min. Design Seating Stress <i>y</i> , psi (MPa)	Sketches	Facing Sketch and Column In Table 2-5.2
Self-energizing types (O rings, metallic, elastomer, other gasket types considered as self-sealing)	0	0 (0)
Elastomers without fabric or high percent of mineral fiber: Below 75A Shore Durometer	0.50	0 (0)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
75A or higher Shore Durometer	1.00	200 (1.4)		
Mineral fiber with suitable binder for operating conditions: 3/8 in. (3.2 mm) thick	2.00	1,600 (11)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
1/4 in. (1.6 mm) thick	2.75	3,700 (26)		
1/2 in. (0.8 mm) thick	3.50	6,500 (45)		
Elastomers with cotton fabric insertion	1.25	400 (2.8)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Elastomers with mineral fiber fabric insertion (with or without wire reinforcement):				
3-ply	2.25	2,200 (15)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
2-ply	2.50	2,900 (20)		
1-ply	2.75	3,700 (26)		
Vegetable fiber	1.75	1,100 (7.6)		(1a),(1b),(1c),(1d), (4),(5); Column II
Spiral-wound metal, mineral fiber filled: Carbon	2.50	10,000 (69)		(1a),(1b); Column II
Stainless, Monel, and nickel-base alloys	3.00	10,000 (69)		
Corrugated metal, mineral fiber inserted, or corrugated metal, jacketed mineral fiber filled: Soft aluminum	2.50	2,900 (20)		(1a),(1b); Column II
Soft copper or brass	2.75	3,700 (26)		
Iron or soft steel	3.00	4,500 (31)		
Monel or 4%–6% chrome	3.25	5,500 (38)		
Stainless steels and nickel-base alloys	3.50	6,500 (45)		

2.6 Propuestas de nuevos materiales

La consulta de patentes, artículos y sitios web seleccionados para la realización de este trabajo, permitió conocer los materiales que se usan en la actualidad como sellos, los cuales fueron enmarcados en la tabla 2.1, en él se presentan los materiales mas recomendados así como una recopilación de sus propiedades mas sobresalientes. Dichas propiedades son recomendadas por empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de sellos, los cuales han llevado a estos materiales a pruebas de laboratorio para conocer más a fondo su comportamiento, y los resultados obtenidos son mostrados en reportes técnicos.

A partir de los datos presentados en la tabla 2.1 se seleccionaron aquellos materiales que ofrecen las mejores características y que se encuentran entre las requeridas para usarse como sello para una PEMFC, de entre las cuales podemos hacer mención de 3 materiales como son el viton, neopreno y el nitrilo que por ofrecer un conjunto equilibrado de propiedades son los mejores candidatos a usarse como sellos en las PEMFC.

En el siguiente tema se presentan una descripción de cada material, resaltando sus características y especificaciones, así como sus ventajas y desventajas para conocerlos más a fondo.

2.6.1 Características y especificaciones de nuevos materiales

2.6.1.1 Viton

Viton es el nombre que la casa Du Pont –Dow designa a un elastómero fluorado (copolimero de fluoruro y hexafluoruropropileno) que ha tomado mayor importancia en la industria de los sellos. Debido a su amplia gama de compatibilidad química, intervalo de temperatura, baja compresión, y excelentes características de envejecimiento, es considerado como el elastómero más significativo desarrollado en la historia reciente [60].

Según la norma ASTM 1418 el viton tiene la siguiente denominación FKM

También puede tomar diferentes nombres comerciales como los que se mencionan a continuación

- Viton (DuPont)
- DAI-EL (Daikin Industries)
- Dyneon, previously Fluorel (Dyneon)
- Tecnoflon (Solvay Solexis)

A continuación se presentan las características más sobresalientes del viton

➤ **Temperatura**

Temperatura de trabajo	-26°C a 204°C
Temperatura de rigidez	-10°C a -25°C

➤ **Resistencia eléctrica**

Ohm-cm	$10^{10} - 10^{14}$
---------------	---------------------------------------

➤ **Permeabilidad de los gases**

Hidrogeno $\frac{cm^2}{seg}$	a 93°C – 168×10^{-8}
--	---

➤ **Resistencia química**

Aceites animales y vegetales	Excelente
Ácidos concentrados	Excelente
Ácidos diluidos	Excelente
Calor	Excelente
Frio	Excelente
Gas natural	Muy buena
Hidrocarburos alifáticos	Excelente
Hidrocarburos aromáticos	Excelente
Hidrógeno	Excelente
Llama	Excelente
Nitrógeno	Excelente
Oxidación	Excelente
Oxígeno	Excelente
Ozono	Excelente

➤ Propiedades mecánicas

Dureza	70 shore A
Compression set	22h a 200°C – 20%
Elasticidad	165%
Resistencia a la tracción	11Mpa
Esfuerzo de relajación	1000h a 150°C – 80% 10000h a 150°C – 70%
Resiliencia	Buena
Resistencia al impacto	Buena
Adhesión a metales	Buena
Resistencia a la flexión	Regular
Resistencia a la abrasión	Buena
Envejecimiento	100°C – Excelente

Ventajas

- Son auto extingüible y tienen una excelente resistencia al ozono y a la intemperie.
- Mayor resistencia a una gama más amplia de productos químicos que cualquier otro elastómero
- Resistencia de primera clase al calor y a los fluidos. Es lo más cercano a un elastómero universal para uso de O-rings
- Resistencia intermitentemente hasta la temperatura de 300°C
- Una vida más larga de los sellos en servicio
- Una prolongación de vida del equipo
- Un mantenimiento reducido
- Una mayor versatilidad del equipo que lo usa
- Una operatividad más segura
- Una reducción de los costos de garantía
- Una calidad, seguridad e imagen del producto mejoradas
- Excelente resistencia a la deformación permanente por compresión
- Capacidad de sellado dinámico
- Baja Permeabilidad de los gases
- Buena resistencia a la radiación
- Poco cambio en la dureza a temperaturas elevadas
- Estabilidad del color para conveniencias de codificación
- Debido a sus propiedades eléctricas hace que éste sea utilizado como revestimiento aislador para bajo voltaje.

- Dadas sus amplias características hace que su aplicación sea necesaria en todos los casos en que se requieren óptimas condiciones de rendimiento.

Desventajas

- Poca flexibilidad a baja temperatura
- Débil resistencia a esteres y cetonas

2.6.1.2 Neopreno

Neopreno es un es un homopolímero de Clorobutadieno, o Cloropreno. El neopreno, conocido originalmente como dupreno, fue la primera goma sintética producida a escala industrial. Se usa en una gran cantidad de entornos, como trajes húmedos de submarinismo, aislamiento eléctrico y correas para ventiladores de automóviles. Su inercia química lo hace útil en aplicaciones como sellos (o juntas) y mangueras, así como en recubrimientos resistentes a la corrosión [63]. Estos usos se deben a las buenas propiedades tanto mecánicas como físicas que hacen del Neopreno un buen material.

Según la norma ASTM 1418 el neopreno tiene la siguiente denominación CR

A continuación se presentan las características más sobresalientes del Neopreno

➤ Temperatura

Temperatura de trabajo	-30°C a 135°C
Temperatura de rigidez	-10°C a -45°C

➤ Resistencia eléctrica

Ohm-cm	$10^2 - 10^{12}$
--------	------------------

➤ Permeabilidad de los gases

Hidrógeno $\frac{cm^2}{seg}$	$a 38^\circ C - 180 \times 10^{-8}$
------------------------------	-------------------------------------

➤ **Resistencia química**

Aceites vegetales y animales	Buena
Ácidos concentrados	Muy buena
Ácidos diluidos	Excelente
Calor	Buena
Frio	Buena
Gas natural	Excelente
Hidrocarburos alifáticos	Regular
Hidrocarburos aromáticos	Regular
Hidrógeno	Excelente
Llama	Buena
Nitrógeno	Excelente
Oxidación	Muy buena
Oxígeno	Excelente
Ozono	Buena

➤ **Propiedades mecánicas**

Dureza	70 shore A
Compression set	24h a 70°C – 18%
Elasticidad	300%
Resistencia a la tracción	11Mpa
Esfuerzo de relajación	No disponible
Resiliencia	Excelente
Resistencia al impacto	Buena
Adhesión a metales	Excelente
Resistencia a la flexión	Buena
Resistencia a la abrasión	Buena
Envejecimiento	Buena

Ventajas

- Auto extingible. No propaga la llama
- Buena adhesión al metal
- Ofrece el conjunto mas equilibrado de las propiedades deseables
- Resistente al agrietamiento por flexión

Desventajas

- Moderada resistencia al agua

2.6.1.3 Nitrilo

Generalmente conocida como Buna-N o caucho nitrílico son copolímeros de butadieno y acrilonitrilo. Es un elastómero muy utilizado por su bajo costo, es un material utilizado para el sellado de alimentos y bebidas [72]. Al igual que el Viton y Neopreno poseen ciertas propiedades que la diferencian de las otras.

Según la norma ASTM 1418 el nitrilo tiene la siguiente denominación NBR, XNBR

También puede tomar diferentes nombres comerciales como los que se mencionan a continuación

- Krynac (Polysar Internacional, EE.UU.)
- Nipol (Zeon Chemicals, LP)
- Nysyn (Copolimero de goma y Chemical Corp)
- Paracril (Uniroyal, Inc.)

A continuación se presentan las características más sobresalientes del viton

➤ Temperatura

Temperatura de trabajo	-48°C a 107°C
Temperatura de rigidez	-10°C a 45°C

➤ Resistencia eléctrica

Ohm-cm	$10^4 - 10^{10}$
--------	------------------

➤ Permeabilidad de los gases

Hidrogeno $\frac{cm^2}{seg}$	$a 38^\circ C - 10.3 a 32.1 \times 10^{-8}$
	$a 79^\circ C - 47 a 125 \times 10^{-8}$
	$a 121^\circ C - 98.8 a 330 \times 10^{-8}$

➤ **Resistencia química**

Aceites vegetales y animales	Buena
Ácidos concentrados	Buena
Ácidos diluidos	Buena
Calor	Buena
Frio	Regular
Gas natural	Excelente
Hidrocarburos alifáticos	Excelente
Hidrocarburos aromáticos	Buena
Hidrógeno	Excelente
Llama	Mala
Nitrógeno	Excelente
Oxidación	Buena
Oxígeno	Buena
Ozono	Mala

➤ **Propiedades mecánicas**

Dureza	60 Shore A
Compression set	22h a 100°C - 15%
Elasticidad	350%
Resistencia a la tracción	15MPa
Esfuerzo de relajación	100h a 150°C – 30%
Resiliencia	Buena
Resistencia al impacto	Regular
Adhesión a metales	Excelente
Resistencia a la flexión	No disponible
Resistencia a la abrasión	No disponible
Envejecimiento	No disponible

Ventajas

- Endurecimiento por compresión
- Resistencia a la abrasión
- Aplicaciones a baja temperaturas
- Buena adhesividad al acero
- Es de muy bajo costo
- Puede ser utilizado en la industria alimenticia

Desventajas

- Resistencia moderada al calor
- Moderado envejecimiento
- Disminuye su resiliencia y flexibilidad en la baja temperatura

2.7 Selección de material para prueba de sellabilidad

En el tema 2.6 de este trabajo se presentaron 3 tipos de materiales que por sus buenas características sobresalen de los demás y son los mejores candidatos a ser utilizados como sellos de una PEMFC. Ya que de acuerdo a la información con que se cuenta estos poseen las características requeridas.

De los 3 materiales seleccionados se debe elegir el mejor para que sea llevado a pruebas de sellabilidad para comprobar si realmente es el más conveniente o en caso contrario se hagan nuevas pruebas con otros materiales. El material candidato a sello además de cumplir con los requisitos establecidos en el tema 1.2.2, debe de ser un material que deberá resistir a las condiciones de trabajo de una celda de combustible.

La celda de combustible desarrolladas en el departamento de energías no convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), está diseñada para un tiempo de trabajo de 5000 horas y una temperatura máxima de 100°C. Por lo tanto el material a seleccionar deberá ser muy versátil y resistente bajo estas condiciones de trabajo.

La selección del mejor material se basa en el análisis de las gráficas que serán mostrados mas adelante, en ellos se podrá observar el comportamiento de los materiales bajo condiciones tanto de tiempo y temperatura.

En los resultados de la pruebas reportadas por el control de la calidad en la industria del caucho se presenta la gráfica (figura 2.17) obtenida de las pruebas realizadas a diferentes materiales, en donde se presenta el porcentaje de retención de la fuerza de sellado (relacionado con el esfuerzo de relajación) a una temperatura de 150°C y a diferente horas de servicio.

En la grafica se puede observar que el material que presenta una mayor retención de la fuerza de sellado muy por el encima de la silicona (material utilizado actualmente) es el viton ya que con el transcurrir del tiempo presenta cambios muy pequeño en su porcentaje de retención de la fuerza de sellado, además de que la evaluación fue realizada 50°C por encima de la temperatura de trabajo real esto nos indica que el valor del porcentaje de retención de la fuerza puede ser aun mayor si se evalúa a la temperatura de 100°C .

En la misma gráfica también se presenta otra línea que describe el comportamiento del viton para a una temperatura de 200°C, a pesar de presentar un porcentaje de retención de la fuerza mas pequeña sigue siendo mayor que el presentado por el material que le sigue en este caso la silicona. En la gráfica también se puede observar al nitrilo pero con un valor de retención mucho muy poder debajo del viton.

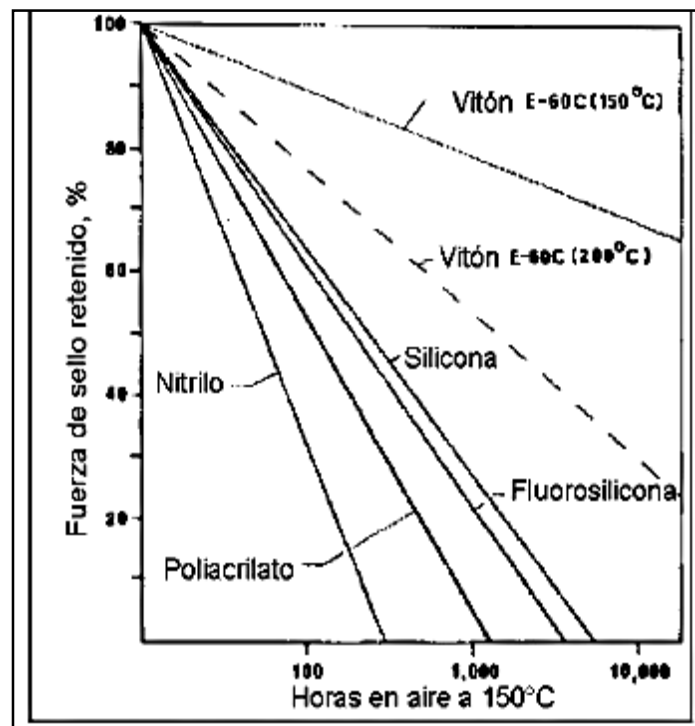


Figura 2.17 Gráfica que representa el porcentaje de retención de la fuerza de sellado de diferentes materiales

La misma prueba fue realizada por DuPont Dow elastomers bajo las mismas condiciones de temperatura y de los cuales se logro obtener la gráfica mostrada en la figura 2.18.

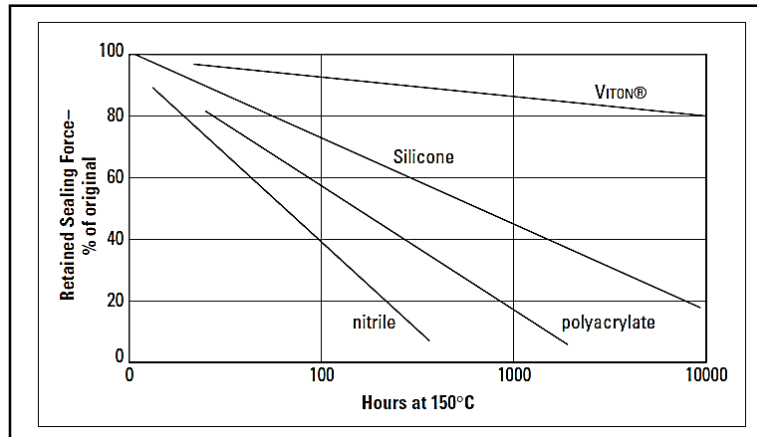


Figura 2.18 Gráfica de porcentajes de retención de diferentes materiales

De las pruebas realizadas por DuPont Dow se obtiene un resultado similar a los realizados por la industria del caucho estableciendo que el viton es el mejor material de los 3 seleccionados.

La empresa R.L. Hudson and Company realizó una prueba para determinar el compression set de ciertos elastómeros tal y como se muestra en la figura 2.19. En él se puede observar como el viton (fluorocarbon) presenta un valor de compression set muy estable oscilando entre un rango del 10% al 15%, este rango se mantiene hasta una temperatura aproximado de 200°C. En el caso del Nitrilo inicia con un valor muy por debajo al del viton pero conforme se aumente la temperatura este tiende a dispararse hasta un porcentaje del aproximadamente 60%. Por lo tanto el viton sigue siendo aun superior a los otros dos candidatos para sellos.

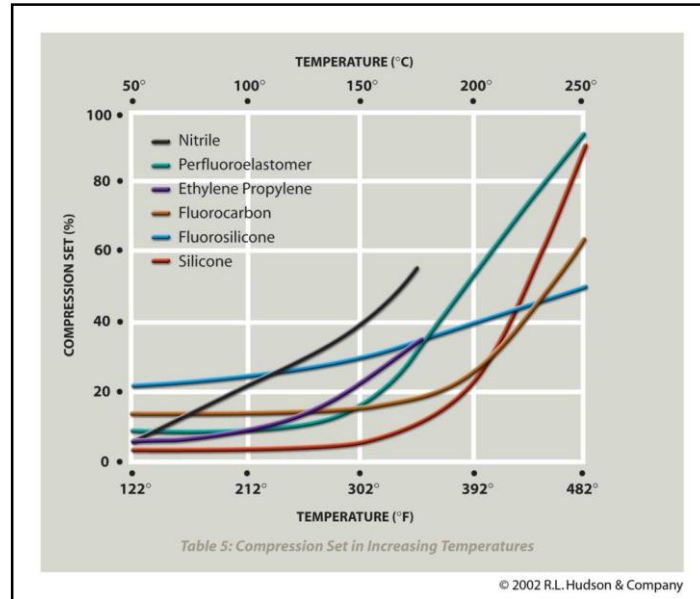


Figura 2.19 Grafica compression set- temperatura para diferentes elastómeros

La empresa Parker dedicada a la fabricación y comercialización de sellos realizó una prueba de resistencia eléctrica de diferentes elastómeros de los cuales obtuvo los siguientes resultados (figura 2.20).

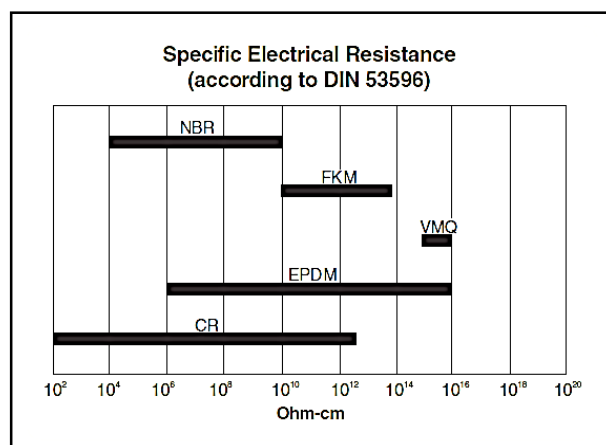


Figura 2.20 Resistencias eléctricas de diferentes elastómeros

En la figura 2.20 se puede observar como el Viton (FKM) presenta una mayor resistencia eléctrica que el neopreno (CR) y el nitrilo. La empresa Parker establece que materiales como el viton y el VQM son materiales aislantes y materiales como el nitrilo y el neopreno presentan tendencias a ser semiconductores [8].

Las condiciones descritas en párrafos anteriores fueron enunciados de acuerdo a su importancia ya que las pruebas de porcentaje de retención de sellado es el mas importante porque relaciona la temperatura, tiempo de servicio y sellabilidad.

Desde el primer análisis se pudo haber elegido al Viton como material para una PEMFC pero era necesario de otros análisis como compression set y resistencia eléctrica para tener un sustento aun más grande. Por lo tanto concluimos que el mejor material de los 3 candidatos para sello de una PEMFC es el viton.

En los siguientes párrafos se presenta otras pruebas de horas de servicio, realizados exclusivamente al viton en los cuales se confirma porque fue elegido como el mejor candidato.

La empresa Argensold presento un informe en donde fue evaluado el material viton para conocer la resistencia que este tiene a diferentes grados de temperatura. La tabla 2.6 presenta las horas de servicio que el viton ofrece a ciertas temperaturas. Si analizamos los datos mostrados podemos darnos cuenta de que el viton a la temperatura de 205°C que es la temperatura mas baja presentada, ofrece un tiempo de horas de servicio indefinidos, por lo tanto si el tiempo de trabajo establecido es de 5000 horas a una temperatura de 100°C y estableciendo que los resultados aquí mostrados son correctos podemos concluir que realmente estaría cumpliendo ambos requisitos.

Tabla 2.6 Resultados de las pruebas obtenidas por Argensold

Temperatura de ensayo	Horas de servicio
204°C	Indefinidas
232°C	>3000
260°C	>1000
287°C	>240
315°C	>48

De igual manera la empresa DuPont Dow elastomers realizo una evaluación del material viton a diferentes temperaturas para conocer su rendimiento representados en horas de servicio. Los resultados obtenidos en dicha prueba son mostrados en la figura 2.21. Al igual que la prueba realizada por Argensold los resultados demuestran que el viton tiene una larga duración y estableciendo que la empresa DuPont Dow es la empresa creadora de este material podemos establecer que los resultados son correctos.

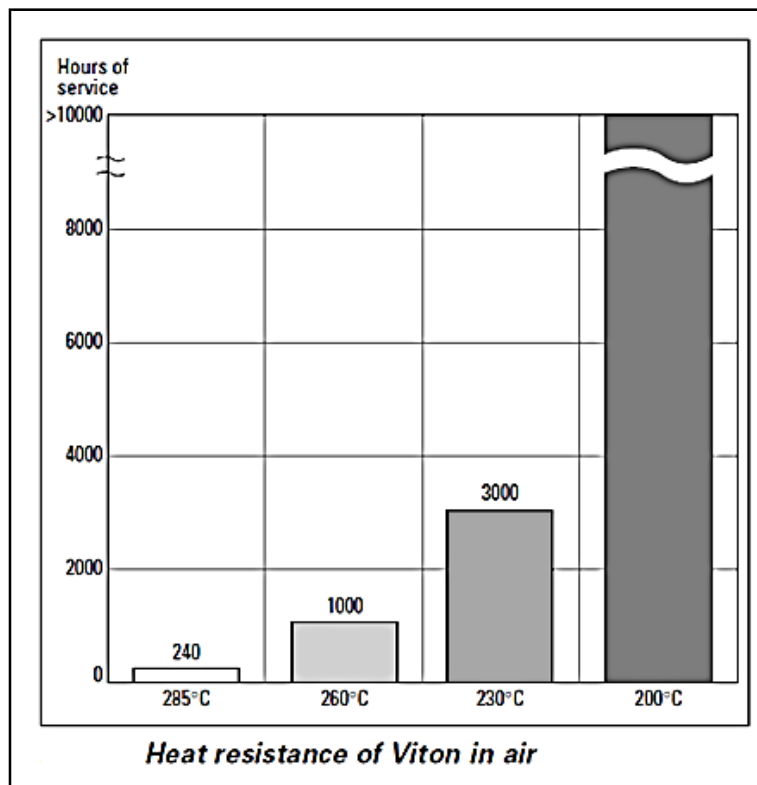


Figura 2.21 Resultados obtenidos de las pruebas de horas de servicio realizadas al viton

3. Prueba de sellabilidad de material comercial seleccionado

El proceso de prueba de sellabilidad consiste en someter bajo ciertas condiciones el material seleccionado, para conocer su comportamiento así como su rendimiento, y a partir del análisis de los resultados obtenidos poder determinar si es aplicable su uso o no.

En este apartado se presenta el proceso que se siguió para llevar a cabo la prueba del material seleccionado "Viton". No sin antes describir las características sobre las cuales el material fue probado. Entre las consideraciones que se tomaron en cuenta podemos hacer mención de las siguientes.

3.1 Diseño del material a probar

Los sellos pueden ser de dos formas en Gasket o en O-Ring.

Los gasket o juntas es un tipo de sello, se define como un material deformable sujeto entre caras esencialmente estacionarias para impedir el paso de líquidos o gases a través de una abertura. Los gasket están comúnmente producidos por corte de materiales en forma de lámina.

Los O-Ring o juntas tóricas son piezas en forma de anillo o aro, de sección circular. Se utilizan para prevenir la pérdida de líquidos y gases. El sellado se produce por efecto de la restricción del O-Ring dentro de un alojamiento, al deformarse dentro de esa cavidad, ocupa los espacios libres y, de esta forma, bloquea las posibles filtraciones [65].

De los tipos de diseños se eligió al O-Ring ya que comparada con los Gaskets presenta mejor las siguientes características.

- No necesitan ajustes
- Son livianos
- Ocupan poco espacio
- Pueden emplearse tanto para uso estático como dinámico.

Para la prueba se utilizó un O-Ring comercial de viton con las características mostradas en la figura 3.1, que son las que se requieren para el uso de una celda de combustible.



Figura 3.1 Dimensiones del O-Ring utilizado

3.2 Diseño del dispositivo de pruebas

El dispositivo usado para las pruebas consistió en dos placas de aluminio con las características tal y como se muestra en la figura 3.2 para el de 2 paredes y la figura 3.3 para la de tres paredes. Este dispositivo fue manufacturado en el laboratorio de celdas de combustible.

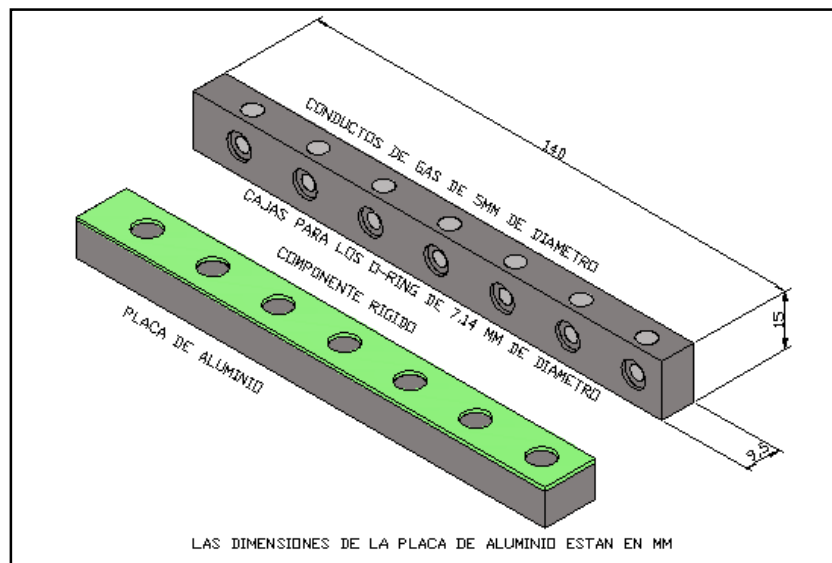


Figura 3.2 Representación del dispositivo de 2 paredes usado para las pruebas de sellabilidad.

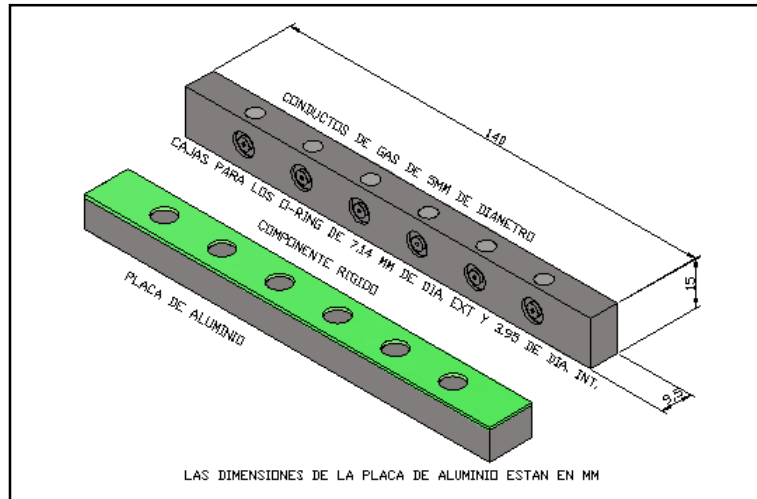


Figura 3.3 Representación del dispositivo de 3 paredes usado para las pruebas de sellabilidad.

La profundidad de los alojamientos del O-Ring fue determinada a partir de datos conocidos como el espesor de la CL y DL. La determinación de la profundidad se baso en las siguientes consideraciones:

- 1.- Según lo establecido en el funcionamiento de las PEMFC los componentes porosos (CL y DL), deben de deformarse el 20% de la suma de sus espesores. Este valor es considerado el óptimo para que la PEMFC tenga un excelente rendimiento, sin presentar problema alguno. Además de estar avalado por años de investigación por parte del grupo de celdas de combustible del departamento de energías no convencionales de Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- 2.- El uso de un refuerzo para la membrana.
- 3.- El espesor de O-Ring a utilizar.
- 4.- El uso de un componente rígido de mylar que sirve como tope durante la deformación de los componentes porosos y la deformación del O-Ring.

A partir de las consideraciones mencionadas se realizaron los cálculos por medio de las formulas 3.1 y 3.2. Los datos y los resultados se muestran en la tabla 3.1

$$C = W - \left(\frac{Ed \cdot 100}{100 - \%deformacion} \right) \dots\dots\dots 3.1$$

$$Ed = (W - C) \left(\frac{100 - \%deformacion}{100} \right) \dots\dots\dots 3.2$$

Tabla 3.1 Datos para calculo de caja

Carga de Pt (mg/cm²)	0.5
Espesor difusor (mm)	0.33
Espesor refuerzo membrana (mm)	0.06
Espesor difusor (mm)	0.04755
% de deformación componentes porosos	20
Espesor CL+DL con deformación	0.30204
Espesor componente rígido (mm)	0.24204
W, Espesor O-Ring (mm)	1.778
% deformación O-Ring	20
Ed, Espesor parte externe del O-Ring (mm)	0.24204
C, caja para O-Ring (mm)	1.47545

La determinación del espesor del componente rígido consiste en sumar el espesor de la CL y DL para después restarle el 20% de la suma obtenida y al resultado restar el valor del espesor del refuerzo de la membrana.

La profundidad de la caja fue determinada con la formula 3.1 este valor se tomo como punto de partida para la determinación de las demás profundidades de las cajas. Los demás valores fueron determinados mediante un incremento de % de la parte externa del O-Ring con la que se inicio el cálculo.

En la tabla 3.2 se presenta los porcentajes incrementados para la parte externa del O-Ring así como los cambios en la profundidad de las cajas.

Tabla 3.2 Valores de profundidad de caja

% adicional	Parte externa O-Ring (mm)	C, caja (mm)	% deformación respecto a tamaño total del O-Ring
0	0.3026	1.475	3.4
10	0.3328	1.445	5.1
20	0.3631	1.415	6.8
30	0.3933	1.385	8.5
40	0.4236	1.354	10.2
50	0.4538	1.324	11.9
60	0.4841	1.294	13.6

Los valores mencionados en la tabla 3,2 son los reales, pero durante la manufactura de las cajas en las placas de aluminio los valores sufrieron pequeñas variaciones debido al proceso de manufactura quedando establecidos de la siguiente manera.

Placa 1	
Numero de orificio	C, caja (mm)
1	1.46
2	1.44
3	1.42
4	1.38
5	1.35
6	1.29
7	1.24

Placa 2	
Numero de orificio	C, caja (mm)
1	1.47
2	1.44
3	1.42
4	1.39
5	1.36
6	1.33

3.3 Diseño de la caja de O-Ring

Para la prueba se tomaron en cuenta dos tipos de cajas una que consiste de 2 paredes (figura 3.4) y otra de 3 (figura 3.5). Esto se hizo de esta manera para conocer cual de las dos es la más conveniente para que sea implementado.

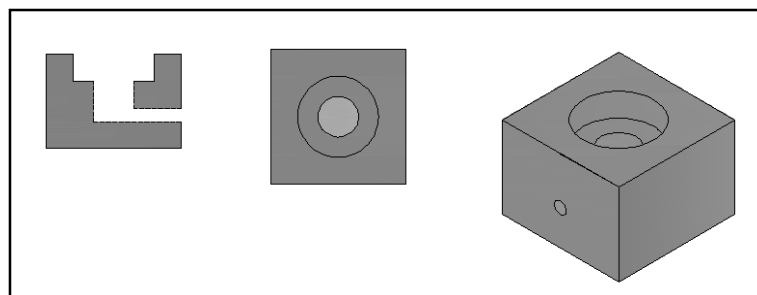


Figura 3.4 Diferente vistas de la caja de 2 paredes

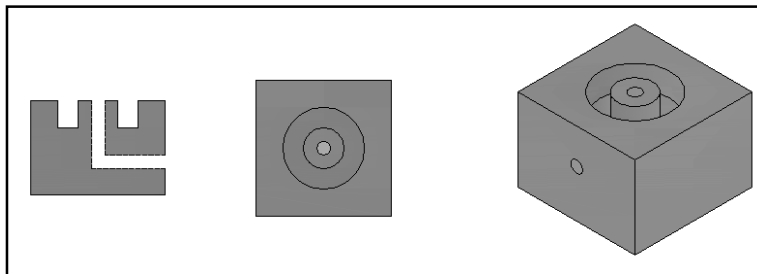


Figura 3.5 Diferentes vistas de la caja de 3 paredes

3.4 Proceso de prueba

Una vez conociendo todas las consideraciones se llevo acabo la prueba bajo el siguiente proceso:

- 1.- Se limpió las placas de la prensa para evitar la existencia de suciedad o la presencia de pequeñas partículas que afecte el proceso de las pruebas.
- 2.- Se verificó que existiera paralelismo entre las placas de la prensa donde se realizara la prueba, esto se hace con el fin de evitar que se comprima más en un lado que en otro.
- 2.- Se limpió las placas de pruebas para evitar la existencia de rebabas por la manufactura en las cajas o en los ductos de gas.
- 3.- Se colocaron los conectores de gas en sus respectivos orificios dando un apriete con la mano hasta un tope, para luego apretarlo con una llave 5/16 un 1/8 de vuelta. Estas medidas aseguran la función correcta.
- 4.- Se insertaron los sellos en sus respectivos orificios una vez que estos estaban completamente limpios y evitando que se ensuciaran durante su manejo.
- 5.- Se verificó si existía fugas en el sistema de alimentación del gas, esto se hizo antes de cada prueba (la fuga se verifico mediante la variación de la presión a través del tiempo esto se logro mediante el uso de un manómetro).
- 6.- Las pruebas se realizaron utilizando como gas al nitrógeno a una presión de 10 psi durante un tiempo de 10 minutos para los diferentes tipos de medida de las cajas.
- 7.- Una vez terminado la prueba los resultados fueron vaciados en una tabla que se presentan en el siguiente tema.

4. Resultados

Para la prueba realizada en los O-Ring de la placa 1 (2 paredes) la fuga en el sistema fue de 0.125 psi y los resultados son mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de la prueba en la placa 1.

No. de caja	Presión inicial (psi)	Presión final (psi)			ΔP (psi)		
		1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba
1	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----
2	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----
3	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----
4	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----
5	10	9.875	-----	-----	0.125	0.125	0.125
6	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----
7	10	9.937	-----	-----	0.063	-----	-----

Para la prueba de la placa 2 (3 paredes) la fuga en el sistema fue de 0.0625 psi y los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Resultados de la prueba en la placa 2.

No. de caja	Presión inicial (psi)	Presión final (psi)			ΔP (psi)		
		1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba	1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba
1	10	9.687	-----	-----	0.313	0.25	0.187
2	10	9.813	-----	-----	0.187	0.187	-----
3	10	9.125	-----	-----	0.875	0.187	-----
4	10	9.937	-----	-----	0.063	0.187	-----
5	10	9.812	-----	-----	0.188	0.187	-----
6	10	9.937	-----	-----	0.063	0.187	-----

De los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la placa 1 y 2 podemos concluir de la siguiente manera.

Placa 1

Para la placa 1 las fugas en todas las cajas a excepción de la caja 5 fue de 0.063 psi y en la caja 5 el valor de la fuga fue de 0.125 psi. Como se observa en la tabla 3.3, la prueba para la caja 5 se realizó 3 veces obteniendo el mismo resultado, a pesar de haber apretado más al conector de gas para la segunda prueba y cambiar al conector para la prueba 3. Esto nos llevo a concluir que la causa es ajena a cualquiera de las ya mencionadas.

Por lo que podemos decir que entre una de las posibles causas pudo haber sido el maquinado del dispositivo de ensayo, que provoco pequeñas protuberancias en el fondo de la caja que impidió el acoplamiento O-Ring – superficie.

Placa 2

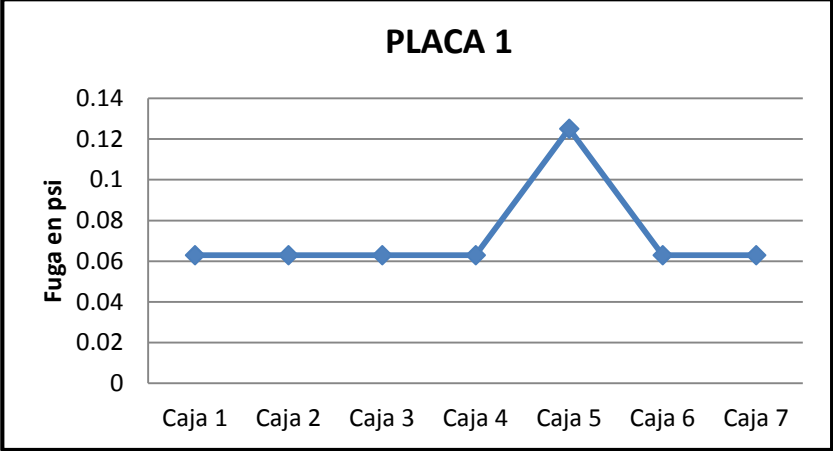
Para la placa 2 en la primera prueba se obtuvieron resultados muy variados por lo que si era ilógico ese comportamiento, porque la variación de fuga de una caja a otra era de sube y baja y no de forma ascendente ni descendente como debería de ser, por lo que se volvieron a realizar las pruebas, pero antes la placa fue lavada nuevamente y secado con aire comprimido para evitar la presencia de agua. Este se hizo con el fin de saber si la suciedad pudo haber sido una de las causantes de este problema.

Para la segunda prueba los valores cambiaron y todas las cajas a excepción de la caja 1 presentaron el mismo valor de fuga de 0.187 psi y la caja 1 dio un valor de 0.25 psi, por lo que se volvió a realizar la prueba dando como resultado un valor de 0.187 e igual a las demás obtenidas en pruebas anteriores.

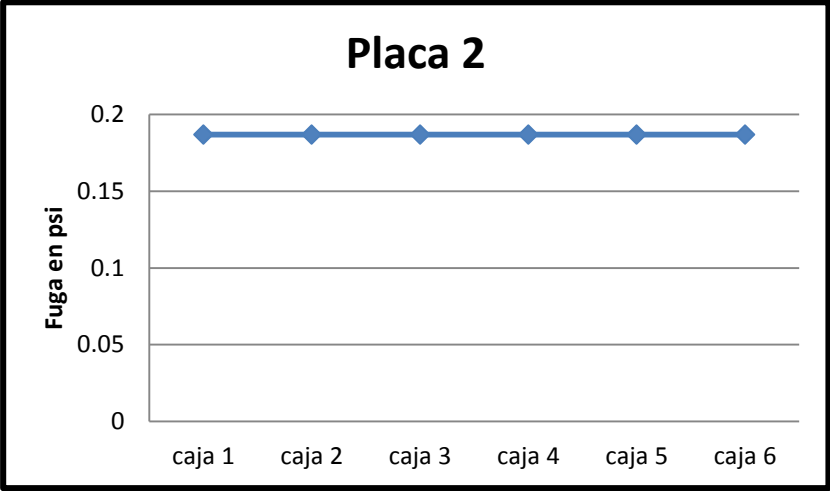
Comparando resultados de ambas placas se determina que la placa 1 presento un mejor sellado que la placa 2, a pesar de que ambas permiten un buen sellado el valor de la fuga de la placa 1 fue menor al de la placa 2.

La deformación que presenta el O-Ring en las diferentes profundidades de la caja permite un buen sellado. La variación del valor de la placa 2 respecto a la placa 1 se debe a otra causa que no tiene nada que ver con el sello, se establece de esta manera porque en la gráfica 1 y 2 se puede observar que la fuga se mantiene constante en todas las diferentes medidas de caja.

Esto quiere decir que los sellos están realizando bien su función y que no importa el porcentaje del espesor de sello que permanece fuera de la caja este permite la estanqueidad del sistema.



Grafica 1 Resultados de la prueba de sellabilidad en la placa 1



Grafica 2 Resultados de la prueba de sellabilidad en la placa 1

Haciendo un análisis minucioso a las posibles causas de esta variación, podemos hacer mención de uno que puede ser la causa a esta problema, observando de manera detenida a la placa se encontró que el acabado final de la placa 1 es mejor que el acabado de la placa 2, ya que la placa 2 presenta en el fondo de sus cajas pequeñas protuberancias en forma de alabes de una turbina. Estas imperfecciones impiden que el O-Ring se acople de manera correcta a la superficie de la caja, lo que ocasiona que este no selle de manera correcta y ser la causante de esta variación de fuga.

La presencia de estas imperfecciones en la placa 2 no se debe a la mala manufactura, si no más bien a las pequeñas dimensiones con las que debe contar la caja que impiden el manejo correcto de las herramientas obteniendo como resultado las pequeñas imperfecciones presentadas en la placa 2, que son las causantes de que al momento de realizar la prueba se produzca una fuga aun mayor al de la placa 1.

El realizar esta prueba nos ayudo a confirmar que el material propuesto "Viton" si dio un buen resultado a la hora de la pruebas, estableciendo que se hizo una buena elección del material, ya que de los resultados obtenidos, las pequeñas fugas presentadas se debieron a otras factores ajenos al sello. Además de poder establecer que de los 2 tipos de cajas para los O-Ring ambos son buenos diseños, con la única diferencia que para el diseño de la caja de 3 paredes se necesita tener un mayor cuidado a la hora de la manufactura para evitar que se presenten pequeñas imperfecciones como las que se describieron en este apartado.

Conclusión

El desarrollo de este proyecto de investigación implicó lecturas, análisis, determinación y propuestas, todo esto respaldado por patentes, artículos, libros y consultas a sitios web de empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de sellos. En la investigación realizada pude aprender mucho sobre el tema desarrollado, además de poner en práctica los conocimientos de ingeniería mecánica, que dieron como resultado la propuesta de un nuevo material para que sea utilizado como sello en una PEMFC, además de haber sido llevado a prueba para confirmar la correcta elección.

Del estudio realizado se puede establecer que para la selección de un material para que sea usado como sello en cierta aplicación, lo primero a considerar es determinar en donde será usado, este dato será nuestro punto de partida para dar con el material más apropiado para esa aplicación. Conocer el uso que se le dará a un sello nos ayuda a determinar cuáles son las características más sobresalientes que el material debe poseer para dar buenos resultados.

El desarrollo de este proyecto dio frutos dando como única propuesta a un material llamado Viton, nombre que se le debe a la empresa DuPont Dow elastomers. El Viton es el material que por sus características y su buena resistencia, se eligió como el mejor material que puede usarse como sello de una PEMFC. Ya que comparado con otros materiales el Viton ofrece las mejores características de sellabilidad durante su vida, ya que muchos cauchos proporcionan un excelente sellado al principio pero gradualmente a veces rápidamente pierden su capacidad inicial debido a las condiciones adversas de operatividad. También se concluyó que el sellado de un sistema no solo depende del material que se utiliza como sello, si no de otros factores importantes que se deben de considerar, como el entorno en donde tiene la aplicación.

El haber realizado este proyecto de investigación me deja una buena vivencia, ya que logré aprender muchas cosas nuevas, además de adentrarme al campo laboral como futuro Ingeniero Mecánico, al resolver los problemas que se me presentaron y darles la mejor solución y dejar una buena impresión en el lugar donde realice mi proyecto de residencia profesional.

Referencia Bibliográfica

- [1] Plug Power Inc., Latham, NY (US). *Sealing system for fuel cell*. MATLOCK Richard R, BUESING Donald G. NY (US). Int. Cl. H01M 2/08, US 6,261,711 B1. 17 Julio 2001.
- [2] Barbir F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Sustainable World series, edited by Richard C. Dorf. USA: Elsevier Science and Technology Books, (2005).
- [3] Attila Husar, María Serra, Cristian Kunusch. *Description of gasket failure in a 7 cell PEMFC stack*. Journal of Power Sources 2007; 85:91.
- [4] Loyola Morales Félix, Cano Castillo Ulises, Albarrán Sánchez I. Lorena. *Sellos para PEMFC: análisis de compromisos y pruebas de optimización de su espesor*.
- [5] Askeland Donald R., *Ciencia e ingeniería de los materiales*, International Thompson Editores (1998).
- [6] Smith William F., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*, MC Graw Hill, tercera edición (1998).
- [7] http://www.google.com.mx/#hl=es-419&output=search&client=psy-ab&q=propiedades+mecanicas.pdf&oq=propiedades+mecanicas.pdf&gs_l=hp.3..0i30i4.2095.13042.0.13261.60.34.0.3.3.5.676.5213.0j3j6j2j0j4.15.0...0.0...1c.1.9BeF MVTTuOA&pbx=1&bav=on.2.or.r gc.r pw.r qf.&fp=ee2aaf24208d8e7c&bpcl=37189454&biw=1024&bih=478
- [8] <http://www.parkerorings.com>
- [9] <http://es.scribd.com/doc/50649115/9/COMPRESSION-SET>
- [10] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Tensile.htm>
- [11] <http://www.youblisher.com/p/156227-Ensayos-Fisicos-Primera-Parte/>
- [12] <http://www.youblisher.com/p/156228-Ensayos-Fisicos-Segunda-Parte/>
- [13] <http://www.pslc.ws/spanish/mech.htm>
- [14] <http://www.jiorings.com>
- [15] <http://www.ijasa.com>
- [16] <http://www.eric.es/web/mecanica-de-los-cauchos/>

- [17] López Carrasquero Francisco, *Fundamentos de polímeros*, edición 2004
- [16] Dennis E. Curtin, Robert D. Lousenberg, Timothy J. Henry, Paul C. Tangeman, Monica E. Tisack. *Advanced materials for improved PEMFC performance and life*. Journal of Power Sources 2004; 41–48.
- [17] Jinzhu Tan, Y.J. Chao, Min Yang, Woo-Kum Lee, J.W. Van Zee. *Chemical and mechanical stability of a Silicone gasket material exposed to PEM fuel cell environment*. International journal of hydrogen energy 2011; 1846 – 1852.
- [18] Jinzhu Tan, Y.J. Chao, J.W. Van Zee, W.K. Lee. *Degradation of elastomeric gasket materials in PEM fuel cells*. Materials Science and Engineering A 2007; 445–446; 669–675.
- [19] M. Schulze, T. Knöri, A. Schneider, E. Gülzow. *Degradation of sealings for PEFC test cells during fuel cell operation*. Journal of Power Sources 2004; 222–229.
- [20] Jinzhu Tan, Y.J. Chao, Xiaodong Li, J.W. Van Zee. *Degradation of silicone rubber under compression in a simulated PEM fuel cell environment*. Journal of Power Sources 172 (2007) 782–789.
- [21] Attila Husar, Maria Serra, Cristian Kunusch. *Description of gasket failure in a 7 cell PEMFC stack*. Journal of Power Sources 2007; 85–91.
- [22] Mark A. Belchuk. *SEALING PEM FUEL CELLS*. Freudenberg FCCT KG, Weinheim, GERMANY.
- [23] Junichiro Yamabe, Shin Nishimura. *Influence of fillers on hydrogen penetration properties and blister fracture of rubber composites for O-ring exposed to high-pressure hydrogen gas*. International journal of hydrogen energy 2009; 1977 – 1989.
- [24] Bhawani Tripathy, Erika Szele. *LEM Sealing Technology for Fuel cells*. Industry Sealing volumen 32.
- [25] *New Series of Fuel Cell Sealing Compounds*. Technical news 2003; 1152-1153.
- [26] *USFCC Recommended Standard Test Methods for Fuel Cell Gasket Materials*. US Fuel Cell Council's Gasket Focus Group 2006.
- [27] *Low Cost, Durable Seals for PEM Fuel Cells*. UTC power 2009.
- [28] Ballard Power Systems Inc., Burnaby, Canada. *Integrated seal for a PEM fuel cell*. Harmut Elias, Meersburg, Germany. Int. CI H01M 8/02, US 5,928,807, 27 Julio 1999.

[29] NOK Corporation, Tokio (JP). *Gasket for fuel cell*. Shigeo Wakamatsu, Fujisawa (JP). Int. Cl. F16J 15/02, US 6,231,053 B1, 15 mayo 2001.

[30] Plug Power Inc., Latham, NY (US). *Sealing system for fuel cells*. Richard R. Matlock, Catskill, Donald G. Buesing, Balston Spa, both of NY (US). Int. Cl. H01M 2/08, US 6,261,711 B1, 17 Julio 2001

[31] Plug power Inc., Latham, NY (US). *Profiled fuel cell flow plate gasket*. Ron H.Farkash, Clifton Park; Charles M. Carlstrom, Saratoga Springs; Robert A. Hoyt, Castleton; Dean P. Skrzycke, Latham, all of NY (US). Int. Cl. H01M 2/08; H01M 8/02, US 6,355,371 B1, 12 marzo 2012.

[32] Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha, Toyota (JP). *Seal and fuel cell with the seal*. Seiji Mizuno, Toyota (JP). Inc. Cl. H01M 08/10, US 6,440,597 B1, 27 agosto 2002.

[33] Toyota Jidosha Kabushiki kaisha, Toyota (JP). *Seal and fuel cell with the seal*. Seiji Mizuno, Toyoto (JP). Int. Cl. H01M 2/00, US 6,846,589 B2, 25 Enero 2005

[34] 3M innovative Properties Company, St Paul, MN (US). *Fuel cell membrane electrode assembly with sealing surfaces*. David Allen Wald, Lakeland, MN (US); Jimmy minh Le, saint Paul, MN (US); Michael Andrew Yandrasits, Hastings, MN (US); Paul Michael Boucher, Saint Paul, MN (US). Int. Cl. H01M 8/02, H01M 8/04, US 7,087,339 B2, 8 agosto 2006.

[35] SemGreen, L.P., Houston, Tx (US). *Electrochemical fuel cell comprised of a series of conductive compression gaskets and method of manufacture*. wyatt B. Orsbon, Sacramento CA (US), Rex A. Hodge, Sacramento CA (US), Rolf R. Becker, Orangevale, CA (US). Int. Cl. H01M 8/04, H01M 8/10, US 7,303,832 B2, 4 diciembre 2007.

[36] 3M Innovative Properties Company, Saint Paul, MN (US). *Fuel cell membrane electrode assembly with sealing surfaces*. David Allen Wald, Lakeland, MN (US); Jimmy Minh Le, Saint Paul, MN (US); Michael Andrew Yandrasits, Hastings (MN) (US); Paul Michael Boucher, Saint Paul, MN (US). Int. Cl. H01M 8/24, US 7,553,578 B2, 30 Junio 2009.

[37] Samsung SDI Co., Ltd., Gyeonggi-do (KR). *Fuel cell stack and manufacturing method of the same*. Yeong-Chan Eun, Suwon-si (KR); Seong –Jin An, Suwon-si (KR); Jun-ho sauk, Suwon-si (KR); Gil tae Roh, Suwon-si (KR); Seok- rak Chang, Suwon-Si (KR). Int. Cl. H01M 2/08, H01M 8/24, US 8,133,636 B2, 13 marzo 2012.

[38] Honda Motor Co., Ltd., Tokyo (JP); Shin-Etsu Chemical Co., Ltd., Tokyo (JP). *Separator and separator seal for polymer electrolyte fuel cells*. Daisuke Okonogi, wako (JP); Satoru Terada, Wako (JP); Noriyuki Meguriya, Annaka (JP); Osamu

Hayashida, Annaka (JP). Int. Cl. C08L 83/00, H01M 2/02, US 8,133,949 B2, 13 marzo 2012.

[39] Commissariat a l'Energie Atomique, Paris Francia. *Fuel cell with flat assembly and simplified sealing*. Jean-Philippe Poirot-Crouvezier, Saint Georges de Commiers (FR); Philippe Manicardi, Fontaine (FR); Audrey Montaut, Grenoble (FR) ; Jean Oriol, Grenoble (FR). Int. Cl. H01M 8/06, US 8,142,940, B2, 27 marzo 2012.

[40] Barbir F. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Sustainable World series, edited by Richard C. Dorf. USA: Elsevier Science and Technology Books, (2005)

[41] Larminie, James; Dicks, Andrew; John Wiley. *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd Edition, (2003).

[42] Specification Sheet. RH NUTTALL

[43] <http://www.fundicorte.es/>

[44] <http://www.elderrubber.com/>

[45] <http://www.par-group.co.uk/>

[46] <http://mositesrubber.com/>

[47] <http://www.columbiaerd.com/>

[48] <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php>

[49] <http://www.rtdygert.com/>

[50] http://www.altonashop.com/about_us.htm

[51] <http://www.rhnuttall.co.uk/>

[52] http://www.moldeados.com.mx/hule_viton.html

[53] <http://www.sellosmonterrey.com/>

[54] <http://www.fijucy.com/>

[55] <http://www.dichtomatikmex.com/index1.html#image001>

[56] <http://www.argensold.com/>

[57] <http://www.bove-ag.com/>

[58] <http://www.flowgasket.com/>

- [59] <http://www.pradi.com/>
- [60] <http://www.ar-po.com.ar/>
- [61] <http://www.empaquedehule.com.mx/>
- [62] <http://www.marcorubber.com/>
- [63] <http://www.alubron.com/>
- [64] <http://www.epidor.com/>
- [65] <http://www.siligom.com/>
- [66] <http://www.merefsa.com/>
- [67] <http://www.coardel.com.ar/>
- [68] <http://www.cisealco.com/>
- [69] <http://www.astm.org/>
- [70] *Fuel cell and hydrogen energy association*, Recommended standard test methods for fuel cell gasket materials (2011).
- [71] <http://es.scribd.com/doc/96341183/4-Elastomeros>
- [72] <http://www.rlHUDSON.com/O-Ring%20Book/opening.html>
- [73] <http://www.lorkindustrias.com/index.php>
- [74] <http://www.newdealseals.com/>
- [75] J.E. Shigley y C.R. Mischke, “Diseño en Ingeniería Mecánica”, McGraw Hill (2002) Pág 422-423.
- [76] J.C: Veiga, “Juntas Industriales”, Teadit (2003), Pág. 14-17.
- [77] B.J. Hamrock, B. Jacobson y S.R. Schmid, “Elementos de Máquinas”, McGraw Hill (2000), Pág.980-981.
- [78] R.L. Norton, “Diseño de maquinaria”, McGraw Hill (2000), Pág. 931-936
- [79] The American Society of Mechanical Engineers, “Código ASME 2010”, Código VII, Sección 1, Pág. 402.
- [80] “Proyecto de elementos de sujeción, anclaje y cierre”, Capítulo 4 (2004)