

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

T E S I S P R O F E S I O N A L

**“ANÁLISIS TERMO-ESTRUCTURAL DE VÁLVULAS DE ESCAPE CON
CAVIDADES INTERNAS”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

CÁNDIDO VARGAS SÁNCHEZ

ASESOR INTERNO:

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN

ASESOR EXTERNO:

DR. JOSÉ OMAR DÁVALOS RAMÍREZ

CUERNAVACA, MORELOS

MAYO, 2018

ÍNDICE

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Justificación	4
1.4	Planteamiento del problema	5
1.5	Alcances	5
Capítulo 2	Estado del arte	6
Capítulo 3	Marco teórico	11
3.1	Sistema de distribución de un MCI	11
3.1.1	Elementos exteriores	11
3.1.2	Elementos interiores	13
3.2	Diseño, funcionamiento y características de las válvulas de un MCI	14
3.3	Transferencia de calor	17
3.3.1	Transferencia de calor por conducción	17
3.3.2	Transferencia de calor por convección	18
3.4	Método del elemento finito	18
3.5	Solución computacional por medio del MEF	22
Capítulo 4	Metodología	25
4.1	Características de la válvula	25
4.2	Modelo de elemento finito de las válvulas	27
Capítulo 5	Resultados	35
5.1	Análisis en válvula sólida	35
5.2	Análisis en válvula hueca	44

Conclusiones	55
Recomendaciones	56
Bibliografía	57

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los motores de combustión interna (MCI) funcionan a través de lo que se conoce como Ciclo de Otto que se realiza en 4 pasos que son: admisión, compresión, combustión y expulsión. En el proceso de admisión, los pistones del motor realizan una carrera descendente y aspiran aire de la atmósfera hacia los cilindros en donde abren las válvulas de admisión y permiten su entrada. El aire se mezcla con el combustible, el que comúnmente puede ser gasolina o diésel. Posteriormente el pistón asciende hasta el punto muerto superior y al llegar ocurre una reducción de volumen por lo cual la mezcla contenida en él es comprimida. Dentro de los cilindros se encuentran unas bujías que son las encargadas de generar la chispa requerida para provocar la combustión de la mezcla. Esto solo aplica para cuando el combustible usado es gasolina ya que, con diésel, la presión de la cámara es suficiente para provocar la combustión. La presión que se genera debido a la explosión impulsa al pistón desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior y transmite la potencia hacia un cigüeñal por medio de bielas. Finalmente, el ciclo termina con el recorrido del pistón desde su posición en el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior. Durante este último recorrido, los gases son acarreados hasta el conducto de salida en donde ocurre la apertura de las válvulas por donde son expulsados hacia el múltiple de escape. A fin de disminuir las emisiones contaminantes, el múltiple de escape conduce los gases hasta un

convertidor catalítico donde ocurre un proceso de catálisis donde se convierten los hidrocarburos, monóxidos de carbono y óxidos de nitrógeno en CO₂ y vapor de agua.

Las válvulas de admisión y de escape son fundamentales para garantizar el funcionamiento adecuado de los MCI. A través de ellas se controla la admisión de la mezcla aire-combustible y la expulsión de los gases después de que ocurre la combustión. Se encuentran ubicadas a la entrada del cilindro y son abiertas a través del árbol de levas.

Las válvulas reciben cargas estructurales debido a la presión que ejerce el resorte que ajusta su posición dentro del motor. Esta carga es constante. También, durante el tiempo de apertura reciben cargas a través de la leva que las accionan, la cual varía de acuerdo con el grado de apertura de la válvula, siendo máxima en el tiempo que la válvula permanece abierta completamente.

También, las altas temperaturas dentro del cilindro provocan cargas térmicas en las válvulas, especialmente en las de escape. Las válvulas de admisión disipan calor a través del aire que entra en la cámara de combustión. Sin embargo, las válvulas de escape no presentan un mecanismo para tal propósito, por lo que se ven afectadas en mayor grado por las altas temperaturas. Una carga más que se presenta es la presión de los gases de combustión sobre la cara de la válvula.

Las fallas en las válvulas provocan que el funcionamiento del motor sea deficiente, incrementa el consumo de combustible, una mayor emisión de contaminantes y

desgaste prematuro de sus componentes debido al desbalanceo de fuerzas durante el ciclo de funcionamiento.

En la actualidad, un desafío para los diseñadores de motores es la reducción del peso de sus componentes. Se han implementado cambios en la geometría de las válvulas para reducir su peso. Uno de los más recientes es hacer válvulas con cavidades internas. Sin embargo, éstas deben de ser lo suficientemente resistentes para soportar las condiciones de trabajo, especialmente las de las válvulas de escape.

En este trabajo se realiza un análisis por elemento finito de los esfuerzos termo-mecánicos en una válvula de escape de un MCI. Se presenta la comparación de los resultados en un modelo de válvula con cavidad interna en la cabeza y cara y en un modelo con cavidad completa. Los estudios se realizan en condiciones de válvula abierta ya que es en esta posición donde las cargas son máximas. El material escogido para la válvula fue Nimonic 80[1]el cual es un material que cuenta con propiedades favorables para condiciones térmicas extremas, así como su resistencia a esfuerzos mecánicos.

1.2 Objetivos

Realizar un análisis por medio de elemento finito para conocer el estado de esfuerzos termo-mecánicos en válvulas de escape con cavidades internas que operan un MCI.

Objetivos particulares

- Generar los modelos con y sin cavidades de las válvulas de escape
- Conocer las condiciones de operación del MCI aplicables a la válvula
- Identificar la distribución de temperaturas en el cuerpo de la válvula de escape con y sin cavidades
- Obtener los esfuerzos térmicos y mecánicos en la válvula de escape con y sin cavidades

1.3 Justificación

Resulta importante conocer el estado de esfuerzos en las válvulas de escape de los MCI ya que de esta manera se garantiza su integridad estructural y se evitan fallas en su funcionamiento. Esto toma mayor importancia en modelos que cuentan con cavidades internas. Por lo tanto, con el análisis que se propone, se conocerán las condiciones de esfuerzos térmicos de las válvulas de escape con cavidades de distintas dimensiones. Los resultados darán información de cómo afectan, tanto a la distribución de temperatura como a los esfuerzos termo-mecánicos, los cambios realizados en la geometría lo cual servirá para futuros diseños con miras a mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna.

1.4 Planteamiento del problema

Las válvulas realizan el control de la admisión de aire y el escape de los gases de combustión por lo que son críticas para garantizar el desempeño adecuado de un MCI. Las cargas que experimenta son de tipo térmico por los gases de combustión y estructurales por los elementos mecánicos que se utilizan para su sujeción y

apertura. La combinación de esas cargas puede provocar que se alcancen los esfuerzos de fluencia causando la deformación permanente del componente y por consiguiente se presente una variación en el tiempo de apertura de la válvula. En el caso de que se reduzca el tiempo de apertura los gases de combustión no saldrán en su totalidad del cilindro combinándose con la nueva mezcla que estará entrando en el siguiente paso del ciclo, lo cual elevará su temperatura provocando variaciones en la combustión. Por el contrario, si la válvula permanece más tiempo abierta, una parte del flujo entrante podrá salir por el conducto de escape reduciendo la cantidad de mezcla para la combustión. En ambos casos se esperaría una pérdida de potencia del motor, variaciones en las fuerzas inerciales y desbalanceo de las partes rotatorias lo cual ocasionaría desgaste prematuro de dichos componentes, incremento del consumo de combustible y una mayor cantidad de emisiones contaminantes.

1.5 Alcances

Este proyecto es un estudio termo-estructural en válvulas de escape de motor de combustión interna con cavidades aplicando el método del elemento finito. Los resultados se concentran en la distribución de temperaturas, el flujo de calor y los esfuerzos térmicos. El estudio es de tipo transitorio y ofrece información acerca del estado de esfuerzos que presentan las válvulas durante el proceso de calentamiento dentro del motor de combustión interna.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

La investigación y el estudio de las válvulas tanto de admisión y escape, abarca muchos aspectos, desde el diseño, la aplicación de nuevos materiales y recubrimientos, análisis de flujo, vida útil, temperatura, esfuerzos, por mencionar algunos. En este capítulo, se presentan los trabajos más importantes que se encontraron en la literatura derivado de una revisión bibliográfica.

Sonsino[2] presentó un estudio en el cual se analiza la factibilidad de emplear válvulas hechas de nitruro de silicio en función de la fatiga de materiales. Concluye que es factible la utilización de este tipo de material.

Karamangilet *al.*[3] presentaron un estudio en el cual recubren la cabeza de la válvula con película de carbón con el fin de estudiar los efectos que se presentan en la temperatura y esfuerzos de válvulas de MCI. Encontraron que, con el tipo de recubrimiento utilizado, se presentó una reducción en la diferencia de temperaturas en la superficie de la cabeza de la válvula de 5°C a 1°C aumentando el espesor de la capa de carbón de 50 μ m a 0.1 mm. Lo anterior repercute en una reducción de esfuerzos térmicos.

Ramalhoet *al.* [4] analizaron los efectos de temperaturas mayores a 400°C durante el impacto y deslizamiento entre una válvula de escape con su asiento dentro del motor. Encontraron un significativo incremento en el volumen de desgaste a

medida que se incrementa la temperatura. Así mismo, encontraron restos de óxido en la zona de contacto entre ambas superficies.

Lujan[5] realizó un análisis de falla de una válvula de escape en un motor a diésel. Los resultados mostraron marcas de playa características de la falla por fatiga. Encontró zonas irregulares con depósitos de carbón en la cara de la válvula resultado de la combustión que coincidieron con las zonas donde se encontró una mayor concentración de esfuerzos.

Badami y Marino [6] realizaron un estudio en un MCI con válvulas hechas con aleación de titanio, γ -TiAl. Su estudio se enfoca principalmente en el análisis del desgaste de las válvulas de dicho material con y sin tratamiento térmico. Sus estudios muestran que existe un incremento en la relación potencia -peso del motor debido a la baja densidad del material. Sin embargo, encontraron defectos por porosidades en las válvulas que no recibieron tratamiento térmico lo cual provocó su falla prematura.

Panget *al.* [7] realizaron un estudio analizando los esfuerzos que ocurren en válvulas de escape sujetas a cargas de resorte, temperatura, presión de gases de combustión y el impacto durante el cierre de la válvula utilizando el método del elemento finito. Encontraron que existe una relación lineal entre la velocidad de cierre de la válvula y la magnitud de los esfuerzos en el vástago.

Gawaleet *al.* [8] realizaron un estudio para el diseño de válvulas de motores diésel analizando los esfuerzos y deformaciones mediante el método del elemento finito. En sus resultados, muestran que es en la zona donde se forma el arco entre el

vástago y la cara de válvula, donde ocurre una mayor concentración de esfuerzos. Encontraron que, modificando la magnitud del radio, se reduce hasta en un 14% la magnitud de los esfuerzos.

Sharma *et al.* [9] estudiaron diferentes composiciones para recubrimientos en válvulas de motores diésel. Los compuestos utilizados fueron NiCrAl y MgO en diferentes proporciones. Sus estudios reportan que se obtiene una reducción tanto en los esfuerzos térmicos en dirección radial, así como en la temperatura máxima encontrada cuando la composición está dada por los siguientes porcentajes NiCrAl 30% y MgO 70% debido a la baja conductividad térmica en la válvula por el recubrimiento.

Cavaleri *et al.* [10] desarrollaron un método para determinar el desgaste en el asiento de las válvulas de MCI basados en pruebas experimentales y el método del elemento finito. Su método se basa en considerar las dos principales causas del desgaste de válvulas que son el impacto de la válvula con el asiento y el deslizamiento en esa superficie de contacto. Reportaron que cuando el ángulo entre la zona de contacto es negativo, ocurre deformación plástica. Por lo cual recomiendan para cuestiones de diseño evitar ángulos negativos.

Sharma *et al.* [11], desarrollaron un algoritmo para la predicción de la distribución de temperaturas y el flujo de calor en válvulas de motores diésel. Los cálculos se llevaron a cabo con el motor funcionando a diferentes cargas, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y carga completa. Encontraron que la máxima y mínima temperatura se localizan en la cabeza y la punta de la válvula.

Kale y Deshpande[12], estudiaron la influencia de la geometría y el tipo de material en la vida útil y fatiga de válvulas de MCI. Variaron el diámetro de la válvula utilizando los materiales Inconel 625, aleación de Titanio, y aleación de Níquel-Cromo-Molibdeno. Determinaron que el cambio de material presenta un mayor impacto en la fatiga de la válvula siendo la aleación de Níquel-Cromo-Molibdeno el material que presentó un comportamiento más favorable.

Rajkumar[13] realizó un estudio mediante dinámica de fluidos computacional para evaluar la distribución de temperaturas en dos modelos de válvulas con cavidades. Ambos modelos de cavidades se localizan en el vástago. La diferencia radica en que una cavidad es continua y otra discontinua. Sus resultados indican una distribución más uniforme de la temperatura en el caso de la cavidad discontinua. Sin embargo, dicho diseño presenta mayores costos de fabricación debido a lo complejo que resulta unir ambas partes de la válvula.

Cooper *et al.* [14] presentan el diseño de válvulas de escape con cavidades, de MCI, manufacturadas mediante capas aditivas. Evaluaron sus resultados a través de micro-tomografía computarizada. Concluyen que a través de esta técnica de manufactura se obtiene una reducción del 20% en el peso de las válvulas. Adicionalmente, los resultados mostraron que no hubo indicios de fractura o daño interno en las válvulas manufacturadas con dicho método. Sin embargo, se presentó un incremento considerable en la magnitud de los esfuerzos térmicos.

Sharma *et al.* [15], estudiaron un modelo de válvula con cavidad mediante un algoritmo diseñado para tal propósito. Los resultados que analizan son el flujo de calor, la temperatura en las válvulas y los esfuerzos en dirección radial. Reportan

que existe una mayor ganancia de calor en la válvula con cavidad en la región del vástago. Sus resultados los llevaron a cabo con materiales convencionales.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 Sistema de distribución de un MCI

El sistema de distribuciones parte fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del MCI. Regula la entrada y salida de los fluidos con que funciona el MCI por lo que además cumple la función de regular los tiempos de operación de muchos componentes. Los elementos que forman el sistema de distribución se clasifican en: elementos exteriores y elementos interiores.

3.1.1 Elementos exteriores

Los elementos exteriores son los mecanismos que sirven de conexión entre el cigüeñal, y la admisión y escape del aire y los gases respectivamente. Se compone de: árbol de levas, elementos de mando, empujadores, balancines, seguidores. Estos componentes pueden variar dependiendo del tipo de configuración del MCI.

- **Árbol de levas.** Tiene como función controlar la apertura y cierre de las válvulas. Consiste en un eje sobre el cual se encuentran montadas levas las cuales son las que realizan la labor del árbol. Recibe el movimiento del cigüeñal a través de un sistema de engranes. La velocidad de giro del árbol de levas debe de ser la mitad del giro del cigüeñal, por lo que se deduce que, por cada dos vueltas del cigüeñal, el árbol girará una vez.

- Elementos de mando. Son los sistemas que transmiten potencia desde el cigüeñal al árbol de levas. Constan de un engrane piñón solidario al cigüeñal y de un engrane rueda, solidario al árbol de levas. El elemento que conecta a ambos engranes puede ser una correa dentada o cadena.
- Empujadores, varilla y balancines. Este tipo de componentes se encuentran en aquellos motores que no cuentan con el árbol de levas colocado en la cabeza del motor. En estos casos, las levas ejercen su efecto sobre el taque el cual empuja una varilla conectada a los balancines que al recibir impulso sobre un extremo generan la apertura de las válvulas.
- Los seguidores se encuentran solamente en motores con árbol de levas a la cabeza. Tienen la función de transmitir el movimiento de la leva para la apertura o cierre de las válvulas.

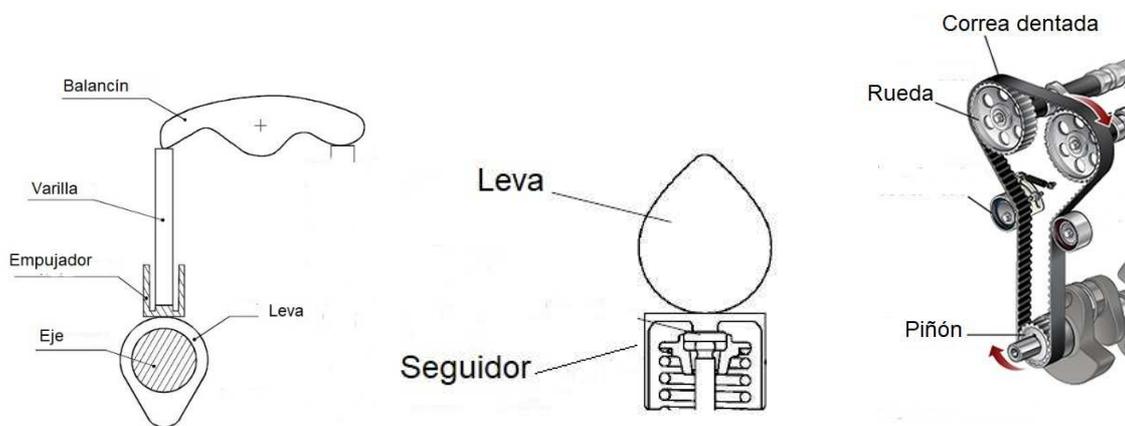


Figura 3.1 Elementos externos del sistema de distribución.

3.1.2 Elementos interiores

Los elementos internos consisten en las válvulas de admisión y escape y los componentes en que se apoyan para realizar dicha labor: resorte, retén, seguros, guía y asiento.

- Válvulas. Regulan la admisión y escape de los gases de combustión
- Resorte. Tienen como función principal abrir las válvulas de admisión y escape. Esto lo hacen mientras se comprimen debido a la fuerza que sobre el ejercen las levas. También, mantienen a las válvulas en posición dentro del MCI a través de una compresión inicial del resorte.
- Retén. Ensamblan al resorte con la válvula. En el caso de motores con balancín, el retén recibe el impulso directo de las válvulas. Para levas con seguidores, este se acopla con el retén.
- Los seguros realizan la función de cuñas para fijar la válvula al retén.
- Guía. La guía tiene dos funciones principales. Su primera función es centrar la válvula para evitar que tenga desplazamientos laterales. La segunda función principal es disipar calor del vástago de la válvula.
- Asiento. El asiento sirve como tope del desplazamiento de la válvula durante el cierre. También, disipa calor de la zona donde hace contacto con la válvula.

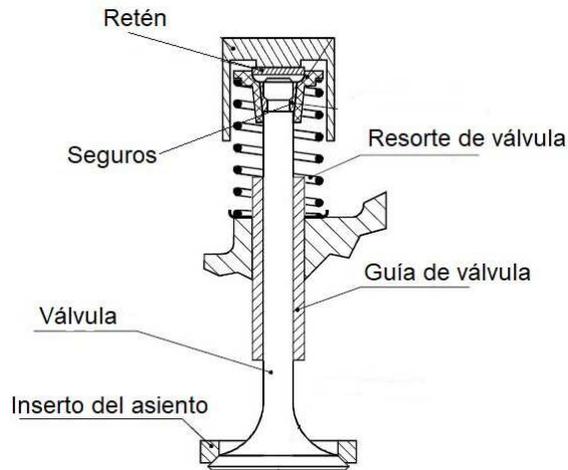


Figura 3.2 Elementos internos del sistema de distribución.

3.2 Diseño, funcionamiento y características de las válvulas en MCI

Las válvulas deben de ser diseñadas a detalle a fin de garantizar un funcionamiento adecuado del MCI. Esto se debe al impacto negativo que puede causar deficiencias en la operación de las válvulas: pérdidas de potencia, incremento en las emisiones contaminantes y desgaste prematuro de otros componentes. Las válvulas se clasifican en admisión y escape, donde por una de ellas ingresa el aire del exterior y por la otra se expulsan los gases de combustión respectivamente (Figura 3.3). En sus dimensiones, se distinguen en el tamaño siendo más pequeñas las válvulas de escape ya que la cantidad de moléculas a la salida es menor que a la entrada, por lo cual no se requiere un tamaño similar entre ambas válvulas [16].



Figura 3.3 Válvulas de admisión y escape.

En su geometría ambos tipos de válvulas no presentan diferencias entre ellas. Las zonas que las componen son las mismas para ambas. Estas zonas que componen a una válvula son: la cabeza, cara, cuello, vástago, ranuras de fijación y punta, estas se presentan en la Figura 3.4.

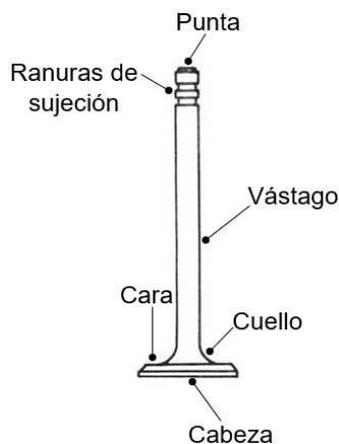


Figura 3.4 Zonas de la válvula.

Las válvulas de escape son las que se enfrentan a una mayor carga térmica ya que a través de ellas fluyen los gases de combustión a altas temperaturas. En el caso de las válvulas de entrada, el aire que circula por ellas sirve para reducir su temperatura disminuyendo considerablemente la carga térmica.

Además de las cargas térmicas las válvulas experimentan esfuerzos debido al empuje proveniente de los resortes, la reacción en las ranuras de sujeción y los esfuerzos de contacto en la zona del asiento de válvula.

Las condiciones de operación que se mencionaron hacen necesario contar con válvulas resistentes que al mismo tiempo sean ligeras con el fin de reducir el peso global del motor y para reducir las cargas inerciales que se producen durante su recorrido. La opción para reducir el peso de las válvulas es la selección de materiales cuya densidad sea menor a la de materiales convencionales. Además, las características que deben tener estos materiales se encuentran las siguientes [17,18]:

- Alta resistencia y dureza para resistir las cargas de tensión y desgaste en el vástago.
- Resistencia a la corrosión.
- Coeficiente de expansión térmica elevado para reducir los esfuerzos térmicos en la cabeza de válvula.
- Resistencia a la fatiga y al efecto Creep.

Los materiales que cumplen con estas características generalmente son aleaciones de los cuales se pueden destacar:

- Titanio. Se utiliza debido a que reduce en 45% el peso de las válvulas. Se emplea en aleaciones junto con cobre y molibdeno. Se aplica generalmente en vehículos de alto desempeño.

- Nimonic 80A. Es un material de aleación que puede trabajar con temperaturas superiores a 1000°C.
- Inconel. Suele utilizarse en motores turbocargados o que funcionan con óxido nitroso.

3.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor se relaciona con la manera en que ocurre la ganancia o pérdida de energía en un cuerpo. El calor puede transferirse por tres métodos diferentes: conducción, convección y radiación [19].

3.3.1 Transferencia de calor por conducción

La conducción de calor se presenta en cuerpos sólidos. En este mecanismo, se transmite calor a través del contacto interno de las moléculas de un sólido yendo desde la parte de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. A la expresión matemática que define la conducción de calor se le conoce como ley de Fourier[19]:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad 3.1$$

donde

q es la rapidez con la que se transfiere el calor, k es la constante de proporcionalidad y está representada por la conductividad térmica del material, A es el área de la sección transversal del sólido y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura en dirección del flujo de calor.

3.3.2 Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección ocurre entre dos sustancias líquidas, dos gaseosas o un gas y un líquido siempre y cuando exista una diferencia de calor entre ellas. Este proceso puede ocurrir también entre un líquido o un gas con una superficie sólida. De acuerdo con la mecánica de fluidos, puede forzarse esa transferencia de calor cuando ocurre un diferencial de presiones en el fluido, a dicho proceso se le llama convección forzada. La convección cuando es el caso de un fluido sobre un sólido se define por la ley de enfriamiento de Newton [19]:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad 3.2$$

En la expresión 3.2 se relaciona la rapidez con que se transfiere calor por convección q con la diferencia de temperaturas entre la pared y el fluido $(T_w - T_\infty)$. El valor h representa el coeficiente de calor por convección que está definido por las condiciones dinámicas del fluido y A representa el área transversal del volumen que se está analizando.

3.4 Método del elemento finito

El método del elemento finito es un método numérico que en la actualidad es ampliamente utilizado en el análisis y estudio de fenómenos dentro de la ingeniería. A través de él, es posible obtener una solución aproximada de un sistema de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de un medio continuo sometido a cargas y que por su complejidad geométrica no es posible resolverlo por medios analíticos.

Para la aproximación de una solución por medio del MEF, el objeto de estudio debe de plantearse como un medio continuo discretizado, por lo que el modelo matemático que describa a dicho medio será un conjunto de funciones continuas [20].

Una vez definido el medio continuo, este es discretizado, lo cual consiste en la división del dominio en pequeños subdominios llamados elementos finitos, los cuales se conectan entre sí por medio de nodos (Figura 3.5).

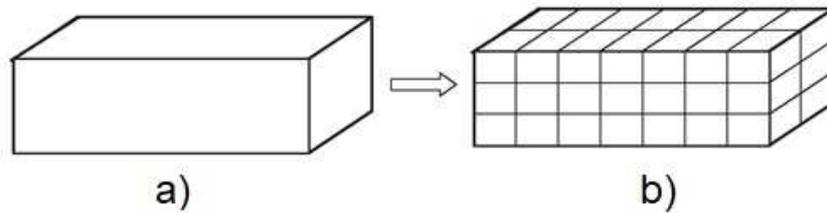


Figura 3.5 Ejemplo de discretización o mallado.

Al discretizar el continuo, se obtiene el modelo de elemento finito que es sobre el cual se realizan los cálculos matemáticos. El tipo de elementos finitos puede variar y depende entre muchas otras cosas de las características del análisis que se quiera llevar a cabo. En el caso de vigas pueden ocuparse elementos unidimensionales, para el caso de placas delgadas se desprecia el espesor y se simula con elementos bidimensionales los cuales pueden ser triangulares o cuadriláteros. Para análisis tridimensionales se utilizan elementos tetraedros o elementos hexaedros. Otra característica que puede variar es la cantidad de nodos que contenga cada elemento (Figura 6).

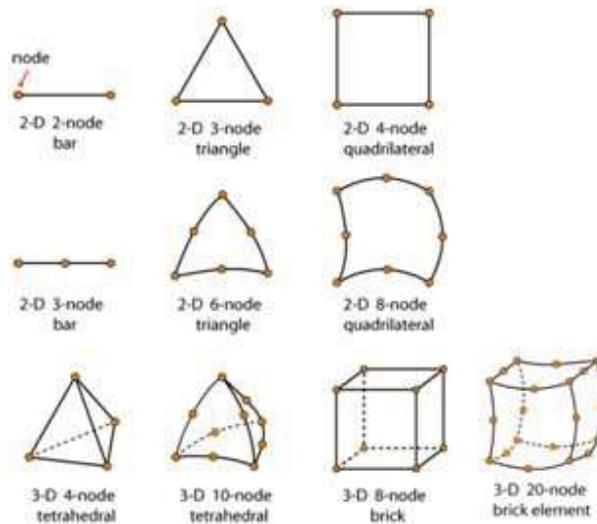


Figura 3.6 Tipos de elementos finitos

La discretización del medio continuo es vital para realizar el análisis ya que es sobre cada elemento que se realiza el cálculo de deformaciones cuando se somete a una carga determinada. Estas deformaciones se transmiten entre los elementos vecinos a través de los nodos que los unen. Cada una de las deformaciones en los elementos es representada de forma matricial tal como se expresa en la Ecuación 3.3:

$$[f]^e = [k]^e [u]^e \quad (3.3)$$

donde

$[f]$: es el vector columna que actúa sobre el elemento, dependiendo del tipo de análisis puede referirse a una fuerza, carga térmica, eléctrica, etc.

$[k]$: Es la matriz de rigidez en donde se concentran las propiedades del material como pueden ser el módulo elástico, conductividad térmica, conductividad eléctrica, etc.

$[u]$: es el vector que define el desplazamiento, la temperatura o cualquier otra variable de estado.

El superíndice e representa el número de nodos del que está compuesto el elemento de estudio. La expresión 3.3 representa la fuerza actuante en un solo elemento, por lo que, para obtener un resultado en todo el dominio, se requiere juntar todas las matrices de cada elemento en una matriz, la cual queda expresada en la ecuación 3.4:

$$[F] = [K][U] \quad (3.4)$$

donde

$[F]$: representa el vector de fuerzas en cada uno de los nodos que componen el dominio.

$[K]$: representa el ensamble de todas las matrices de rigidez del dominio y se le conoce matriz de rigidez global.

$[U]$: es el vector de desplazamientos de los nodos.

De la solución de la matriz, se obtiene el desplazamiento (para el caso particular de un análisis de esfuerzos) que experimenta cada uno de los nodos. Una vez conocido el desplazamiento es posible conocer el resultado de fuerza o esfuerzo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{F}{A} = P = E\varepsilon \quad (3.5)$$

donde

F : es la fuerza en cada nodo

A : es el área de la sección transversal del dominio

P : es la presión o esfuerzo

E : es el módulo de elasticidad del material

ε : es la deformación obtenida del ensamble de las matrices en cada nodo

3.5 Solución computacional por medio del método del elemento finito

El ensamble y solución de las matrices del método del elemento finito, en casos de geometrías complejas, requiere de algoritmos bastante robustos que llevan tiempo para desarrollarlos y además consumen tiempo computacional. El desarrollo de equipo de cómputo de alta velocidad de procesamiento junto con opciones de softwares comerciales ha contribuido a realizar análisis cada vez más complejos en casos de ingeniería. En la actualidad existen una gran cantidad de opciones de paquetes computacionales, basados en el MEF, que pueden ser ocupados para resolver problemas dentro de la ingeniería. Entre esas opciones podemos identificar a Ansys, Nastran, Abaqus, Adams, Solidworks, Pro-Engineer, entre muchos otros.

El proceso para llevar a cabo un análisis se realiza en tres pasos que son: Pre-proceso, proceso o solución y postproceso.

- Pre-proceso. Consiste en establecer el modelo de elemento finito sobre el cual se realizará el análisis. Para esto se genera una geometría en un programa de diseño asistido por computadora (CAD). La totalidad de las opciones de paquetes de elemento finito cuentan con módulos CAD lo cual permite realizar ese procedimiento dentro del mismo programa. Sin embargo, existe la opción de realizarla en otros cuyo uso está más extendido y es posible exportar las geometrías, en diferentes formatos, al programa de elemento finito. Posterior a la generación de la geometría se realiza su discretización que es donde se obtiene el mallado del modelo geométrico sobre el cual se resuelven las ecuaciones correspondientes. Al igual que con CAD, se tiene la opción de generar la malla dentro del programa de elemento finito o generarla fuera e importarse en los formatos adecuados. Cabe mencionar que esta parte del proceso es la más importante ya que de acuerdo con la calidad de la malla será la calidad de los cálculos que se lleven a cabo en el programa. Posteriormente se selecciona el tipo de material con sus respectivas propiedades que corresponden al caso de análisis. Después de tener el modelo discretizado con el material seleccionado, se colocan las condiciones de frontera. Esta parte depende del tipo de análisis a realizar. En el caso de análisis de esfuerzos, las condiciones de frontera pueden ser cargas aplicadas sobre el dominio como son fuerzas, presiones, desplazamientos, momentos, etc. Adicionalmente, se deben de colocar las restricciones o sujeciones adecuadas sobre el dominio y que correspondan al evento o situación ingenieril que se está modelando. Para el caso de análisis térmicos, las

condiciones de frontera corresponden a temperaturas, coeficiente de transferencia de calor por convección, radiación, generación de calor, flujo de calor, entre otras. En este tipo de análisis no se requieren sujeciones o restricciones. En algunos casos será necesario poner algunas condiciones iniciales.

- Proceso o solución. Es en esta parte donde se resuelven las ecuaciones correspondientes. Esto lo realiza el algoritmo del programa de elemento finito, sin embargo, la confiabilidad de los resultados dependerá de que tan bien se haya realizado el pre-proceso.
- Post-proceso. Esta parte del análisis corresponde a la representación, evaluación y análisis de los resultados. Los resultados que se obtuvieron se representan a manera de contornos, gráficas o tablas. La correcta evaluación y análisis de los resultados depende en gran medida del conocimiento que se tenga sobre la teoría de elemento finito y sobre el fenómeno físico que se está estudiando.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1 Características de la válvula

La válvula usada en esta investigación pertenece a un motor diésel[21] y cuenta con las dimensiones nominales que se presentan en la Figura 4.1.

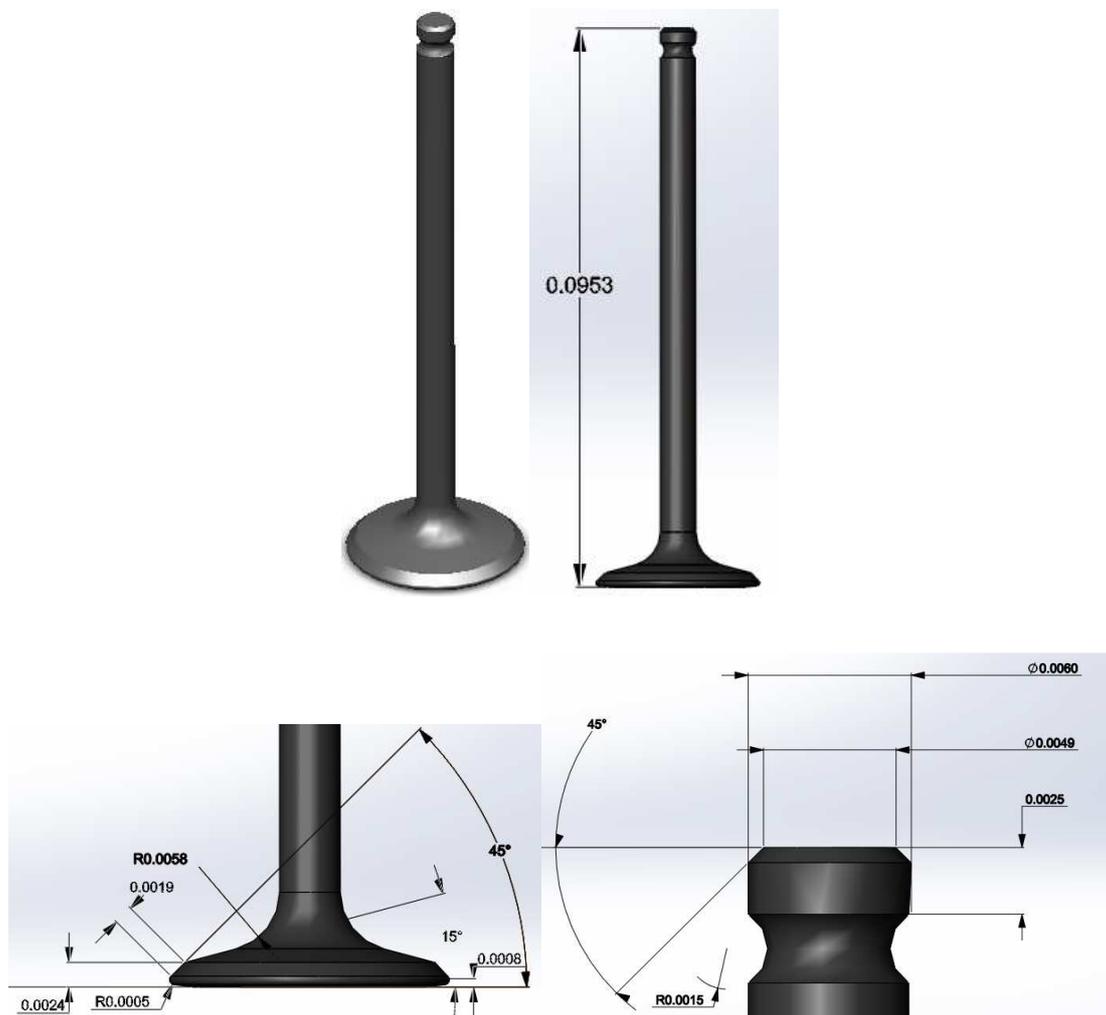


Figura 4.1 Dimensiones de la válvula en mm.

Las características de los componentes del motor y las condiciones de operación utilizadas para este análisis se presentan en la Tabla 4.1 [21]:

Tabla 4.1 Características de los componentes y condiciones de operación del motor.

Componente	Valor
Diámetro de pistón (mm)	87.3
Longitud de biela (mm)	130
Número de cilindros	4
Relación de compresión	8.6
Apertura de válvula (mm)	9.5
Velocidad del motor (RPM)	4700
Relación aire/combustible	14.7
Potencia (hp)	66
Carrera del pistón (mm)	66.7
Velocidad media del pistón (m/s)	10.4

Los modelos de válvula con cavidades que se emplearon contaban ambas con un espesor de pared de 1 mm. La cavidad del primer modelo, denominado C_H , se concentró en la zona de cabeza, cara y cuello en la parte interna de la válvula. La cavidad del segundo modelo, denominado C_F , abarcó todo el cuerpo de la válvula desde la cabeza hasta la punta. Ambos ejemplos junto con la válvula sólida y la masa de cada una de ellas se presentan en la Figura 4.2.

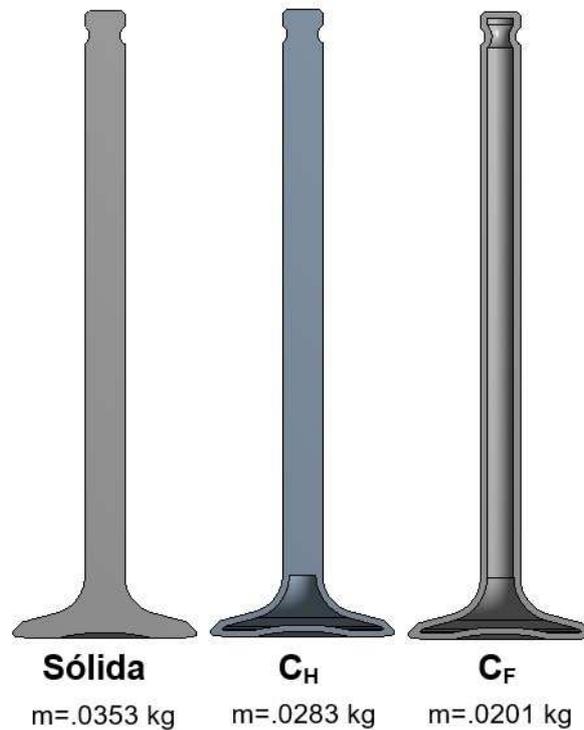


Figura 4.2 Modelos de válvulas.

4.2 Modelo de elemento finito de válvulas

Para el análisis de esfuerzos mediante elemento finito se utilizó el software Ansys en el cual se realizaron dos análisis por cada modelo de válvula, uno de ellos de tipo térmico y el otro de tipo estructural, siendo ambos en estado transitorio con duración de 5 minutos. Este tiempo se determinó a prueba y error condicionado a alcanzar el estado estacionario. Los dos análisis se realizan ya que, para conocer los esfuerzos térmicos, es necesario conocer la distribución de temperaturas en el cuerpo de la válvula lo cual se obtiene a través del análisis térmico mientras que en

para el análisis estructural gracias a la facilidad del software de enlazar ambas opciones.

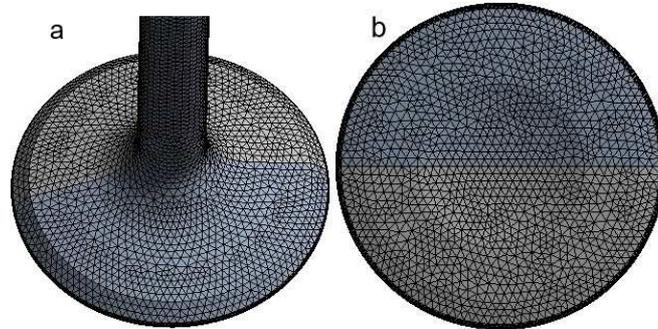


Figura 4.4 Discretización de la válvula, a) cabeza, b) cara.

El material seleccionado para el análisis fue una aleación Nimonic 80A. Este material es de los más usados en aplicaciones automotrices de alto desempeño y específicamente, en válvulas tanto de admisión como de escape. Existe la opción de otros materiales como la aleación de titanio, la cual es una de las aleaciones más eficientes para este tipo de aplicaciones, sin embargo, su uso se presenta principalmente en vehículos con motores turbocargados y con requerimientos específicos los cuales no están disponibles para la realización de un análisis. Por lo que, se decidió utilizar el material antes mencionado. La composición química y propiedades mecánicas se presentan en las Tablas 4.2 y 4.3 respectivamente.

Tabla 4.2 Composición química del material Nimonic 80A [23].

	Nimonic 80A
Níquel, Ni, (%)	69
Cromo, Cr (%)	18-21
Hierro, Fe (%)	<=3
Cobalto, Co (%)	<=3
Titanio, Ti (%)	1.8-2.7
Aluminio, Al (%)	1-1.8

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas del material Nimonic 80 A [23].

	Nimonic 80 A
Módulo de elasticidad (GPa)	220×10^9
Coefficiente de Poisson	0.28
Coefficiente de expansión térmica (K^{-1})	14.5×10^{-6}
Conductividad térmica (W/mK)	13
Esfuerzo de fluencia (MPa)	780

Para el análisis térmico, la transferencia de calor se aplicó mediante convección de los gases de combustión hacia el cuerpo de la válvula. Los datos se obtuvieron

de la investigación realizada en[21]. Debido a que es en la condición de válvula abierta cuando se encuentra una mayor exposición a los gases de combustión, el estudio se realizó en dicha condición.

Las condiciones de frontera térmicas se aplican en la cabeza de la válvula, la cara, el vástago y la punta. La mayor concentración de temperatura se encuentra en la cabeza debido a la exposición directa de esta a los gases de combustión. La cara de la válvula a pesar de que también se encuentra en contacto directo con los gases, recibe una menor carga térmica con respecto a la cabeza debido a la pérdida de calor de los gases en su recorrido hacia el múltiple de escape. En el vástago de la válvula, la temperatura se reduce considerablemente, la condición de frontera que se aplica en este caso considera la transferencia de calor entre la guía y la válvula. Mientras que, en la punta, la transferencia de calor es mínima debido a lo alejado entre ella y la región por donde circulan los gases de escape. La localización de las zonas donde se aplicó la transferencia de calor por conducción en el cuerpo de la válvula, así como su magnitud se presentan en la Figura 4.5 y la Tabla 4.4 respectivamente.

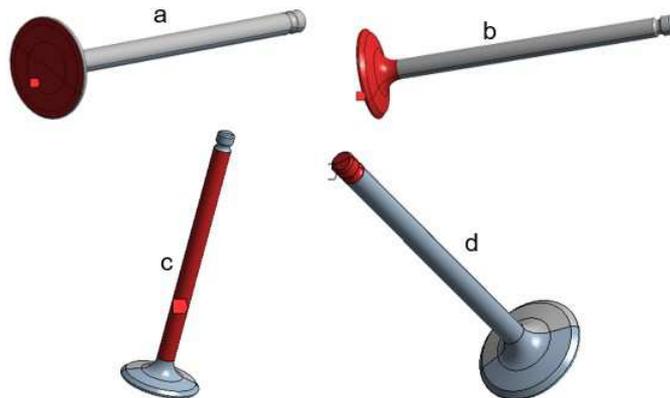


Figura 4.5 Transferencia de calor por convección en el cuerpo de la válvula, a) cabeza, b) cara, c) vástago, d) punta.

Tabla 4.4 Magnitudes del coeficiente de convección y temperatura aplicadas como cargas térmicas.

	h (W/m ² °C)	T (°C)
Cabeza	490	800
Cara	340	760
Vástago	170	90
Punta	12	30

Una vez concluido el análisis térmico, la distribución de temperaturas fue exportada como carga térmica para llevar a cabo el análisis estructural. Además de la temperatura, fueron consideradas tres cargas adicionales que actúan cuando

la válvula se encuentra en condición de apertura. La primera carga ocurre debido a los resortes que la mantienen abierta, dicha carga genera una reacción en la posición donde se alojan los seguros de fijación de válvulas. La segunda carga corresponde a la ejercida por la leva sobre el retén y que se transfiere hacia la punta de la válvula. Esta fuerza toma su valor máximo cuando la válvula se encuentra completamente abierta. Dicha posición fue la considerada para este análisis. La tercera carga corresponde a la presión que ejercen los gases de combustión sobre la superficie de la cabeza de la válvula. De acuerdo con el trabajo presentado por Charan y Kumar[22], este valor es aproximado a 1.7 MPa para las condiciones y dimensiones de la válvula de estudio.

El modelo fue restringido en la ranura de fijación de los seguros ya que en esa zona es donde se encuentra sujeta la válvula por los seguros. El tipo de restricción fue de soporte fijo que restringe traslación y rotación en todos los ejes. Debido a que el análisis se realiza con la válvula en posición abierta, se descartan los efectos de contacto con el asiento de válvula. En caso de que se realizara un análisis con la válvula en condición cerrada se recomienda agregar un soporte fijo en la región del asiento. La zona de aplicación de las cargas y las magnitudes se presentan en la Figura 4.6 y Tabla 4.5 respectivamente.

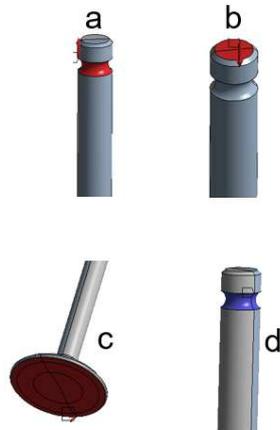


Figura 4.6 Localización de cargas y restricciones, a) carga debido al resorte, b) carga debido al árbol de levas, c) carga debido a los gases de combustión, d) soporte fijo.

Tabla 4.5 Magnitud de cargas en la válvula.

Tipo de carga	Magnitud
Carga debido al resorte	500 N
Carga debido al árbol de levas	200 N
Carga debido a los gases de combustión	1.7 MPa

Los resultados que se obtienen de ambos análisis y que se presentan son la distribución de temperaturas, la distribución y magnitudes de los esfuerzos termo-mecánicos y el factor de seguridad. En un inicio se realiza un análisis con la válvula completamente sólida a fin de garantizar que resiste las condiciones de operación. Una vez validado lo anterior, se realiza el análisis en las válvulas con cavidades.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En esta investigación se presentan los resultados de un análisis térmico-estructural para conocer el estado de esfuerzos termo-mecánicos en un modelo de válvula de escape con cavidades utilizando como material Nimonic 80 A. Como

primer paso se garantiza que el material es ideal para funcionar bajo las condiciones de operación requeridas. Esto se realiza empleando un análisis en una válvula sólida. Una vez validado, se procede a realizar el estudio en las válvulas con cavidades. Los resultados de los análisis descritos se muestran a continuación.

5.1 Análisis en válvula sólida

En la Figura 5.1 se presenta la comparación de la temperatura máxima y mínima durante el tiempo de análisis. Se observa que es aproximadamente en un minuto cuando la temperatura máxima se estabiliza y no presenta cambios considerables. La temperatura máxima que se alcanza es superior a 700°C. La temperatura mínima se encuentra debajo de los 100°C y se estabiliza en un tiempo de 100 segundos

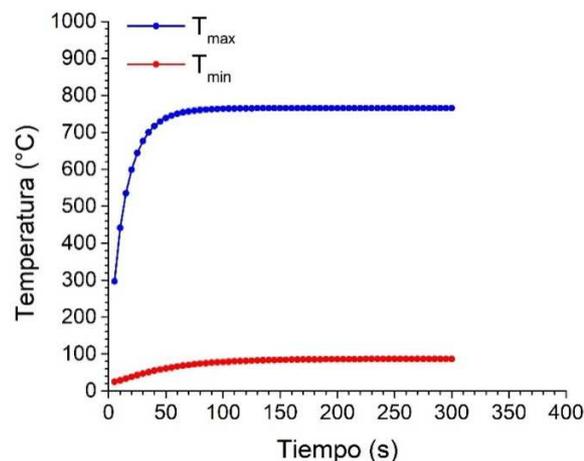


Figura 5.1 Variación de T_{max} y T_{min} .

En la Figura 5.2, se presentan los gradientes de temperatura entre la temperatura de combustión y la temperatura máxima en la válvula y entre las temperaturas

máximas y mínimas. Los datos presentados sirven para definir en qué punto se podrán encontrar los esfuerzos térmicos, ya que estos, ocurren de acuerdo con diferencias de temperaturas. Se observa que, con respecto a los gases de combustión, la diferencia de temperatura alcanza su punto máximo apenas iniciado el análisis, esto se debe a que la baja temperatura inicial de la válvula favorece alcanzar elevados gradientes de temperatura en tiempos cortos. Este gradiente se mantiene constante en un tiempo que coincide con la estabilización de la temperatura máxima. En el caso de la diferencia de temperaturas en el sólido, este empieza a reducir conforme la temperatura máxima y mínima se estabilizan. Lo anterior ocurre cerca de los 120 segundos. Se observa que la diferencia de temperatura es grande manteniéndose en un valor promedio de 680°C. Esto se atribuye a que los gases de escape solamente afectan la zona de cabeza y cara de la válvula y sus efectos son despreciables en el vástago y la punta. Cabe mencionar que el coeficiente de convección sobre el vástago considera la disipación de calor que ocurre en su guía por lo que la transferencia de calor en esa zona se reduce drásticamente. Ante tales temperaturas puede afirmarse que en caso de no dejar enfriar completamente el motor de un vehículo después de un recorrido, antes de volver a ponerlo en marcha, los ciclos de esfuerzos térmicos pueden incrementarse considerablemente llevando a disminuir la vida útil de la válvula.

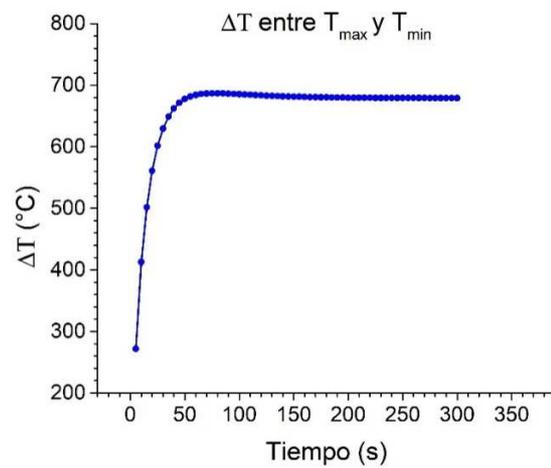
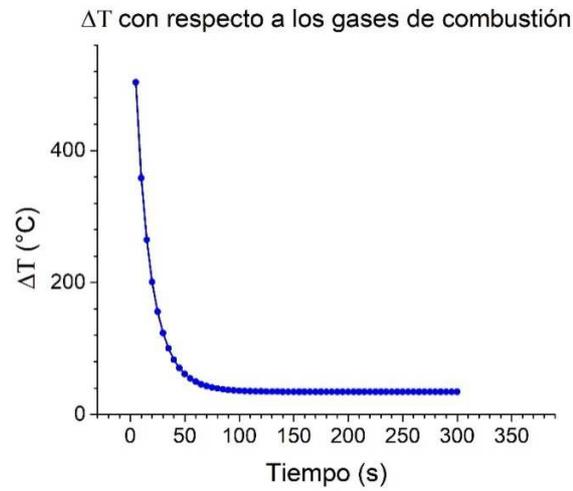


Figura 5.2 Gradientes de temperatura.

El flujo de calor se presenta en la Figura 5.3. Se observa que hay correspondencia entre el incremento, la reducción y la estabilidad con relación a la variación de las temperaturas. Los valores son elevados debido a la gran concentración de calor que provocan los gases.

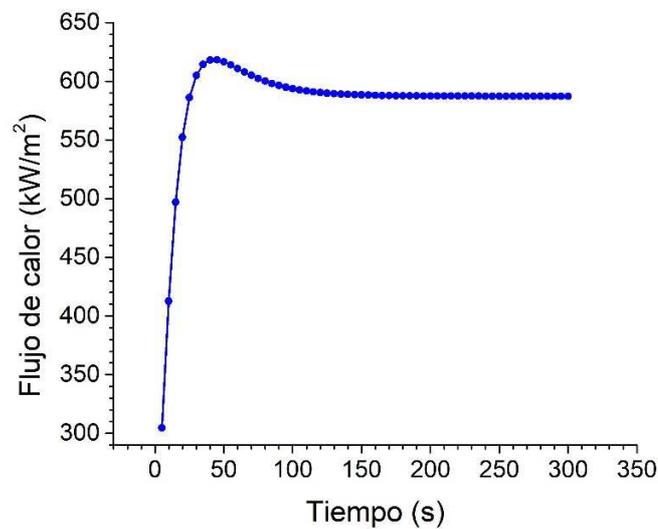


Figura 5.3 Flujo de calor en válvula.

Los esfuerzos termo-mecánicos más elevados se presentan en un tiempo aproximado de 10 segundos (Figura 5.4). Lo anterior coincide con el máximo gradiente de temperatura de los gases de combustión. De acuerdo con la teoría que indica que los esfuerzos ocurren debido a gradientes de temperaturas, puede concluirse que el resultado es correcto ya que se observa el mismo comportamiento. Durante los arranques en frío será cuando más se encuentre sometido a esfuerzos el motor, aunque el tiempo es mínimo, la acumulación de ciclos puede conducir una falla por fatiga. Los esfuerzos se reducen después de un tiempo de dos minutos y mantienen cambios mínimos después de este tiempo.

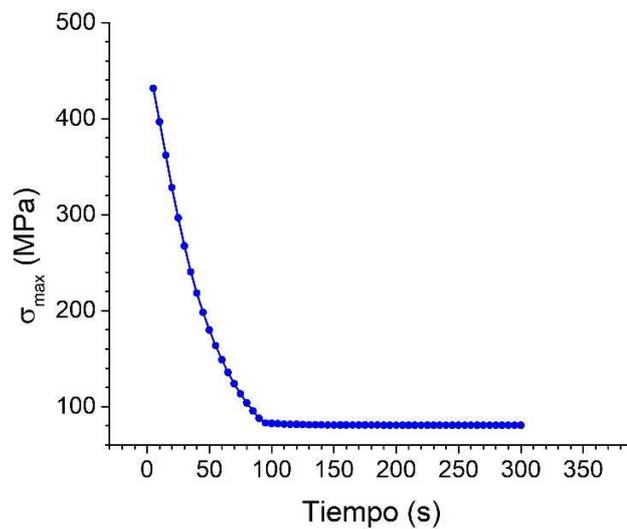


Figura 5.4 Esfuerzos termo-mecánicos en la válvula.

La magnitud de los esfuerzos presenta valores que en el caso de materiales convencionales puede conducir a la falla. Debido a que el Nimonic 80 cuenta con propiedades que lo hacen resistente a altas temperaturas y a elevados esfuerzos, se justifica su utilización en este tipo de análisis. A manera de evaluar los esfuerzos, se presentan las variaciones del factor de seguridad (Figura 5.5). El resultado coincide con los esfuerzos presentados ya que es durante el arranque cuando este es menor. El valor mínimo durante el arranque es cercano a 2, lo que indica que el diseño es seguro, sin embargo, debe de ponerse especial atención en el diseño de la válvula a fin de incrementar este valor ya que puede considerarse una falla en caso de trabajar en condiciones fuera de diseño.

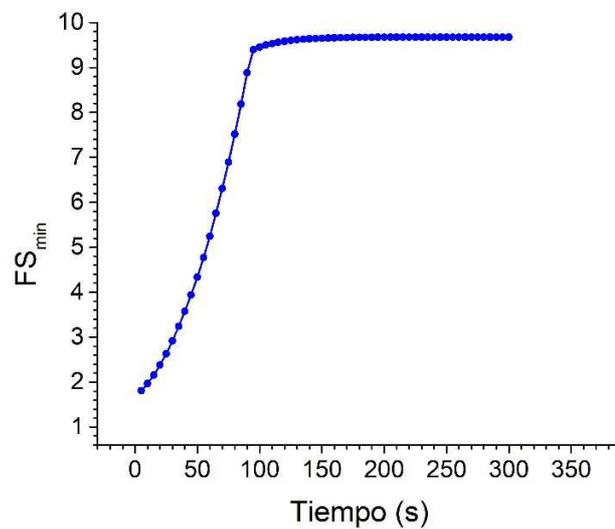


Figura 5.5 Factor de seguridad de la válvula.

La distribución de la temperatura y del flujo de calor el momento de que ocurre el máximo esfuerzo se presenta en la Figura 5.6. La mayor concentración de temperatura se encuentra en el contorno de la cabeza. Hacia el centro de esta, la temperatura disminuye lo cual puede atribuirse a su forma cóncava. En la zona del vástago la temperatura presenta un incremento mínimo de 2°C. Resalta el incremento considerable de la temperatura hasta 300 °C en un tiempo breve de 6 segundos.

El flujo de calor se concentra principalmente en el cuello de la válvula ya que al ser de menor área facilita el flujo. También, la zona de la cabeza al recibir de manera directa los efectos de los gases de combustión, presenta una gran concentración de flujo de calor. En las ranuras de sujeción y la punta, el flujo disminuye ya que, aunque tienen una menor área, la transferencia de calor en esa zona es menor que en las demás zonas.

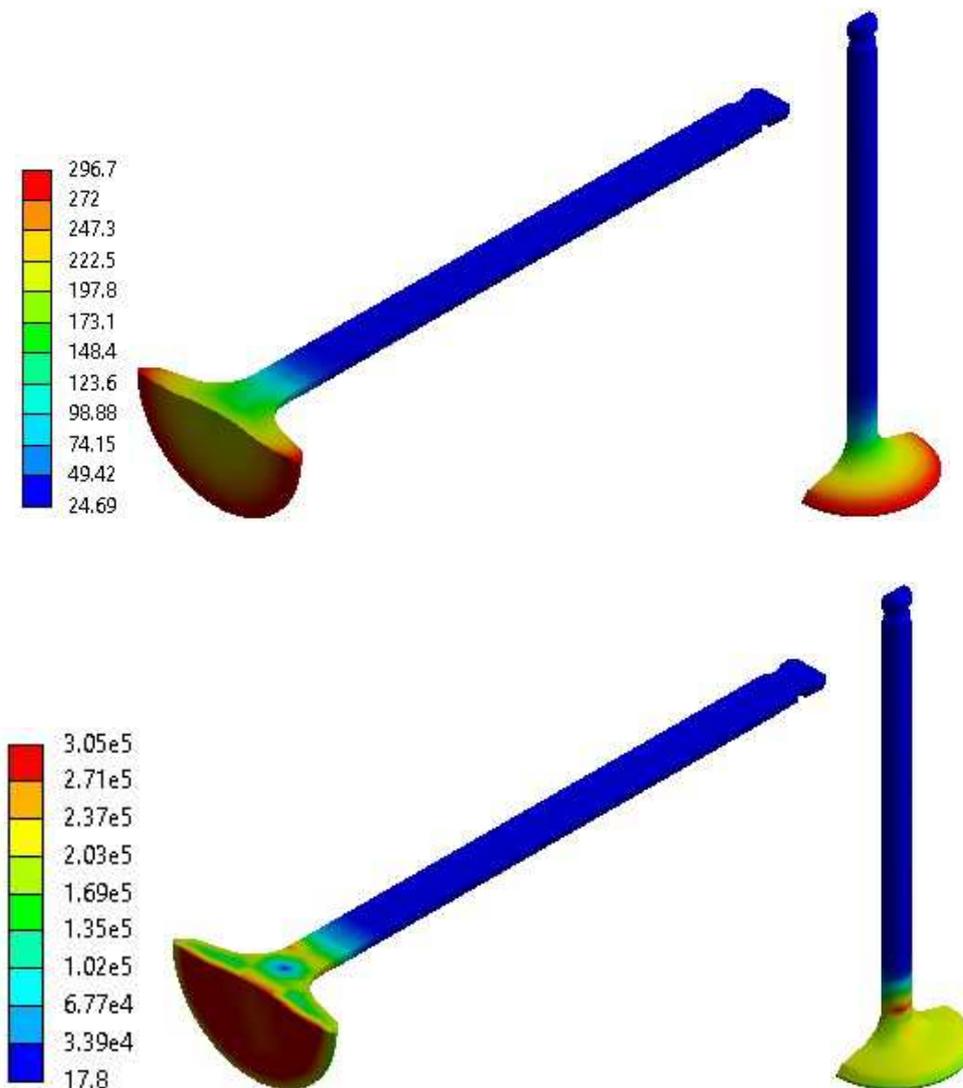


Figura 5.6 Distribución de temperaturas (superior) y de flujo de calor (inferior).

Los esfuerzos máximos son presentados en la Figura 5.7. Los esfuerzos se concentran principalmente en la zona de la sujeción de la válvula. Esto se explica por la aplicación de las cargas en esas zonas. En el vástago los esfuerzos son mínimos, mientras que en la zona de la cabeza y la cara empiezan a incrementarse.

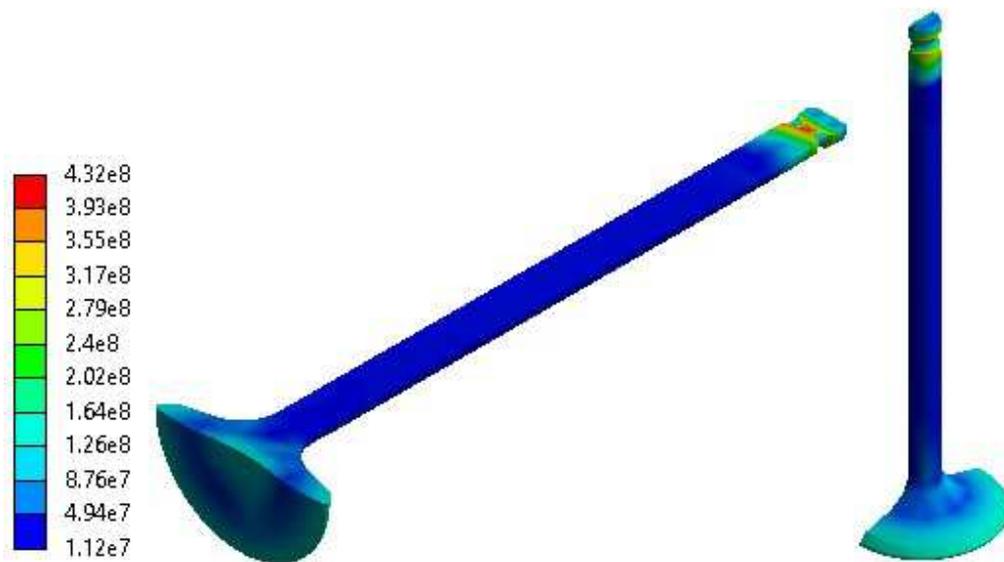


Figura 5.7 Distribución de esfuerzos en válvula.

La deformación al momento cuando ocurre el esfuerzo máximo muestra que existe una mayor deformación en las orillas de la cabeza y disminuye a medida que se acerca al centro. En el vástago la deformación disminuye siendo cero en la zona de los seguros coincidiendo con la zona de esfuerzo máximo (Figura 5.8).

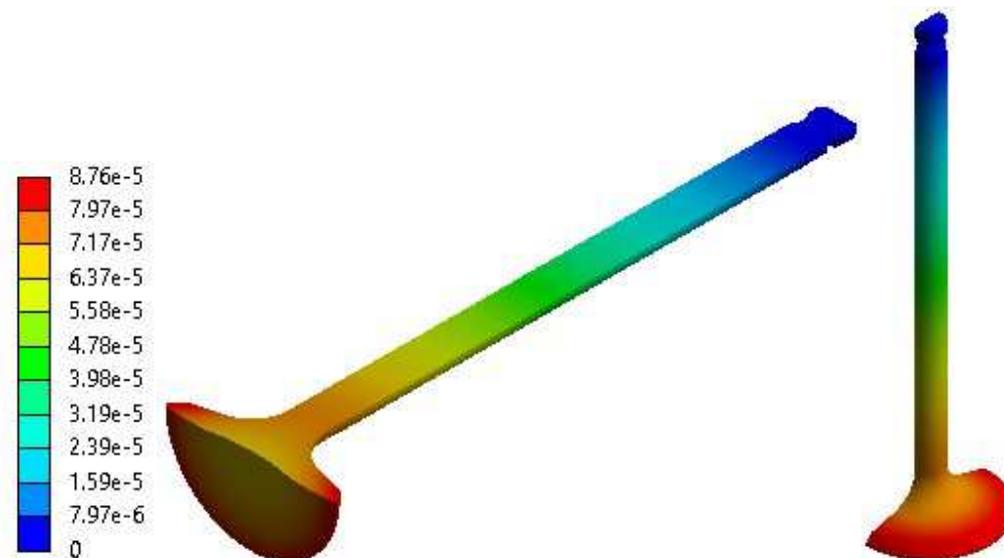


Figura 5.8 Deformación de válvulas.

El factor de seguridad (Figura 5.9) define un valor máximo de 1.8 que se localiza en la zona de sujeción de válvula. La parte del vástago es la parte más segura ya que los resultados ahí son los valores más elevados. De los resultados se observa que no hay magnitudes que indiquen deformación permanente o alguna zona crítica.

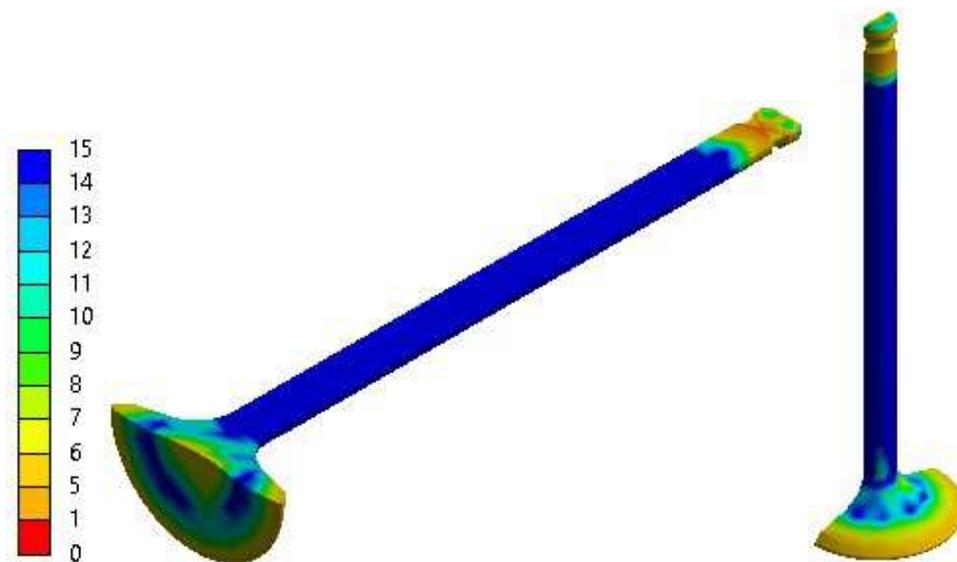


Figura 5.9 Factor de seguridad.

Una vez concluido el análisis de la válvula sin cavidad, los resultados indican que durante su funcionamiento no ocurrirán fallas ya que, de acuerdo con el factor de seguridad, este presenta un valor de 1.8 lo que representa un estado de esfuerzos adecuado para soportar las cargas de operación en un MCI.

Con el modelo validado se puede formular el siguiente análisis en el que las válvulas contarán con cavidades. Un modelo con cavidad únicamente en la cabeza y otro modelo con cabeza y vástago

5.2 Análisis en válvulas con cavidades

La Figura 5.10 presenta la comparación de la temperatura máxima alcanzada en las válvulas con cavidades. El resultado es similar ya que la transferencia de calor por convección ocurre en la superficie exterior que es donde se concentra la mayor temperatura y los cambios que se realizaron fueron hacia el interior de la válvula.

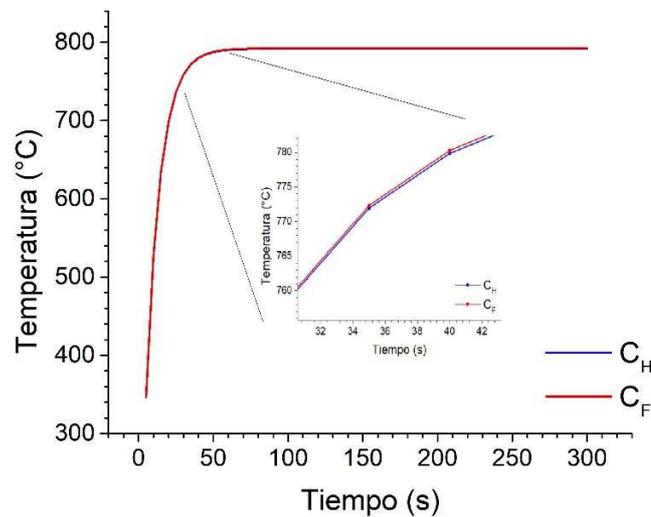


Figura 5.10 Temperatura máxima en válvulas con cavidades.

En la temperatura mínima si se presentan variaciones (Figura 5.11). La válvula C_H presenta una menor temperatura con respecto a la C_F durante los primeros tres minutos, pasando este tiempo comienza su estabilización y adicionalmente la temperatura es superior a la C_F. La estabilización de la válvula C_F se alcanza a los dos minutos y la diferencia máxima entre ambas válvulas es de siete grados a los 60 segundos.

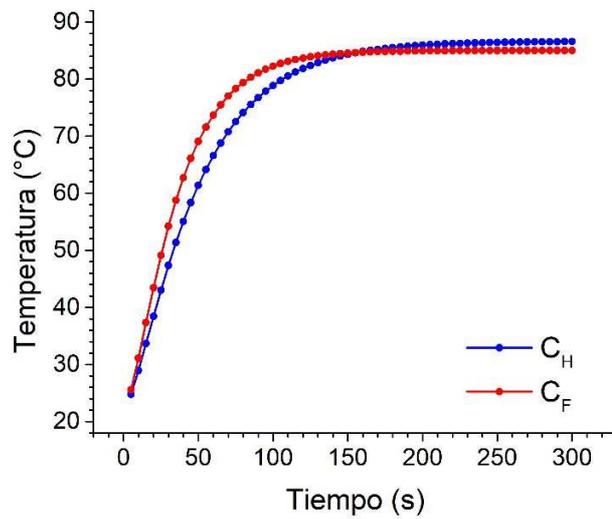


Figura 5.11 Temperatura mínima en válvulas con cavidades.

La diferencia de temperaturas entre la temperatura máxima y mínima se presenta en la Figura 5.12. Al ser menor la temperatura en la válvula con cavidad en la cabeza, su diferencia es mayor que en la válvula con cavidad completa. Ambas diferencias son superiores a los 700°C y dejan de incrementar a los tres minutos.

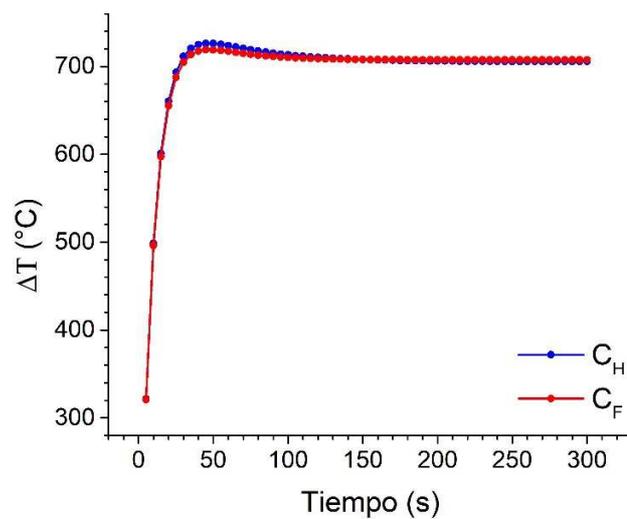


Figura 5.12 Diferencia de temperaturas en válvulas con cavidades.

El flujo de calor muestra una considerable diferencia entre ambas válvulas (Figura 5.13). Esto se debe a que, el área de la válvula C_H es mayor, como consecuencia el tiempo para alcanzar la estabilización del flujo aumenta en el caso de la válvula mencionada, presentando una diferencia aproximada de un minuto. Adicionalmente, la reducción en el área del vástago coincide con que es ahí donde hay una menor transferencia de calor, lo cual reduce aún más el flujo.

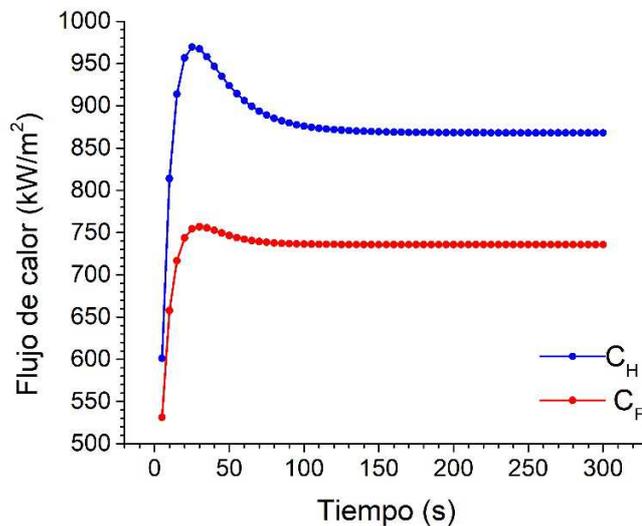


Figura 5.13 Flujo de calor en válvulas con cavidades.

Los resultados muestran el impacto de la reducción de área en las válvulas en la transferencia de calor hacia el interior de la válvula. La válvula C_F al tener un área menor, alcanza su estabilidad con mayor rapidez que la válvula C_H la cual tiene una menor área. La diferencia también se observa en la diferencia de temperatura.

Los esfuerzos máximos durante el análisis se presentan en la Figura 5.14. Los resultados muestran un incremento considerable en la magnitud de esfuerzos en la válvula con cavidad en la cabeza, aproximadamente 150 MPa. A pesar de

contar con una mayor área, lo que podría considerarse que reduciría los esfuerzos, la diferencia de temperatura es mayor en el cuerpo de la válvula lo cual incrementa los esfuerzos. Lo anterior indica que son los esfuerzos térmicos los que tienen un mayor impacto en la magnitud de los esfuerzos. También se considera que la estabilización de los esfuerzos ocurre en un tiempo menor a un minuto lo cual resulta benéfico para la válvula ya que al momento de alcanzar ese estado, la válvula C_H aún se encuentra 100 MPa arriba, lo cual reduce la vida útil de la válvula, más aún si se considera que el estudio se realiza en arranque en frío.

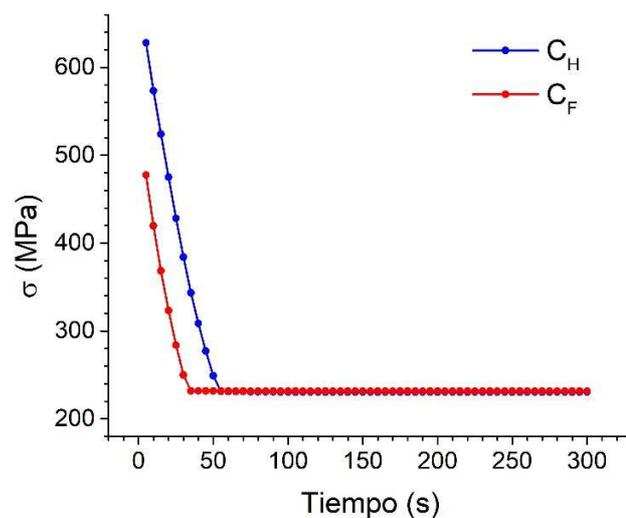


Figura 5.14 Esfuerzos máximos en válvulas con cavidades.

El factor de seguridad muestra una reducción en las válvulas C_H y C_F con respecto a la válvula sólida. La válvula con cavidad en la cabeza se aproxima a uno mientras que la válvula con cavidad completa se encuentra en 1.6. Si bien ambos valores teóricamente no presentarían falla, el caso de C_H debe de tomarse en

cuenta una mejora en el diseño a fin de evitar la falla ya que de acuerdo con el resultado se encuentra cercade la zona de fluencia. También se observa que C_H tarda más tiempo en salir de la zona de factores de seguridad bajos lo cual la hace más propensa a acumular daño. Estos resultados coinciden con los observados en la magnitud de esfuerzos.

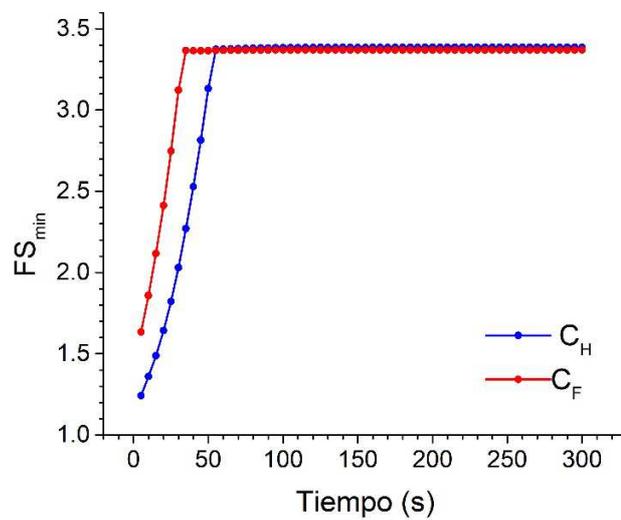


Figura 5.15 Factor de seguridad en válvulas con cavidades.

La comparativa de la distribución de temperaturas en el cuerpo de las válvulas con cavidades se presenta en la Figura 5.16. La principal diferencia radica en la zona interna por la parte de unión del cuello con el vástago. En la válvula C_H , el vástago no recibe transferencia de calor por la parte inferior ya que, al ser hueca, no hay material en esa zona. Debido a esa razón, al momento en que ocurre el esfuerzo máximo la zona de unión ha enfriado en mayor proporción hacia el vástago. La temperatura máxima es la misma, mientras que la temperatura mínima presenta una diferencia menor a un grado centígrado.

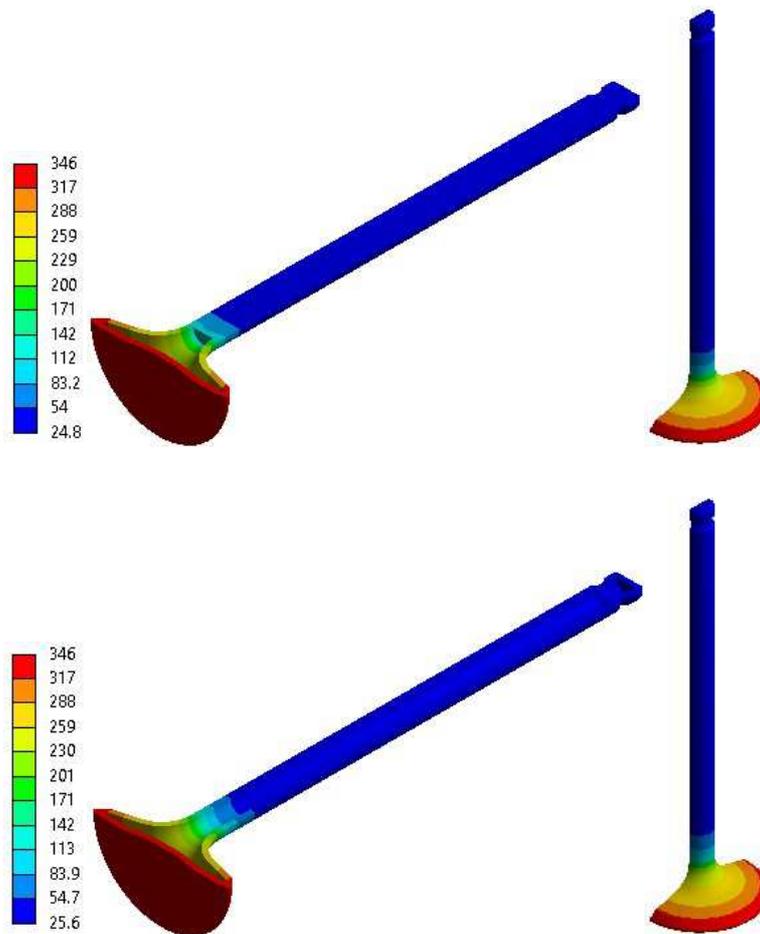


Figura 5.16 Distribución de temperaturas en válvulas con cavidades.

El efecto mencionado anteriormente para la distribución de temperaturas se repite en el flujo de calor en C_H (Figura 5.17). la parte del vástago recibe solo flujo de calor de la parte lateral. Debido a eso se observa un punto en el centro de dicha zona. También se observa un mayor flujo de calor hacia la parte superior del vástago en C_F . La zona de mayor flujo en ambos casos es la parte externa del cuello, sin embargo, presentan diferentes magnitudes, siendo mayor la de C_H .

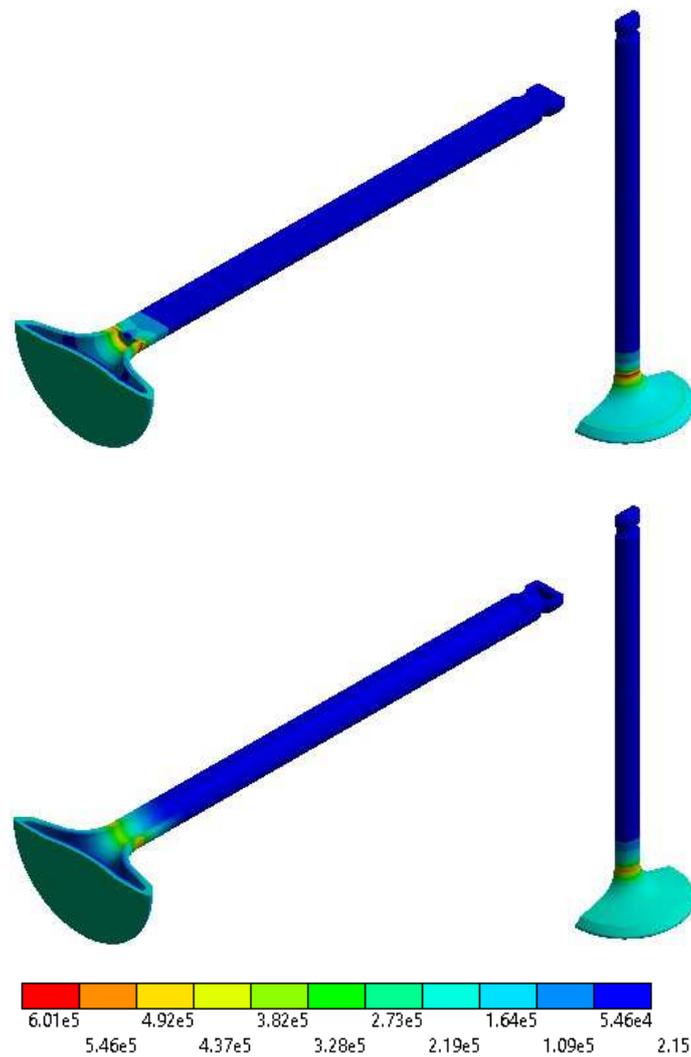


Figura 5.17 Distribución del flujo de calor en válvulas con cavidades.

La mayor concentración de esfuerzos ocurre en la zona de los seguros y en la zona de la cara alrededor del cuello. Sin embargo, las magnitudes son diferentes para cada válvula, siendo mayor para la C_H y menor para C_F (Figura 5.18). Tanto la zona del vástago como la cabeza permanecen con esfuerzos mínimos. En el caso de la cabeza es a la orilla donde se aprecia un ligero incremento. Sin embargo, esto no implica que posteriormente, y con incrementos de temperatura en dichas superficies, sea ahí donde se presenten los esfuerzos máximos, aunque

con menores magnitudes ya que los datos que se presentan son los correspondientes al mayor esfuerzo durante el análisis. A fin de observar mejor los esfuerzos, en la Figura 5.19, se presenta un acercamiento a la zona de sujeción de las válvulas en ambos modelos.

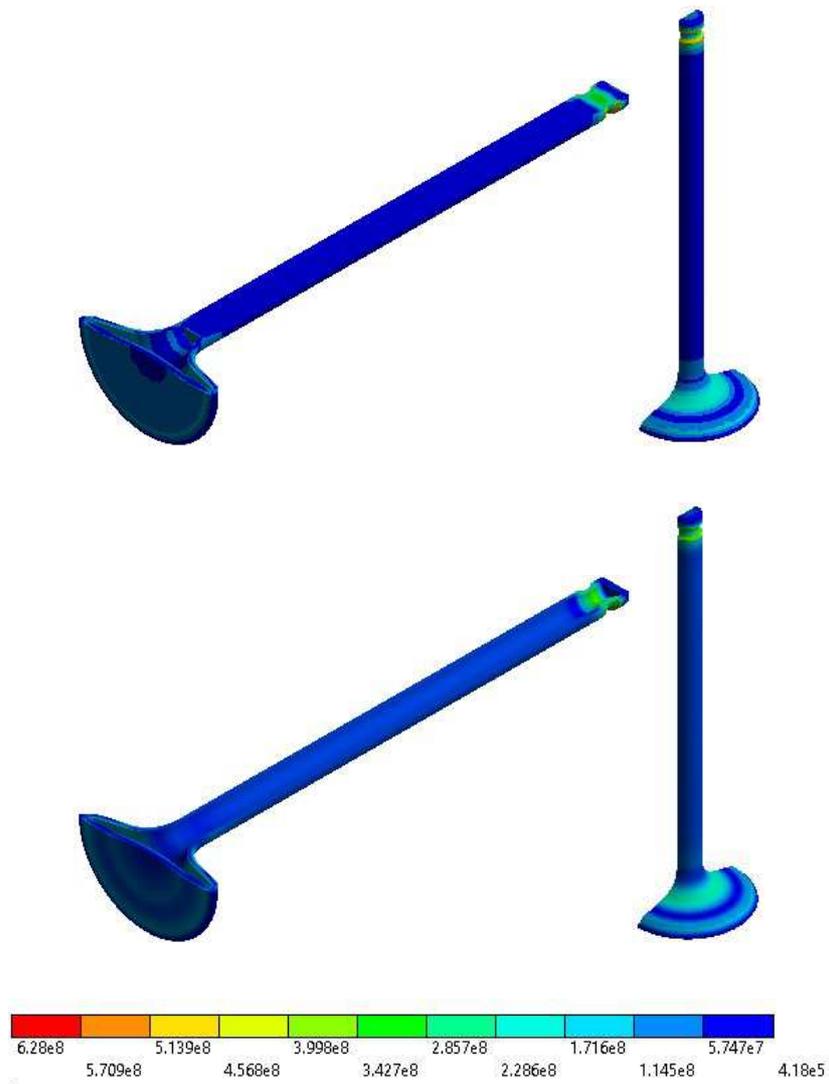


Figura 5.18 Distribución de esfuerzos en válvulas con cavidades.

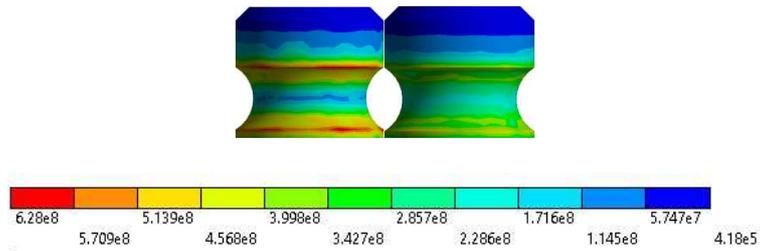


Figura 5.19 Acercamiento a la zona de máximos esfuerzos en válvulas con cavidades.

El desplazamiento en ambas válvulas presentó magnitudes similares, sin mostrar una tendencia definida de cambio en ningún sentido. La zona de la punta es la que presenta desplazamiento mínimo (Figura 5.20).

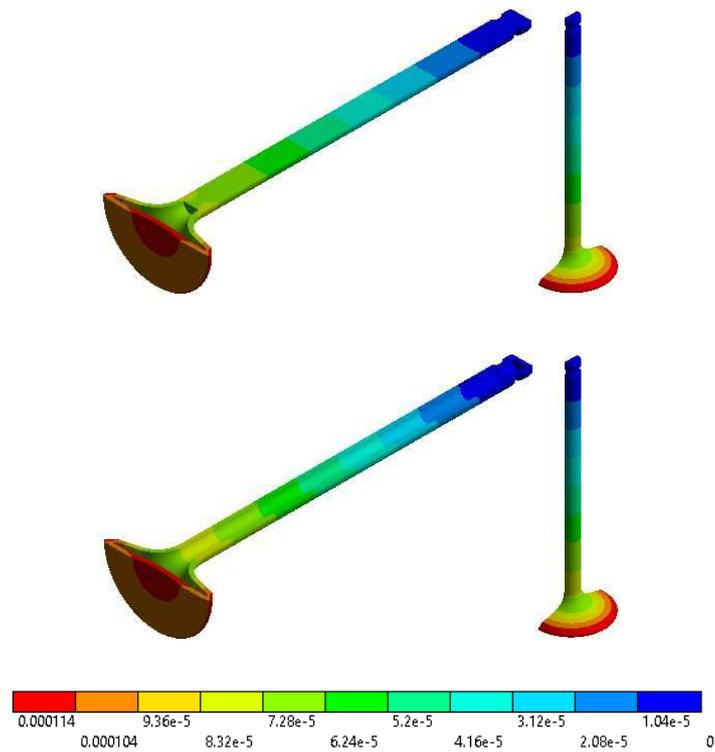


Figura 5.20 Deformación en válvulas con cavidades.

El factor de seguridad presenta variaciones en las zonas de la cabeza y cara, sin embargo, de acuerdo con la escala estos valores no afectan su funcionamiento. El punto crítico se encuentra en la zona de la sujeción que coincide con la zona de máximo esfuerzo. Los datos del factor de seguridad se presentan en la figura 5.21 mientras que en la Figura 5.22 se presenta un acercamiento a la zona crítica.

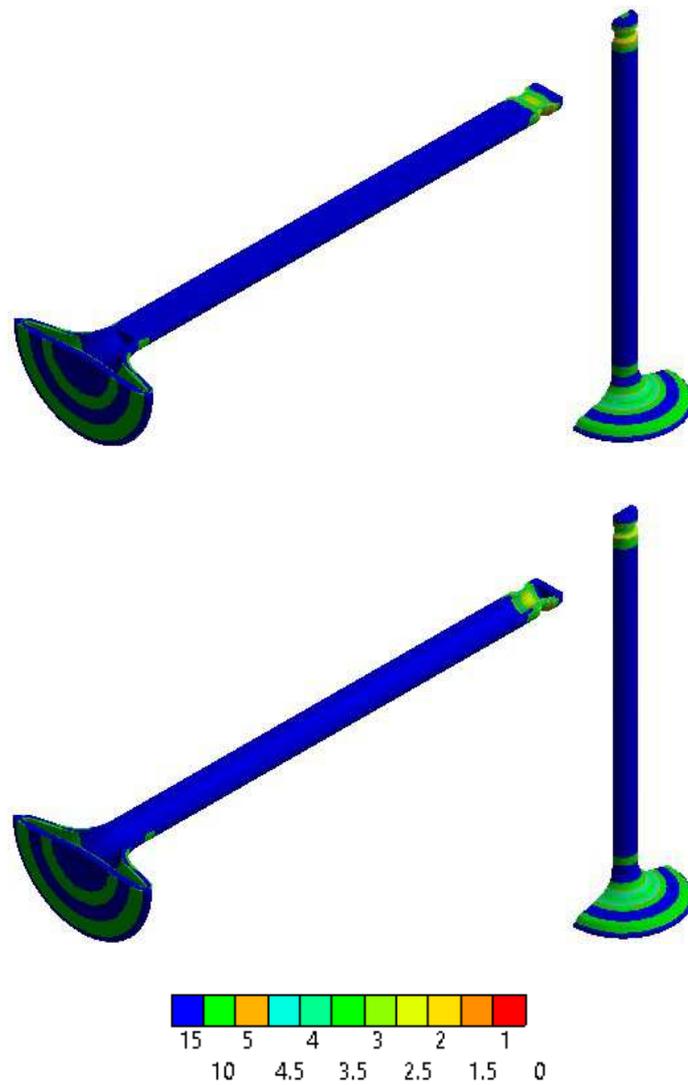


Figura 5.21 Factor de seguridad para válvulas con cavidad, superior) C_H, inferior)

C_F.

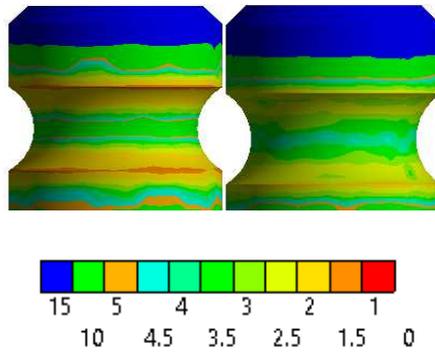


Figura 5.22 Acercamiento a la zona de máximos esfuerzos en válvulas con cavidades.

De acuerdo a los resultados de esfuerzos y factor de seguridad, ambas válvulas son factibles para ocuparse en un MCI en el sistema de distribución. Sin embargo, son las válvulas con cavidad solo en el área de la cabeza las mas proclives a fallar debido al bajo valor observado en el factor de seguridad. Tales efectos pueden acumular daño durante ciclos de trabajo y pueden ocasionar una falla dentro del motor.

CONCLUSIONES

En este trabajo se investigó la factibilidad de uso de dos válvulas de escape con cavidades internas diferentes en un MCI sometidas a esfuerzos termo-mecánicos durante su apertura. Para tal efecto se utilizó el material Nimonic 80 A debido a sus propiedades y a su uso en este tipo de elementos. Las cavidades de los modelos consistieron en una cavidad en la zona de la cabeza y cara y un segundo modelo con cavidad interior completa.

Las conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- Se demostró que el material Nimonic 80 A es factible para operar en las condiciones requeridas, en un modelo inicial de válvula completamente sólida.
- Tanto la temperatura como el flujo de calor se estabilizan en un menor tiempo en la válvula con cavidad completa
- La zona donde se concentran los esfuerzos de mayor magnitud se encuentra en donde sujetan los seguros a la válvula.
- La válvula de cavidad completa tiene un factor de seguridad más alto que la válvula con cavidad en la cabeza
- Los resultados muestran que la válvula con cavidad completa es más confiable para la aplicación en el escape de los gases de combustión de un MCI
- El uso de la válvula C_F representa una disminución de masa de aproximadamente el 43% con respecto a la válvula sólida

RECOMENDACIONES

Del presente trabajo se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar un análisis de fatiga con ambos modelos de válvula
- Considerar en el análisis, la válvula en estado cerrado
- Investigar otro tipo de materiales tales como las aleaciones de titanio
- Realizar el análisis en diferentes condiciones de operación del motor

BIBLIOGRAFÍA

[1] Panturu M., Chicet D., Paulin C., Alexandru A., Munteanu C., (2016) Wear aspects of internal combustion engines. 012036.

[2] Sonsino C.M. (2003). Fatigue design of structural ceramic parts by the example of automotive intake and exhaust valves. International Journal of Fatigue. Vol 25, pp. 107-116.

[3] Karamangil M.I., Avci A., Bilal H. (2007). Investigation of the effects of different carbon film thickness on the exhaust valve. Heat and Mass Transfer. Vol. 44, pp. 587-598.

[4] Ramalho A., Kapsa Ph., Bouvard G., Abry J.C., Yoshida T., Charpentier M., Burgeois M. (2008). Effect of temperatures up to 400°C on the impact-sliding of valve seat contacts. Wear. Vol. 267, pp. 777-780.

[5] Witek L., (2016). Failure and thermo-mechanical stress analysis of the exhaust valve of diesel engine. Engineering Failure Analysis. Vol. 66, pp.154-165.

[6] Badami M., Marino F. (2005). Fatigue tests of un-HIP'ed g-TiAl engine valves for motorcycles. International Journal of Fatigue.

[7] Pang M.L., Smith S.P., Herman R., Buuck B. (2006). Stress Analysis of an Automotive Engine Valve by Finite Element Methods. SAE World Congress. United States of America.

[8] Gawale S.S., Shelke S.N. (2016). Diesel engine exhaust valve design and optimization. Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol. 13, No. 4, pp. 85-93.

[9] Sharma S.K., Saini P.K., Kumar P. (2016). Analysis of temperature and thermal stresses in functionally graded diesel engine valve. ELK Asia Pacific Journals. Special Issue.

[10] Cavalieri F., Zenklusen F., Cardona A. (2016). Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests. Mechanism and Machine Theory. Vol. 104, pp. 81-99.

[11] Sharma S.K., Gupta A.K., Saini P.K., Samria N.K. (2014). Computational modeling for thermal analysis of AV1 diesel engine valve using FEM. International Journal of Small Business and Technology. Vol. 2., No. 2, pp. 1-13.

[12] Kale V., Deshpande S., (2014). Effect of variance of geometric parameters and materials on poppet engine valve. International Journal of Research. Vol (1), No. 10, pp. 424-434.

[13] Rajkumar K. (2014). CFD analysis of various design of hollow exhaust valves for internal combustion engines. IRD India. Vol. 3, No, 1, pp. 5-8.

- [14] Cooper D., Thornby J., blundell N., Henrys R., Williams M.A., Gibbons G. (2014). Design and manufacture of high-performance hollow engine valves by additive layer manufacturing. *Materials & Design*. Vol. 69, pp. 44-55.
- [15] Sharma S.K., Saini P.K., SamriaN.K. (2013). Modelling and analysis of radial and thermal stresses and temperature field in diesel engine valves with and without air cavity. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. Vol. 5, No. 3, pp. 111-123.
- [16] Heitner J. (1998). *Automotive mechanics*. D Van Nostrand Company 2nd ed. Reino Unido.
- [17]Prasanth P.S., Maharaja K., (2016). Optimal selection of valve material for C I engines using ANSYS. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*. Vol 5, No. 6, pp. 2076-2084.
- [18] Mavrigian M. (2013). *Modern engine blueprinting techniques: a practical guide to precision engine building*. Car Tech inc.
- [19] Holman J.P. (1999). *Transferencia de calor*. McGraw Hill. Editorial Continental. 10^a edición, México.
- [20] Olivella Xavier O., de Saracíbar Bosch C. A. (2000). *Mecánica de Medios Continuos para Ingenieros*". Primera edición 2000. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- [21] Shojaefard M.H., Noorpoor A.R., Bozchaloe D.A., Ghaffarpour M., (2005). Transient Thermal Analysis of Engine Exhaust Valve. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. Vol 48, No. 7, pp. 627-644.

[22] CharanK.C., Kumar R., (2015). Performance evaluation of composite (TiCN) coated engine valve using finite element analysis. Proceedings of International Conference on Recent Trends in Mechanical Engineering-2K15(NECICRTME-2K15).

[23] Matweb. SpecialmetalsNimonic alloy 80 A. Recuperado de: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7ffc704ef25e4a6f8c2c262c7ff727fd&fbclid=IwAR2DpTzMOHwovvdtvjRJGkyLo9vyYQzC63iK5Wgorp6vMdvmliuPtX9bwqo&ckck=1>.



FORMA T-4A
 NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 28 de mayo del 2019.

MTRO. ANDRÉS AGUILAR NEGRETE
 DR. JOSÉ ALFREDO ARIZA ESPINOZA
 DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
 ING. ROBERTO CERVANTES PÉREZ
 DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ

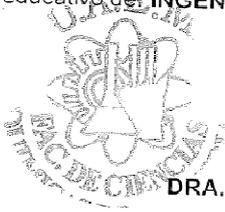
PRESENTES

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:
TESIS

Titolado:

"ANÁLISIS TERMO-ESTRUCTURAL DE VÁLVULAS DE ESCAPE CON CAVIDADES INTERNAS"

Que presenta el **C. CÁNDIDO VARGAS SÁNCHEZ**
 Del programa educativo de **INGENIERÍA MECÁNICA**



ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
PRESENTE

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTAMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
Aprobatorio	MTRO. ANDRÉS AGUILAR NEGRETE	
Aprobatorio	DR. JOSÉ ALFREDO ARIZA ESPINOZA	
Aprobatorio	DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN	
APROBATORIO	ING. ROBERTO CERVANTES PÉREZ	
Aprobatorio	DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ	

VALH/RAJ/srpn

