

Optimización de diseño en sellos tipo “o-ring” para la industria aeroespacial Design optimization in “o-ring” type seals for the aerospace industry

Julio D. Cabal-Velarde ^{a,*}, Javier G. Cabal-Velarde ^b, Azdrubal L. Guerrero-Serrano ^c

^a Universidad Aeronáutica de Querétaro, Carr. Querétaro-Tequisquiapan 22154, 76278 Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

^b Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carretera Irapuato-Silao km, Guanajuato, México.

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Hidalgo, México.

Resumen

El presente proyecto de investigación establece criterios generales para el diseño estático de “O-rings” en aplicaciones de configuración radial, usados en sistemas que confinan fluidos presurizados comunes en la industria Aeroespacial. Además de establecer los espacios de diseño en base a un diseño de Experimentos (DOE), y el uso de MINITAB en donde se muestran los parámetros importantes para el diseño, y la metodología empleada para la optimización de un diseño de configuración radial. Finalmente, se documenta la simulación de un elastómero típico (FKM) en elemento finito para entender la respuesta anticipada de un elastómero bajo una carga compresiva. El fluoro-carbono (FKM) tiene una excelente resistencia a altas temperaturas, ozono, oxígeno, aceite mineral, fluidos hidráulicos sintéticos, combustibles, compuestos aromáticos y muchos solventes y productos químicos orgánicos. El estudio de MEF comprende diferentes tamaños de O-ring (0.070 a 0.275 pulgadas de sección transversal) a diferentes niveles de compresión, ya que estos resultados son muy importantes para determinar la fuerza necesaria para la instalación y desinstalación de los O-rings dentro de las cavidades a sellar. La optimización de un diseño con el uso de estas herramientas se hace de manera muy fácil y rápida, haciendo más eficiente el proceso de un rediseño, o evaluación de un producto no-conforme en la industria.

Palabras Clave: O-Ring, Diseño, Sello, Simulación, ANSYS, Optimización, Elemento Finito, Industria Aeroespacial.

Abstract

This research project establishes general criteria for the static design of “O-rings” in radial configuration applications, used in systems that confine pressurized fluids common in the Aerospace industry. In addition to establishing the design spaces based on a Design of Experiments (DOE), and the use of MINITAB where the important parameters for the design are shown, and the methodology used for the optimization of a radial configuration design. Finally, the finite element simulation of a typical elastomer (FKM) is documented to understand the anticipated response of an elastomer under compressive loading. Fluorocarbon (FKM) has excellent resistance to high temperatures, ozone, oxygen, mineral oil, synthetic hydraulic fluids, fuels, aromatics and many solvents and organic chemicals. The FEM study includes different sizes of O-rings at different compression levels, since these results are very important to determine the force necessary for the installation of the O-rings inside the cavities to be sealed. The optimization of a design with the use of these tools is done very easily and quickly, making the process of a redesign, or evaluation of a non-conforming product in the industry, more efficient.

Keywords: O-Ring, Design, Seal, Simulation, ANSYS, Optimization, Finite Element, Aerospace Industry.

1. Introducción

Las empaquetaduras y sellos son medios para evitar el escape de un fluido a través de los claros mecánicos, ya sea en el estado estático o dinámico. Existe una gran variedad de sellos, y su selección depende de muchos factores, tales como presión, tipo de fluido que se quiere sellar, espacio, costo, etc.

En la mayor parte de los casos existen varios tipos para una aplicación específica, alguno de los cuales, aunque costosos, rinden un servicio excepcional. En la antigüedad para sellar dos superficies sometidas a presión, se utilizaban sellos de cobre. Los sellos elásticos en forma de anillo (globalrubber.com, s.f.) llamados “O-rings” fueron usados hasta mediados de 1800 con poco éxito. De hecho, la patente

*Autor para la correspondencia: julio.cabal@unaq.mx

Correo electrónico: julio.cabal@unaq.mx (Julio Daniel Cabal-Velarde),
azdrubal.guerrero@uaeh.edu.mx (Azdrubal Lobo Guerrero-Serrano).

javier.cv@irapuato.tecnm.mx

(Javier Gustavo Cabal-Velarde), y

de la bombilla (Edison, 1880) muestra un anillo de goma redondo en el cuello del bulbo de cristal como sello.

El O-ring como lo conocemos fue desarrollado por Niels A. Christensen. Él comenzó a estudiar estos sellos en un sistema hidráulico en 1933, y finalmente obtuvo su primera patente (Christensen, 1939) del O-ring, a la edad 72 años. La aceptación de los O-rings vino hasta 1950. Prácticamente en la actualidad, en la mayoría de las máquinas se utilizan O-rings, y su éxito se debe a su simplicidad, bajo costo, facilidad de la instalación, y requisitos de espacio pequeños sin estructuras de soporte.

Los “O-rings” (Avalione, 1996) como se dijo anteriormente, son piezas en forma de anillo o aro, de sección circular, fabricado en compuesto elastomérico, y se especifican por medio de su diámetro interno, del diámetro de su sección transversal y del material que está hecho, tal como se muestra en la Figura 1.

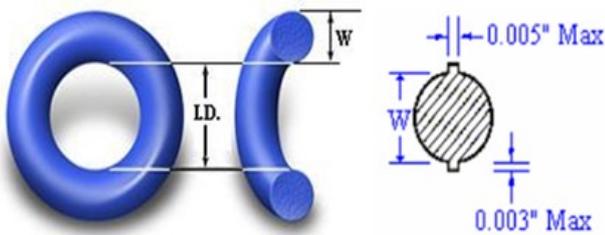


Figura 1: Detalle de la Forma del O-ring.

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 previniendo la pérdida de líquidos y gases, según sea la aplicación, tal como se indica en la Figura 2.

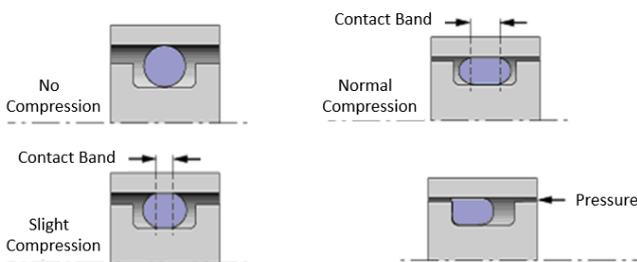


Figura 2: Detalle de cómo Trabaja un O-ring (Oberg, 2012).

Los O-rings son usados ampliamente en la industria aeroespacial. Su concepto es simple, y fácil de instalar, puede ser usado en un arreglo doble, y además sella hasta presiones arriba de 5000 PSI en aplicaciones estáticas (SAE ARP131, 2022) y dinámicas (SAE ARP1234, 2021), y lo mejor de todo es que es muy económico. Aunque su concepto es simple, puede ser muy sofisticado en su aplicación.

En la industria aeroespacial los arreglos más usados son del tipo axial, y el arreglo del tipo radial (O-ring West, 2024). En la configuración axial el sellado se lleva a cabo por la compresión del O-ring en su parte lateral (Ver Figura 3). En la configuración radial la compresión del sello se produce entre el diámetro interno y externo del mismo, tal como se muestra en la Figura 4.

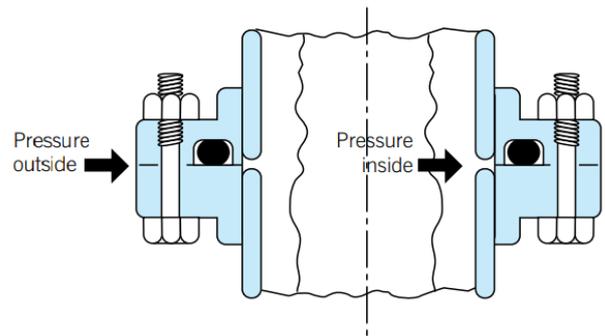


Figura 3: Aplicación Estática Axial de O-rings (Eriks Sealing Elements, 2024).

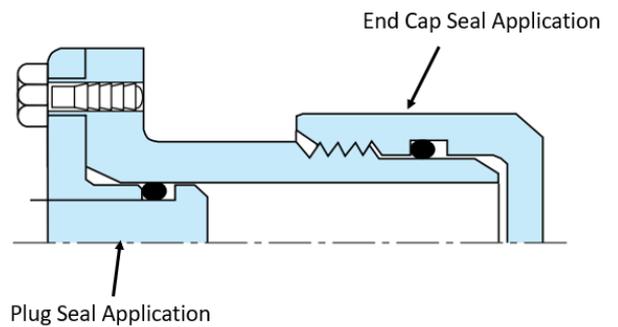


Figura 4: Aplicación Estática Radial de O-rings (Eriks Sealing Elements, 2024).

Los O-rings se especifican por tres de sus características principales:

- Dimensiones (diámetro interno, y diámetro de la sección transversal del O-ring).
- Material del O-ring.
- Dureza del Material.

La selección de este va a depender de las condiciones o el ambiente de trabajo que el sello experimentará (Oberg, 2012), y la geometría de glándula en que el sello se instalará. Estas tres variables justifican el hecho de por qué hay tantos tipos diferentes de sellos, y aplicaciones. En la Figura 5 se muestran los más usados.

Nitrile (Buna-N) es el material más comúnmente usado en el mundo, es resistente a aceites y gasolinas. Viton® se ha convertido en uno de los favoritos por su resistencia a los químicos, y su excelente rango amplio de temperaturas.

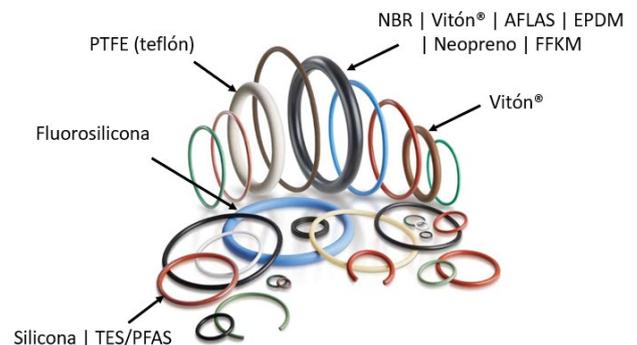


Figura 5: Tipos de O-rings más Usados (Eriks Sealing Elements, 2024).

La Figura 6 muestra diferentes materiales elastoméricos y el rango de temperaturas (Parker O-ring Handbook, 2021) de operación para estos materiales. El FKM y el FFKM son ampliamente utilizados en la industria aeroespacial por su excelente resistencia a temperaturas elevadas y productos químicos agresivos.

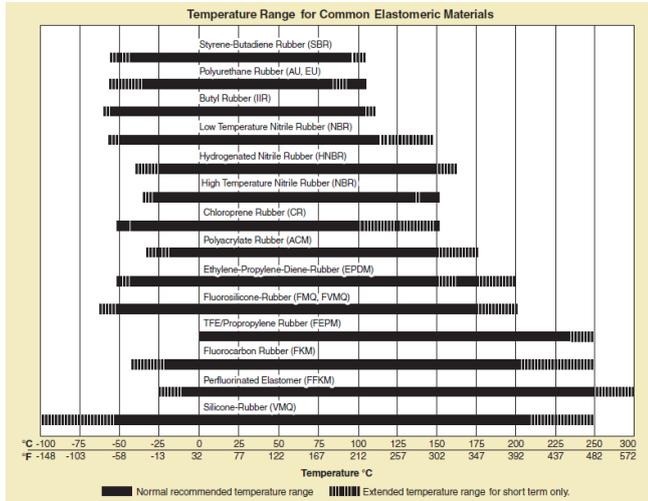


Figura 6: Rango de Temperatura para Elastómeros Comunes (Parker O-ring Handbook, 2021).

2. Diseño de O-rings para Aplicaciones Radiales.

Para aplicaciones radiales hay dos tipos de configuraciones: 1) alojamiento del sello en la parte interna (*Rod-Mounted Design*), y 2) alojamiento del sello en la parte externa (*Bore-Mounted Design*). La Figura 7 muestra las características geométricas más importantes en ambos diseños.

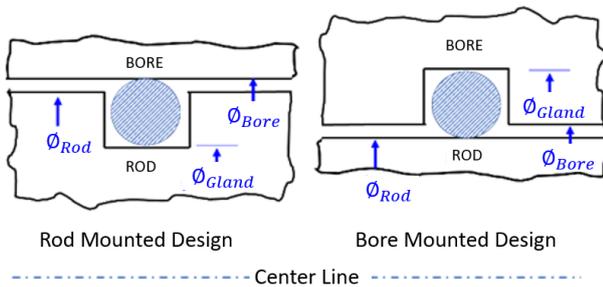


Figura 7: Configuraciones para Aplicaciones Radiales.

El cálculo del aplastamiento (“*Squeeze*”) es muy sencillo. El sellado adecuado, depende principalmente de la cantidad de aplastamiento que tiene la sección transversal del sello. Basta con restarle al diámetro de la sección transversal del sello, la profundidad del alojamiento del sello, conocida por su término en inglés como *Gland Depth*, lo cual nos dará una medida lineal de aplastamiento en unidad de longitud. Si se quiere conocer el nivel de aplastamiento en porcentaje, simplemente se divide la cantidad ya obtenida entre el diámetro de la sección transversal del sello, tal como se indica en (1).

$$\% \text{ Squeeze} = \frac{W - F(\text{GlandDepth})}{W} \times 100 \quad (1)$$

Sin embargo, al hacer el cálculo se deben considerar aquellos factores dimensionales que pueden afectar el

aplastamiento, tales como: las tolerancias diametrales de las partes de ensamble, las excentricidades de las partes, los posibles desalineamientos, y la reducción de la sección transversal del sello, al momento de ser ensamblado, por último, hay prácticas de diseño en el cual se debe considerar la operación del sello para asegurar que el sellado no se compromete. La Figura 8 muestra los parámetros dimensionales utilizados para calcular el aplastamiento del sello. En los cálculos se deben considerar las tolerancias de las características dimensionales mencionadas.

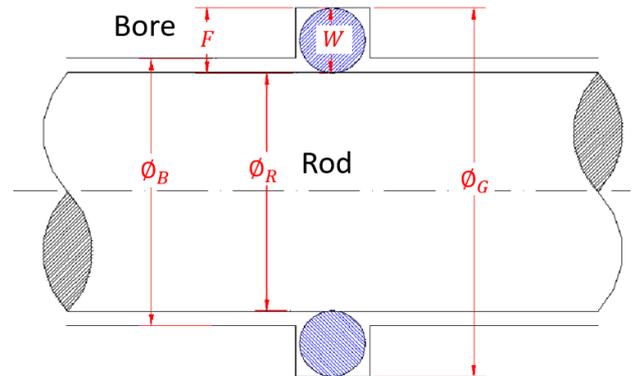


Figura 8: Configuración con Ranura en la Parte Interna.

Por lo tanto, el aplastamiento del sello, utilizando todos los factores que afectan el mismo, se calcula de la siguiente manera:

$$S_q = [W - F] \pm \sum \text{Factores Dimensionales} \quad (2)$$

De ahí que el aplastamiento mínimo es determinado por:

$$S_{qmin} = [W_{min} - F_{max}] - (R_o + R_R + R_S) \quad (3)$$

Dentro de los factores dimensionales más significativos tenemos, la reducción de la sección transversal del sello (R_S) debido a su alargamiento, el desalineamiento (R_o), y las tolerancias de cabeceo circular (R_R) para los diámetros maquinados.

La reducción por “*offset*” se calcula de la geometría del ensamble. Esta condición se lleva a cabo cuando la superficie definida por el diámetro externo de la parte interna toca la superficie definida por el diámetro interno de la superficie externa. Por lo que la Ecuación que se usa para calcular esta reducción viene dada por (4).

$$R_o = \frac{\Phi_{Bmax} - \Phi_{Rmin}}{2} \quad (4)$$

La reducción máxima posible por de la sección transversal del sello se calcula de manera empírica utilizando (5), donde Φ_{Gmin} sería el diámetro de la glándula de la ranura en condiciones mínimas, Φ_U sería el diámetro interno del sello sin instalar. Esta Ecuación es válida para todos los elastómeros mencionados anteriormente en la sección de Introducción de acuerdo con la norma ARP1232 (SAE ARP1232, 2001).

$$R_S = \frac{W_{min}}{10} \sqrt{6 \left(\frac{\phi_{Gmin} - \phi_U}{\phi_U} \right)}. \quad (5)$$

El cálculo del aplastamiento para un sello montado en la parte externa es muy similar al mostrado en la configuración de alojamiento del sello en la parte interna, prácticamente las primeras 4 ecuaciones son las mismas, el aplastamiento es calculado utilizando todos los factores dimensionales, tales como: las tolerancias diametrales de las partes de ensamble, las excentricidades de las partes, los posibles desalineamientos, y la reducción de la sección transversal del sello.

La Figura 9 muestra los parámetros utilizados para calcular el aplastamiento del sello para la configuración en donde la ranura se encuentra ubicada en la parte externa. Como se puede observar en la Figura, los parámetros más importantes para el diseño son la geometría del elastómero, y de los elementos de acoplamiento del sistema de sellado. Por lo que, el cálculo del aplastamiento es muy similar a la anterior configuración.

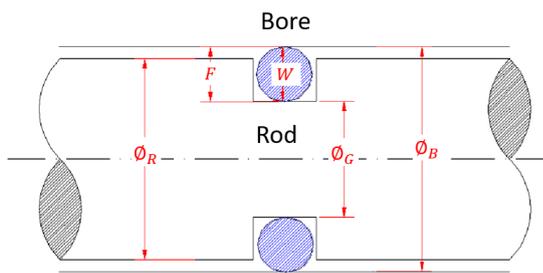


Figura 9: Configuración con Ranura en la Parte Externa.

La reducción de la sección transversal del sello para esta configuración es similar a (5), pero en lugar de que el sello esté montado en la ranura, está montado en la flecha, por lo que la reducción de la de la sección transversal del sello se calcula utilizando (6), en donde el término diferente para el cálculo es dentro del radical, en donde en lugar de usar el ϕ_{Gmin} , se utiliza ϕ_{Rmin} , ya que el O-ring va montado sobre la flecha.

$$R_S = \frac{W_{min}}{10} \sqrt{6 \left(\frac{\phi_{Rmin} - \phi_U}{\phi_U} \right)}. \quad (6)$$

En la Tabla 1 se muestran los valores de aplastamiento (Aerospace Standard AS-568, 2020) permitidos para el diseño estático radial de O-rings. La Tabla muestra los tamaños típicos o estándar desde 0.070 pulgadas de sección transversal, hasta 0.275 pulgadas. El máximo aplastamiento en el sello para todos los tamaños es 40%, y el mínimo viene dado en pulgadas para el tamaño que se utilice en el sellado. En la Tabla viene también los niveles recomendables para el sellado en porcentaje en condiciones nominales. Sin embargo, al final el diseñador tiene total libertad, siempre y cuando estén dentro de los límites de la norma.

3. Diseño de Experimentos de la Geometría de un O-ring.

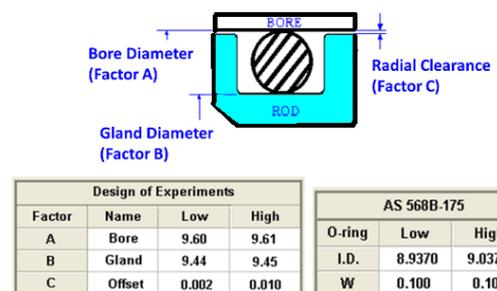
El Diseño de Experimentos es muy eficiente, ya que nos permite modificar las variables independientes (las “X”) simultáneamente, y evaluar el efecto de cada una sobre la

respuesta “Y”. Por lo tanto, el objetivo de un diseño de experimentos es estimar los efectos de las variables independientes sobre las Respuestas. Los diseños factoriales son diseños de experimentos donde cada variable es estudiada en un número específico de niveles, los diseños factoriales 2^2 usan dos variables “X” en dos niveles (bajo y alto). En esta sección se muestra un diseño de experimentos 2^3 , donde se estudian 3 factores o variables con dos niveles cada uno.

Tabla 1: Valores de Aplastamiento Permitidos para el Diseño Estático Radial de O-rings.

AS568	Nominal	Nominal	Maximum	Minimum
Dash No	Cross-Section	Squeeze (%)	Squeeze (%)	Squeeze (in)
	DIA W (pulgadas)			
-004 thru -050	0.07	21	40	0.004
-102 thru -178	0.103	19	40	0.005
-201 thru -284	0.139	18.5	40	0.007
-309 thru -395	0.21	16.5	40	0.01
-425 thru -475	0.275	15.5	40	0.013

El diseño experimentos 2^3 para un diseño estático de un O-ring, donde la ranura es maquinada en la parte interna de una configuración radial, se muestra en la Figura 10. El diseño se basa en la geometría de la ranura dado en un sello específico (AS 568B-175). La geometría viene dada por tres factores, donde el primer factor es el diámetro interno de la parte externa, el segundo factor es el diámetro de la ranura o glándula, y el tercero viene dado por el claro radial entre la pieza interna y externa, tal como se muestra en la Figura 10, en la Figura se puede observar las dimensiones geométricas de las partes, así como las del O-ring a analizar en base a un DOE.



Design of Experiments			
Factor	Name	Low	High
A	Bore	9.60	9.61
B	Gland	9.44	9.45
C	Offset	0.002	0.010

AS 568B-175		
O-ring	Low	High
I.D.	8.9370	9.0370
W	0.100	0.106

Figura 10: Diseño de Experimentos Aplicado al Diseño de un O-ring.

Se utiliza un arreglo de factorial completo. Se utilizó MINITAB para generar, y analizar el diseño de experimentos del O-ring. MINITAB es una herramienta para el análisis cuantitativo de datos, descubrir tendencias, encontrar y predecir patrones, descubrir relaciones ocultas entre las variables y crear visualizaciones impresionantes para aprovechar las oportunidades y abordar incluso los desafíos más abrumadores, además, permite realizar: análisis de sistemas de medición, análisis de capacidad, análisis gráfico, pruebas de hipótesis, regresión, diseño de experimentos y gráficas de control. En la industria esta herramienta es ampliamente usada, ya que, para un diseño dado, en un espacio

de diseño limitado, podemos correr un diseño de experimentos para optimizarlo, o para abordar de forma más sencilla un rediseño, o inclusive para evaluar la capacidad de sellado cuando una de las piezas viene fuera de tolerancia, y es necesario hacer una evaluación rápida de la pieza fuera de diseño.

Para el diseño de experimentos los parámetros de respuesta a analizar fueron, el aplastamiento mínimo y máximo, así como el estiramiento del sello. Los resultados se muestran en la Tabla 2. La Tabla muestra los 8 experimentos realizados, y los valores calculados para estos diseños, en cuanto al máximo aplastamiento en porcentaje, el mínimo en pulgadas, y el estiramiento del O-ring, ya que la norma no permite alargamientos mas del 10%, un diseño adecuado va desde el 2% hasta el 10% máximo.

Tabla 2: Diseño de Factorial Completo.

RunOrder	Bore Diameter (Inches)	Glad Diameter (Inches)	Offset (Inches)	Maximum Squeeze (%)	Minimum Squeeze (Inches)	Stretch (%)
1	9.6	9.44	0.002	24.53	0.0112	5.63
2	9.6	9.44	0.01	24.53	0.0072	5.63
3	9.61	9.44	0.01	19.81	0.0022	5.63
4	9.61	9.45	0.01	24.53	0.0071	5.74
5	9.6	9.45	0.002	29.25	0.0161	5.74
6	9.61	9.45	0.002	24.53	0.0111	5.74
7	9.61	9.44	0.002	19.81	0.0062	5.63
8	9.6	9.45	0.01	29.25	0.0121	5.74

Tres gráficas se utilizan para analizar los DOE (*Design of Experiments*) factoriales: Gráficas de Efectos Principales, Gráficas de Interacción, y Gráficas de Cubo.

La magnitud relativa de los Efectos principales puede tomarse en cuenta al comparar las pendientes de las líneas. Una inclinación mayor significa un efecto mayor sobre la “Y” (Respuesta) dentro de la región que está siendo estudiada. Las interacciones dentro de la región de prueba no son significativas si las líneas son paralelas.

Las gráficas de cubo muestran las respuestas para todas las combinaciones de las “X” (Factores A, B, y C), con el fin de visualizar y seleccionar la combinación de las “X” que optimiza la respuesta (“Y”). Para el caso de estudio se puede observar que los tres factores (*Bore, Gland, and Offset*) juegan un papel importante en el aplastamiento del sello.

Los “DOEs” demuestran la ‘robustez’ de un proceso efectuando pruebas a lo largo de un rango amplio de las “X”. Los DOEs proporcionan un enfoque sistemático para comprobar cuáles de sus potenciales “X” son las vitales. Para determinar qué factores no son importantes, veremos dos gráficas, la Normal de efectos, y el “Pareto” de efectos.

La gráfica Normal de efectos señala que los factores A, B, y C, son factores importantes, por tal motivo, no los debemos de eliminar, tal como se muestra en la Figura 11. Además, el “Pareto” de efectos (Figura 12) muestra que las interacciones entre los factores no son importantes, por tal motivo los podemos eliminar, que son los puntos en negros de la Figura 11. Sin embargo, los factores A, B y C si son significantes, ya que los tres contribuyen de manera significativa al

aplastamiento del sello, en orden de mayor a menor, tenemos que el Factor A (Bore) es el que está más alejado, produciendo mayor efecto en la respuesta del aplastamiento, luego le sigue el B (Gland) y por último el C (Offset).

En la Figura 13 se muestra el “Pareto” de efectos para la respuesta del estiramiento del sello, y de acuerdo con la gráfica, se puede observar que el único efecto significativo es el diámetro de la ranura del sello.

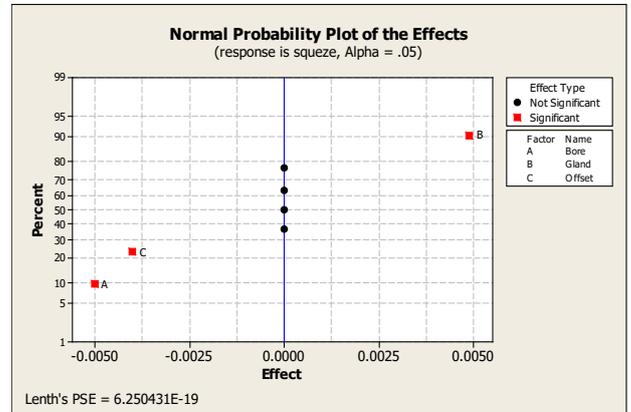


Figura 11: Gráfica Normal de Efectos para el Aplastamiento del Sello.

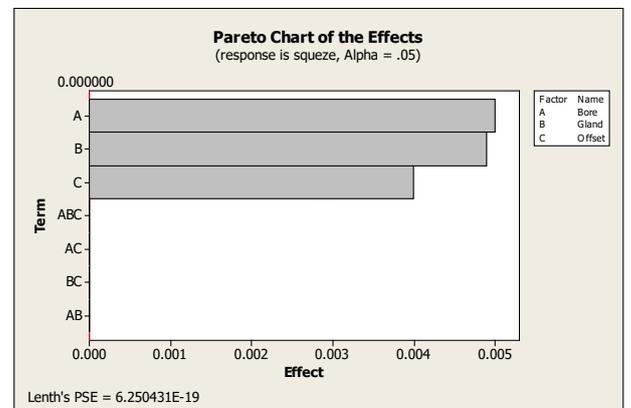


Figura 12: Pareto de Efectos para el Aplastamiento Mínimo del Sello.

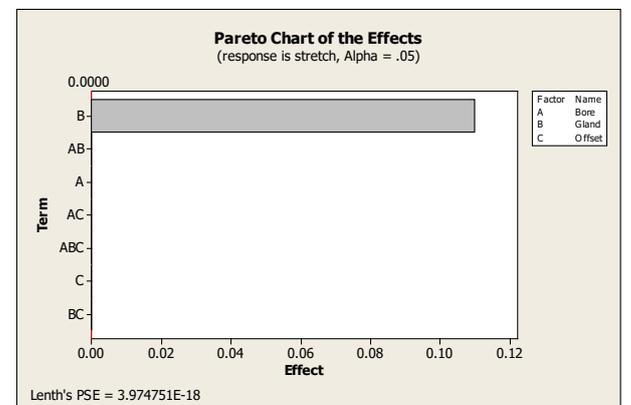


Figura 13: Pareto de Efectos para el Estiramiento del Sello.

Hay 3 gráficas que se usan para el análisis de arreglos factoriales:

- Gráficas de Efectos Principales: En esta gráfica se muestra el efecto de cada “X” individual sobre la “Y” (usando valores promedio de las

respuestas). En la Figura 14 se muestra el efecto de cada uno de los factores con respecto al aplastamiento del sello, mientras más inclinada esté la línea, mayor será el “efecto” sobre la respuesta. Las líneas de pendiente cero no tienen efecto sobre la respuesta. Como se puede observar, la geometría de la ranura, y los claros del ensamble son parámetros significativos en el aplastamiento del sello.

- Gráficas de Interacción: En esta gráfica se muestran los efectos combinados de dos “X” al cambiar simultáneamente. Como se puede observar en la Figura 15, las líneas paralelas indican que no hay interacción entre los factores, si tuvieran diferente pendiente tendrían una interacción moderada, y si estuvieran cruzadas tendrían una interacción significativa. Sin embargo, en el diseño de O-rings no hay interacción entre los factores.
- Gráficas de Cubo: En esta gráfica se muestra la respuesta promedio “Y” en cada combinación de las “X”, tal como se muestra en la Figura 16. Este tipo de gráficas son muy importantes, ya que nos muestran la respuesta del aplastamiento mínimo del sello para diferentes combinaciones, de ahí que podemos fácilmente identificar la máxima y la mínima respuesta junto con la combinación de factores que proporciona tal respuesta. La Figura 17 y 18 nos da una mejor vista del espacio de diseño en base a nuestro diseño de experimentos.

Haciendo la regresión por medio de MINITAB para la respuesta del aplastamiento mínimo del sello, se obtiene (7), ésta depende principalmente de los tres factores definidos en el problema, los cuales son el diámetro de la ranura, el diámetro de la parte externa, y el claro radial, como se puede observar en la Figura 19, las interacciones entre los factores son despreciables.

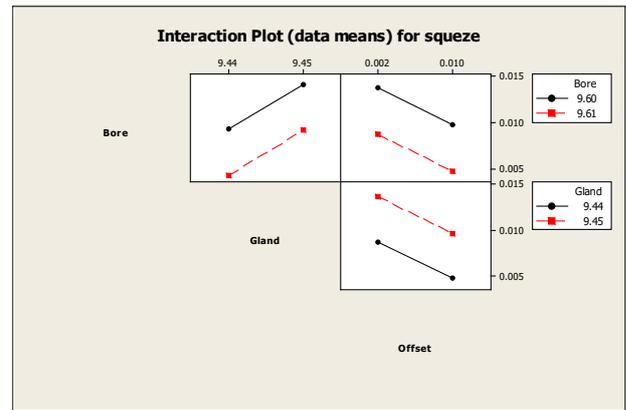


Figura 15: Gráfica de Interacción para el Aplastamiento del Sello.

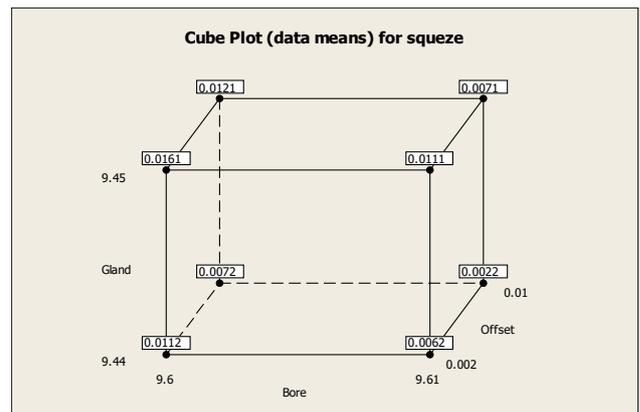


Figura 16: Gráfica de Cubo para el Aplastamiento del Sello.

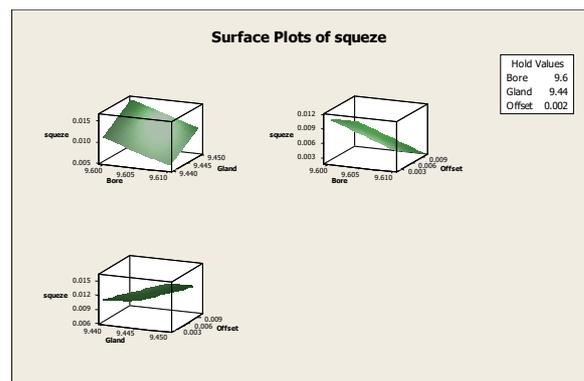


Figura 17: Superficie de Respuesta para el Aplastamiento del Sello.

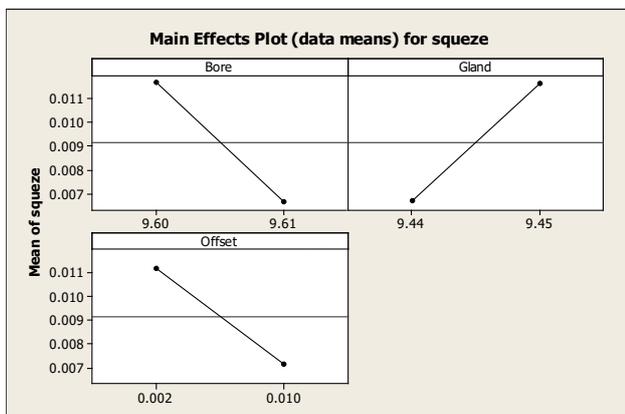


Figura 14: Gráfica de Efectos Principales para determinar el Aplastamiento del Sello.

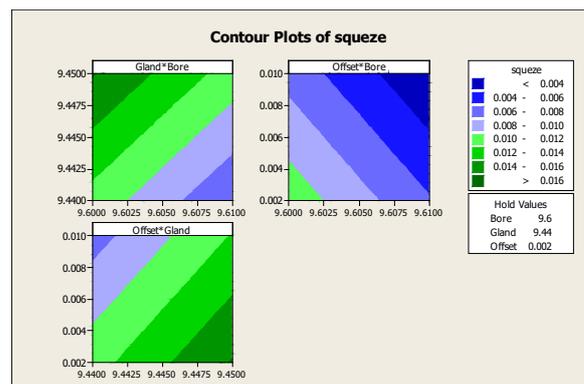


Figura 18: Gráficas de Contorno para el Aplastamiento del Sello.

Estimated Coefficients for squeeze using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	0.186600
bore	-0.500000
gland	0.490000
offset	-0.500000
bore*gland	5.57712E-14
bore*offset	4.29199E-11
gland*offset	4.36446E-11
bore*gland*offset	-4.54484E-12

Figura 19: Regresión de la respuesta del Aplastamiento (“Squeeze”) Mínimo del Sello.

Despreciando las interacciones entre los factores, la Ecuación que define el aplastamiento viene dada por (7).

$$S_q = 0.186 - 0.5\phi_B + 0.49\phi_G - 0.5\delta. \quad (7)$$

Estimated Coefficients for stretch using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-98.2100
bore	-7.40113E-12
gland	11.0000
offset	-5.48403E-09
bore*gland	7.83719E-13
bore*offset	5.70995E-10
gland*offset	5.80793E-10
bore*gland*offset	-6.04719E-11

Figura 20: Regresión de la respuesta del Estiramiento (“Stretch”) del Sello.

Como se puede observar en la Figura 20, el único factor significativo es el diámetro de la ranura, de ahí que la Ecuación para determinar el estiramiento del sello queda como:

$$R_S = -98.21 + 11\phi_G. \quad (8)$$

Estimated Coefficients for maxsq using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	100.050
bore	-472.000
gland	472.000
offset	-4.40622E-07
bore*gland	6.12772E-11
bore*offset	4.58525E-08
gland*offset	4.66669E-08
bore*gland*offset	-4.85630E-09

Figura 21: Regresión de la respuesta del Aplastamiento (“Squeeze”) Máximo del Sello.

La Ecuación que determina el máximo aplastamiento, viene dada por (9). En la Figura 21 se muestran los resultados de la regresión. En esta Figura se puede observar que los factores significativos son solamente el diámetro de la parte externa y el diámetro de la ranura. Las interacciones entre factores y el claro radial son insignificantes para el cálculo del aplastamiento máximo del sello.

$$S_{qmax}(\%) = 100 - 472\phi_B + 472\phi_G. \quad (9)$$

Como se puede observar en la regresión de las distintas respuestas, podemos observar que las respuestas analizadas son ecuaciones lineales, lo que nos lleva a obtener planos como superficie de respuesta, tal como se muestra en la Figura 17.

Con este sistema de ecuaciones es más sencillo obtener un diseño aceptable en base a los requerimientos del diseño de este tipo de dispositivos de sellado, y dentro de los niveles especificados en cada uno de los factores.

En muchas situaciones es muy importante entender la respuesta anticipada de un elastómero bajo una carga compresiva. Las curvas de compresión/deflexión de varios elastómeros son función de la dureza del sello, así como de su sección transversal.

El optimizador de MINITAB (Figura 22) es una herramienta muy poderosa, ya que podemos mover las líneas rojas del gráfico en la Figura, y así modificar el diseño simplemente con arrastrar a la derecha, o la izquierda estas líneas, y observar de manera automática los niveles de aplastamiento máximo y mínimo, dentro del espacio de diseño en la parte izquierda de la gráfica en color azul. Esta herramienta también es útil para rediseñar una junta de sellado que está teniendo problemas.

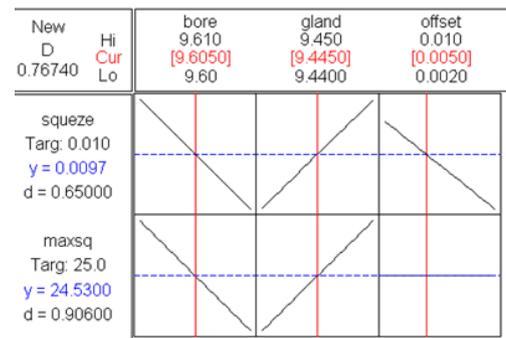


Figura 22: Optimizador de MINITAB a la Mitad del Rango de Variación.

4. Simulación por Elemento Finito de un Diseño de O-ring en Aplicación Radial.

Se realizaron simulaciones en elemento finito, para determinar el comportamiento del o-ring durante el ensamble, y la operación de los mimos en una aplicación específica (Inyector de Aceite). En el ensamble es importante conocer las fuerzas de reacción sobre las paredes, para así, poder determinar la fuerza de fricción generada al ensamblar el sello, por otro lado, la operación para evaluar los esfuerzos en el O-ring y evitar la extrusión del sello en los claros del ensamble. En el documento, se muestran unas corridas usando elemento finito (ANSYS) para determinar la respuesta de un elastómero (FKM) típico usado en la industria aeroespacial. El modelo de elemento finito se muestra en la Figura 23. Es un modelo en 2D (“Axisymmetric Model”) no-lineal con simetría respecto a un eje. Debido al comportamiento hiperelástico de estos elastómeros, se utilizó el elemento HYPER56 (2D-4 nodos) para mallar la sección transversal del sello. Se crearon dos fronteras rígidas, la inferior es estática y la superior es móvil, con el fin de aplicar un desplazamiento en un nodo maestro en la frontera superior y así simular el efecto de la compresión del sello. Además, se utilizó “contact Wizard” para generar automáticamente los elementos de contacto entre la superficie del sello, y las fronteras. Se realizaron modelos con diferentes secciones transversales (0.07 a 0.275 tal cual se muestran en las series de la Tabla 1), y se aplicó un desplazamiento en la frontera móvil que va desde cero hasta un valor máximo de compresión al 40% de la sección transversal del sello. Las propiedades del material del elastómero se definieron por medio de dos constantes de “Mooney-Rivlin”, donde C1=17.5 PSI y C2=1.5 PSI, y una razón de “Poisson” de 0.499, que

corresponden a un sello de Fluoro carbón (FKM) (Eriks Sealing Elements, 2024). El hecho de conocer las fuerzas de reacción es muy importante, ya que al diseñar nos podemos dar cuenta si el O-ring va a centrar la pieza de ensamble o no, esto dependiendo del peso de ésta o de las condiciones de ensamble.

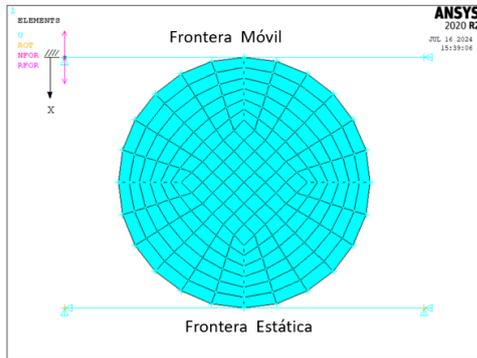


Figura 23: Modelo de Elemento Finito de un O-ring.

Además de determinar las fuerzas de reacción sobre las paredes, la simulación nos ayuda a determinar si las piezas de ensamble van a resistir la fuerza que provoca el O-ring al ser comprimido. En todos los diseños, hay que tener en consideración las fuerzas de reacción, la presión de trabajo, los cambios dimensionales en las condiciones de operación, los niveles de compresión, el ataque químico del fluido de trabajo, etc. La Figura 24 muestra los resultados de los análisis que se hicieron para estos elastómeros (FKM) a 40% de compresión del O-ring de 0.070 pulgadas de sección transversal, en donde se muestra la presión hidrostática (100 PSI máx) en el contacto con el sello, y los esfuerzos efectivos (Von Mises) en el sello de 123 PSI máximo.

Las fuerzas de reacción para diferentes niveles de compresión o aplastamiento se muestran en la Tabla 3. En la Figura 25 se muestra una gráfica de las fuerzas de reacción con respecto a los niveles de aplastamiento o compresión.

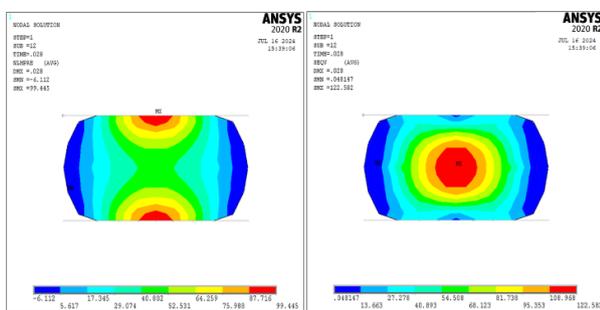


Figura 24: Presión Hidrostática y Esfuerzos Efectivos en un O-ring de “0.070” pulgadas de Sección Transversal.

La Tabla 3 muestra las fuerzas de reacción sobre las paredes del O-ring durante la compresión, estos valores de repuesta se obtuvieron de la simulación de elemento finito usando ANSYS. Podemos observar que entre mayor sea la sección transversal del sello, mayor será las fuerzas de reacción al comprimirlo. Por lo que se requerirá de mayor fuerza para poder ensamblarlo. También, mayor compresión implica mayor fuerza reactiva de compresión. Este tipo de simulaciones son muy importantes en el diseño de este tipo de dispositivos de sellado.

Tabla 3: Fuerzas de Reacción sobre las paredes del O-ring durante la compresión.

Compression [%]	O-ring Seal Series				
	0.070	0.103	0.139	0.210	0.275
1.60	0.08	0.15	0.22	0.37	0.61
3.20	0.68	1.02	1.55	2.28	3.33
5.60	2.45	3.60	4.92	7.38	9.85
9.20	5.74	8.51	11.70	17.84	23.94
13.20	9.83	14.55	19.79	30.28	40.26
17.20	14.93	22.16	30.20	46.48	61.98
21.20	22.38	33.20	45.21	69.51	92.54
25.20	30.71	45.55	62.00	95.28	126.77
29.20	40.24	59.67	81.22	124.79	166.01
33.20	55.08	81.79	111.49	171.84	229.23
37.20	74.60	110.75	150.93	232.55	310.05
40.00	91.27	135.50	184.65	284.48	379.29

Reaction Force (Pounds)

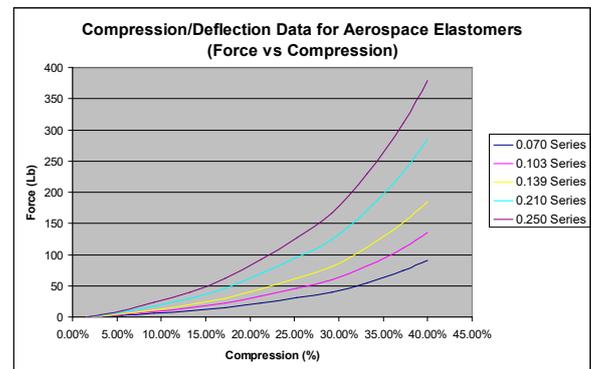


Figura 25: Las fuerzas de Reacción para Diferentes Niveles de Compresión.

En los resultados de la fuerza de reacción del O-ring, se puede observar que entre mayor sea la sección transversal del sello, mayor serán las fuerzas de reacción, de ahí la importancia de seleccionar el tamaño adecuado para los diseños de este tipo de dispositivos.

Finalmente, se muestra la simulación en elemento finito de un inyector de aceite típico (Figura 26) usado en la industria aeroespacial para alimentar un balero de bolas o de rodillos. Algunos inyectores están alargados, y con trayectorias curvas, para evitar interferencias con componentes adyacentes, y así poder alcanzar la zona que va a ser lubricada. En el ensamble de este inyector se usa un O-ring cuyas dimensiones se muestran en la Figura 27. Además, se muestran las dimensiones de las partes que van a ser ensambladas. Para la simulación, se considera una presión interna promedio del aceite de 40 PSI en esta sección, que es una presión mucho más alta comparada con una presión de un inyector en un sistema de lubricación de una turbina comercial. Para determinar la forma en que se deforma el O-ring durante la operación, se realizó un modelo de elemento finito con las condiciones descritas anteriormente.

El modelo de elemento finito junto con sus condiciones de frontera se muestra en la Figura 28. En la Figura 29 se muestra la distribución de esfuerzos efectivos en el elastómero, y la Figura 30 muestra la presión hidrostática. Como se puede mostrar en la simulación, el O-ring trata de incrustarse en el claro radial que existe entre las piezas ensambladas. Por lo que un diseño inadecuado por extrusión puede ocasionar un daño permanente al O-ring, perdiendo su capacidad de sellado.

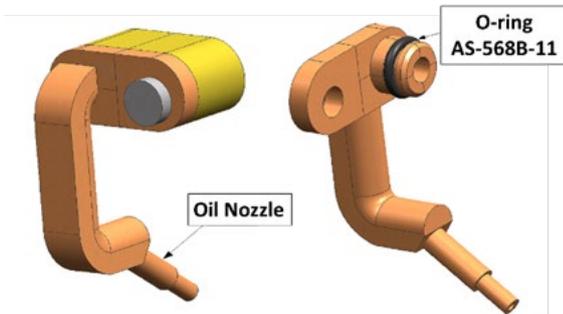


Figura 26. Inyector de Aceite.

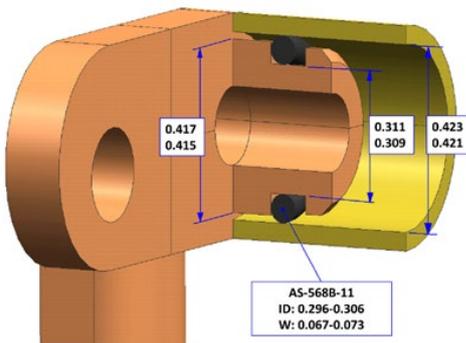


Figura 27: Geometría del Ensamble del Inyector de Aceite.

Los resultados del modelo de elemento finito en la Figura 29, como el sello se trata de incrustar dentro de los claros de los componentes en la zona de baja presión, el esfuerzo se concentra en la zona donde se puede extruir el material hiperelástico del sello, y el esfuerzo efectivo es de 50.3 PSI (0.35 MPa), la resistencia del material (FKM) a tensión de este material del sello es de 18 MPa (2611 PSI) (Wojciech S. & Janusz L., 2020), lo cual el esfuerzo máximo en el sello está muy por debajo del límite de resistencia del material, no afectando la integridad del sello, ni su capacidad de sellado. Las presiones hidrostáticas se pueden utilizar para evaluar los esfuerzos en los componentes estructurales donde va montado el sello, se puede observar en la Figura 30 que la presión máxima es de 73 psi en las tres paredes que hacen contacto con el sello.

Conclusiones

El O-ring es un dispositivo elastomérico simple en forma de anillo y de fácil manejo, y sin duda alguna en la actualidad, los O-ring se han convertido en los dispositivos más usados para sellar líquidos y gases. De ahí que los factores más importantes para el diseño son: la geometría de la ranura donde se va a depositar el elastómero, las tolerancias del ensamble, el material y la geometría del sello, la rugosidad de la superficie y la presión del fluido de trabajo. Es importante seguir todas las normas que rigen el diseño de estos componentes.

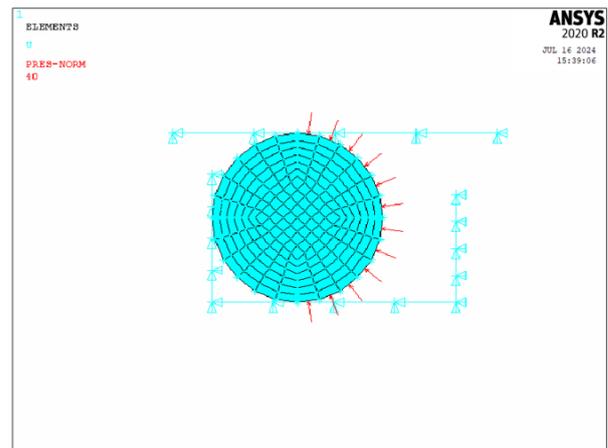


Figura 28: Modelo de Elemento Finito del Inyector de Aceite.

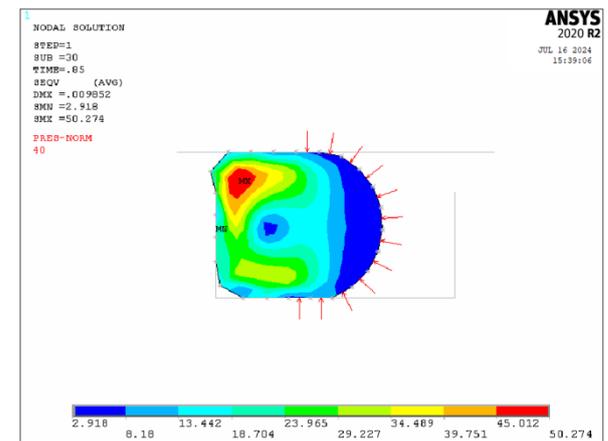


Figura 29: Esfuerzos Efectivos (von Mises, 50.3 PSI Máx.) en el Sello.

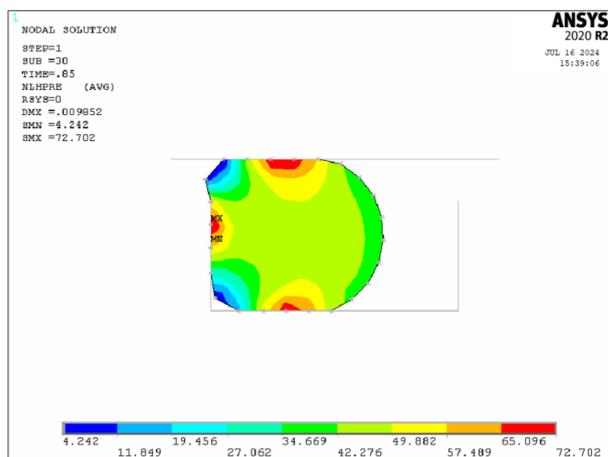


Figura 30: Presión Hidrostática en el Sello (73 PSI Máx.).

El estudio indica que geometría juega un papel importante en los niveles de aplastamiento del sello, con el diseño de experimentos se pudo verificar que los factores que influyen considerablemente en el diseño de este tipo de dispositivos de sellado son: la geometría de la ranura, la superficie de contacto de la pieza acoplada al sello, y las tolerancias dimensionales que definen los claros de las piezas de acoplamiento. Este tipo de estudios con el uso de diseño de experimentos, nos ayudan a entender el comportamiento del sistema de sellado, y obtener las ecuaciones de regresión de diferentes respuestas del sistema, para poder hacer optimizaciones y rediseños de manera muy fácil y rápida, además de poder evaluar un diseño

en el cual una de las piezas esté fuera de tolerancia y evaluar su efecto en las diferentes respuestas del sistema.

Finalmente, la simulación en elemento finito es muy importante, ya que se obtuvo la respuesta (Fuerzas de Reacción sobre las Paredes) anticipada de un elastómero bajo una carga compresiva para diferentes secciones transversales de los sellos más comunes usados en la industria aeroespacial. El estudio muestra que el diámetro interno del sello no juega un papel importante en las fuerzas de reacción, la sección transversal es el parámetro más importante para esta respuesta, el estudio muestra que a mayor diámetro de sección transversal mayor será la fuerza de reacción, lo cual requerirá de mayor fuerza para ensamblarlo y desensamblarlo. Además, el estudio en elemento finito nos indica si el sello puede estar comprometido estructuralmente hablando por esfuerzos efectivos excesivos. Si hizo un análisis para inyector típico, bajo presión excesiva, mostrando esfuerzos muy por debajo de su resistencia, lo cual indica que el sello no es comprometido de manera estructural, por lo que el sellado es asegurado.

En la industria, muchas de las fallas en este tipo de sellado, es debido a diseños inadecuados que no toman en consideración todos los factores que pueden ocasionar una falla en un sello tipo “O”. Para determinar la causa de la falla es muy importante analizar el tipo de diseño, si es un sello estático axial o radial, si es un sello dinámico axial o radial, las dimensiones de la ranura, el material del sello, procedimientos de instalación, etc. A continuación, se muestran enlistan los tipos de fallas más comunes en O-rings: 1) Abrasión, 2) Compresión, 3) Degradación Química, 4) Extrusión, 6) Daño en la Instalación, 7) Esponjamiento, 8) Sobre compresión, 9) Falla en espiral, y 10) Degradación Térmica. Los ingenieros de diseño están conscientes que las fallas de los *O-rings* son críticas. La habilidad para resolver estos problemas puede ahorrar tiempo para regresar el equipo a la línea de producción, o rediseñar el sistema de sellado de un proceso. Es por eso, que es muy importante seguir todas las recomendaciones descritas en este documento para evitar fallas en este tipo de sellos. La simulación en elemento finito es vital para obtener datos importante en el diseño y solucionar fallas. Los resultados obtenidos en ANSYS para las fuerzas de reacción son muy aproximados a los encontrados en la literatura (Eriks Sealing Elements, 2024).

Agradecimientos

Agradecimientos a las empresas ESSS y ANSYS por la entrega de las licencias de softwares de simulación ANSYS que se han utilizado para el desarrollo de este trabajo en el marco de la colaboración para la generación de un ecosistema científico tecnológico en torno a las herramientas de CAE en Querétaro.

Referencias

- Aerospace Standard AS568, (2020), “Aerospace Size Standard for O-rings. Avalione, E.A., & Baumberg III, t. (1996) “Manual del Ingeniero Mecánico”, Mc Graw Hill, Novena Edición, pp 8-143, 8-146.
- Christensen, N. A. (1939), Packing, Patente US2180795A.
- Edison, T. A. (1880), Electric-Lamp, Patente No. 223898.
- Eriks Sealing Elements, (2024), “Precision O-ring Technical Manual”, <https://o-ring.info/en/home/>.
- Globalrubber.com (s.f.), “O-ring History Theory and Applications”, https://globalrubber.com/wp-content/uploads/2023/08/pt01_oring_history_and_theory-1.pdf
- Oberg, E. (2012). “Machinery’s Handbook”, 29th Edition, Industrial Press, pp 2482-2487.
- O-ring West, (2024), “O-Rings and Custom Molded Rubber”, <http://www.oringswest.com/>
- Parker O-ring & Engineered Seals Division (2021). *Temperature Range for Common Elastomeric Materials* [Imagen]. En P.H. Corporation. Parker O-ring Handbook (p. 20). Cleveland: Parker.
- Rubber and Accessories, “O-rings”, <http://www.rubberandaccessories.com/o-rings.htm>.
- SAE Inc., (2022), “Aerospace Recommended Practice, ARP1231”, Society Automotive Engineers Inc.
- SAE Inc., (2001), “Aerospace Recommended Practice, ARP1232”, Society Automotive Engineers Inc.
- SAE Inc., (2021), “Aerospace Recommended Practice, ARP1234”, Society Automotive Engineers Inc.
- Seals Eastern, Inc., “O-ring Application Design Guidelines”, <http://www.sealseastern.com/OringDesign.asp>
- Wojciech Szczypinski & Janusz Lubas, “Tribological Characteristic of a Ring Seal with Graphite Filler”, MDPI Materials, DOI:10.3390/ma13020311, January 2020.