

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo de Fin de Grado
de Tecnologías Marinas**

**Estudio termofísico mediante simulación con
FreeCAD de la avería de una válvula en un motor
de combustión interna**

Presentado por

Eduardo Arteaga Rosquete

Santa Cruz de Tenerife, 13 de marzo de 2024

Autorización

Pedro Rivero Rodríguez, Profesor Titular de Universidad del área de conocimiento de Construcciones Navales del Departamento de *Ingeniería Civil, Náutica y Marítima* de la Universidad de La Laguna hace constar que:

Eduardo Arteaga Rosquete, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: *Estudio termofísico mediante simulación con FreeCAD de la avería de una válvula en un motor de combustión interna.*

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea designado.

Para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente documento en Santa Cruz de Tenerife, a 13 de marzo de 2024.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez
-Tutor del trabajo-

Resumen

En el siguiente estudio se analiza el comportamiento termomecánico de una válvula de admisión y de escape. Estas válvulas sufrieron daños tras una avería, lo que originó que se tuviera que cambiar la culata, con sus respectivas válvulas, inyector, la cabeza del pistón y la camisa.

Este trabajo se ha realizado con un programa de modelado 3D llamado FreeCAD y las pruebas termodinámicas se hicieron con un banco de trabajo del programa llamado FEM.

Se ha simulado una válvula en 3D, y posteriormente se le ha hecho una serie de ensayos termofísicos.

Estos ensayos consisten en aplicar unas fuerzas y temperaturas en las zonas apropiadas en la válvula dependiendo de la condición que esté, si abierta o cerrada.

Una vez hecho los ensayos, los resultados se compararán con la deformación de una válvula que se recató de la culata de la avería.

Esta información ha podido identificar el procedimiento por el que se produjo la avería, después de las deformaciones producidas por las temperaturas y presiones sufridas, que no corresponden a las usuales, ya que se montaron de forma equivocada en la culata.

Abstract

The following study analyzes the thermomechanical behavior of an intake valve and exhaust. These valves were damaged after a breakdown, which caused them to have to be replacing the cylinder head, with its respective valves, injector, the head of piston and the jacket.

This work has been done with a 3D modeling program called FreeCAD and the test thermodynamics were made with a workbench of the program called FEM.

A valve has been simulated in 3D, and then a series of thermophysycal tests have been carried out.

These tests consist of applying forces and temperatures in the appropriate areas in the valve depending on the condition it is, whether open or closed.

Once the tests were done, the results were compared with the deformation of a valve that was recovered from the failed cylinder head.

This information has been able to identify the procedure by which the breakdown occurred, after the deformations produced by the temperatures and pressures undergone, which do not correspond to the usual ones because they were mounted incorrectly on the cylinder head.

Índice general

| | |
|---|-------------|
| Lista de figuras | XII |
| Lista de tablas | XIII |
| 1. Revisión y Antecedentes | 1 |
| 1.1. Descripción del motor Wärtsilä 9L20C y de las condiciones de trabajo de las válvulas | 1 |
| 1.2. Descripción de la avería | 1 |
| 2. Objetivos | 5 |
| 3. Metodología | 7 |
| 3.1. Planificación | 7 |
| 3.2. Alcance | 7 |
| 3.3. FreeCAD | 7 |
| 3.3.1. Sketcher | 7 |
| 3.3.2. Design | 7 |
| 3.3.3. FEM | 10 |
| 3.4. Modelaje 3D | 10 |
| 3.5. Material | 13 |
| 4. Resultados | 15 |
| 4.1. Modelo 3D | 15 |
| 4.2. Análisis termomecánico | 15 |
| 4.2.1. Ensayos térmicos | 15 |
| 4.2.2. Ensayos mecánicos | 17 |
| 5. Conclusiones | 29 |
| Anexos | 33 |
| A. Figuras adicionales | 33 |
| Bibliografía | 45 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Motor aux. N ^o 2 | 2 |
| 1.2. Culata N ^o 9 del motor auxiliar N ^o 2 dañada | 2 |
| 1.3. Camisa dañada del cil. N ^o 9 del motor aux. N ^o 2 | 3 |
| 3.1. Válvulas de admisión y de escape sin dañar | 8 |
| 3.2. Croquis utilizado para el modelo de la válvula | 9 |
| 3.3. Ejemplo de nodos y elementos | 10 |
| 3.4. Diferencia de tamaños entre las válvulas | 12 |
| 3.5. Características del material utilizado para las pruebas termomecánicas | 13 |
| 4.1. Modelo 3D de la válvula de admisión | 16 |
| 4.2. Modelo 3D de la válvula de escape | 16 |
| 4.3. Esfuerzo cortante máximo cuando la válvula de admisión está cerrada | 17 |
| 4.4. Daños en la válvula | 18 |
| 4.5. Esfuerzo cortante máximo cuando la válvula de admisión está abierta | 18 |
| 4.6. Deformación de la válvula. | 19 |
| 4.7. Deformación causada por la temperatura en admisión cuando está cerrada | 20 |
| 4.8. Deformación causada por la temperatura en escape cuando está cerrada | 20 |
| 4.9. Datos de la deformación causada por la temperatura en admisión cuando está cerrada | 21 |
| 4.10. Datos de la deformación causada por la temperatura en escape cuando está cerrada . | 21 |
| 4.11. Deformación causada por la temperatura en admisión cuando está abierta | 22 |
| 4.12. Deformación causada por la temperatura en escape cuando está abierta | 22 |
| 4.13. Datos de la deformación causada por la temperatura en admisión cuando está abierta | 23 |
| 4.14. Datos de la deformación causada por la temperatura en escape cuando está abierta . | 23 |
| 4.15. Esfuerzo cortante en prueba mecánica con la válvula cerrada | 24 |
| 4.16. Esfuerzo cortante en prueba mecánica con la válvula abierta | 24 |
| 4.17. Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en admisión cuando está cerrada . | 25 |
| 4.18. Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en escape cuando está cerrada . . | 25 |
| 4.19. Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en admisión cuando está abierta . | 26 |
| 4.20. Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en escape cuando está abierta . . | 27 |
| A.1. Posición de las válvulas en la culata dañada | 34 |

| | |
|--|----|
| A.2. Marcas en la cabeza del pistón causadas por el golpeteo de las válvulas | 35 |
| A.3. Daños observados en los balancines de la culata N ^o 9 del motor auxiliar N ^o 2 | 36 |
| A.4. Otra vista del motor aux. N ^o 2 | 37 |
| A.5. Motor con la turbo dañada | 38 |
| A.6. Colocando la turbo nueva en el motor | 39 |
| A.7. Deformación causada por la presión en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta | 40 |
| A.8. Deformación causada por la presión en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta | 40 |
| A.9. Deformación causada por la presión en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada | 41 |
| A.10. Deformación causada por la presión en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada | 41 |
| A.11. Deformación causada por la temperatura en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta | 42 |
| A.12. Deformación causada por la temperatura en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta | 42 |
| A.13. Deformación causada por la temperatura en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada | 43 |
| A.14. Deformación causada por la temperatura en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada | 43 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 1.1. Temperaturas y presiones sufridas por la válvulas | 1 |
| 3.1. Simbología Sketcher | 9 |
| 3.2. Simbología Part Design | 9 |
| 3.3. Simbología FEM | 11 |
| 3.4. Dimensiones comunes para las válvulas | 11 |
| 3.5. Dimensiones para la válvula de admisión | 11 |
| 3.6. Dimensiones para la válvula de escape | 11 |
| 5.1. Deformación de admisión en condiciones normales de trabajo | 29 |
| 5.2. Deformación de escape en condiciones normales de trabajo | 29 |

1 Revisión y Antecedentes

Este trabajo es el producto de varias ideas, la primera es la propuesta que hizo el tutor Pedro Rivero de hacer el trabajo sobre los esfuerzos termomecánicos de una pieza que sufría o sufrió algún tipo de mantenimiento ya sea puntual o reiterado. Y la siguiente idea fue proporcionada por mi, ya que pude presenciar esta avería.

1.1 Descripción del motor Wärtsilä 9L20C y de las condiciones de trabajo de las válvulas

El motor involucrado es el Wärtsilä 9L20C (fig.1.1), con nueve cilindros en línea, genera una potencia de 1500 kW, gira a 1000 R.P.M. y los combustibles que puede consumir son el DIESEL y HFO.

Las válvulas están sometidas a diferentes presiones y temperaturas que se aplican en zonas diferentes dependiendo de la posición, si es abierta o cerrada. Todos los valores de presiones y de temperaturas están reflejados en la tabla 1.1 La presión de gases de escape se obtuvo cuando al motor se le hizo la prueba de presiones máximas. Esta prueba consiste en poner en la purga de cada cilindro un sensor de presión, que calcula la presión máxima que llega ese cilindro. Y el valor que se ha utilizado es la media de todas las presiones obtenidas. Todos estos datos se obtuvieron gracias al programa de control, que es donde se refleja todos los datos de la sala de máquinas.

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Temperatura de gases de escape | 344°C |
| Temperatura de aire de carga | 54,2°C |
| Temperatura del aceite | 63°C |
| Presión de aire de carga | 10,8 bares |
| Presión de gases de escape | 117,4 bares |

Tabla 1.1: Temperaturas y presiones sufridas por la válvulas

1.2 Descripción de la avería

La avería se produjo en medio de una maniobra. En ese momento, de los tres motores auxiliares están arrancados el N°2 y el N°3. De repente se escuchó un golpeteo por la zona de la turbo y del cilindro N°9 del motor auxiliar N°2. Rápidamente se arrancó el N°1 y se paró el N°2. Al quitar la tapa de balancines se podía observar que los balancines, el yunque y demás elementos estaban gravemente dañados (fig. A.3).

Después se procedió al desmontaje del cilindro en cuestión. Y se observó que las válvulas estaban golpeando el aro de fuego hasta que estas se doblaron y se partieron, produciendo daños en la culata (fig.1.2), en la camisa y en la cabeza del pistón (fig.1.3). La causa de esta avería es que la válvula de admisión y de escape estaban intercambiadas, es decir la de admisión estaba en el orificio de escape y viceversa. Este intercambio se produjo en el montaje posterior al *overhaul*. Este mantenimiento consiste en desmontar por completo el motor y sustituir o reacondicionar las piezas que lo requieran.



Figura 1.1: Motor aux. N°2
Fuente: Colección propia



Figura 1.2: Culata N°9 del motor auxiliar N°2 dañada
Fuente: Colección propia



Figura 1.3: Camisa dañada del cil. N^o9 del motor aux. N^o2
Fuente: Colección propia

2 Objetivos

Los objetivos del trabajo se pueden separar en dos grupos.

Los objetivos generales son:

1. Entender la importancia de utilizar repuestos adecuados para hacer cualquier mantenimiento a un equipo, para que no sucedan casos como el de la avería que estamos tratando.
2. Aprender a utilizar un programa de modelado 3D.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Saber como es el comportamiento de una válvula cuando está trabajando, cómo se distribuyen las temperaturas, cómo se aplican las presiones, etc.
2. Hacer un análisis termofísico de una pieza.
3. Obtener el comportamiento de la misma para entender que ocurrió en el motor para qué se produjera la avería.

3 Metodología

La metodología de trabajo para la realización de este proyecto se podría dividir en los siguientes apartados.

3.1 Planificación

La planificación de este trabajo se divide en tres partes.

1. Rescatar las válvulas de la culata dañada (fig.1.2) y realizar las mediciones pertinentes para hacer el modelado de las válvulas sin dañar (fig.3.1).
2. Familiarizarse con el programa para modelar en 3D (FeeCAD) y aprender a utilizar las herramientas del mismo para modelar (figuras 4.1 y 4.2) y hacer las pruebas termomecánicas.
3. Comparar los datos obtenidos en las pruebas con la válvula rescatada.

3.2 Alcance

El alcance de este proyecto es analizar el comportamiento de un modelo 3D bajo las condiciones de presión y temperaturas sufridas por las válvulas involucradas en la avería. Y comparar los resultados con la válvula dañada y describir como ocurrió la avería.

3.3 FreeCAD

En este caso se utilizó el programa de software libre FreeCAD, con varias herramientas para hacer tanto el modelo 3D de las válvulas como el análisis termomfísico.

Este programa es de modelado paramétrico 3D, es decir se basa en parámetros para diseñar las piezas 3D. Por ejemplo para hacer una esfera, el parámetro que se utilizaría sería la longitud del radio de la circunferencia que lo forma.[3]

3.3.1 Sketcher

Este banco de trabajo se encarga en dibujar en 2D un croquis de la pieza que se este haciendo. En este banco es donde se puede acotar las piezas y modificar el diseño base del objeto, como se puede observar en la fig.3.2.

En la tabla 3.1 se puede ver las diferentes herramientas que se utilizó en este banco de trabajo. [4]

3.3.2 Design

Este banco de trabajo le da la tercera dimensión al croquis hecho en el banco anterior. En este caso se utilizó la revolución, es decir, el croquis giró en sí mismo por un eje, específicamente el z. En la tabla 3.2 se puede ver las diferentes herramientas que se utilizó en este banco de trabajo. [1]



Figura 3.1: Válvulas de admisión y de escape sin dañar
Fuente: Colección propia

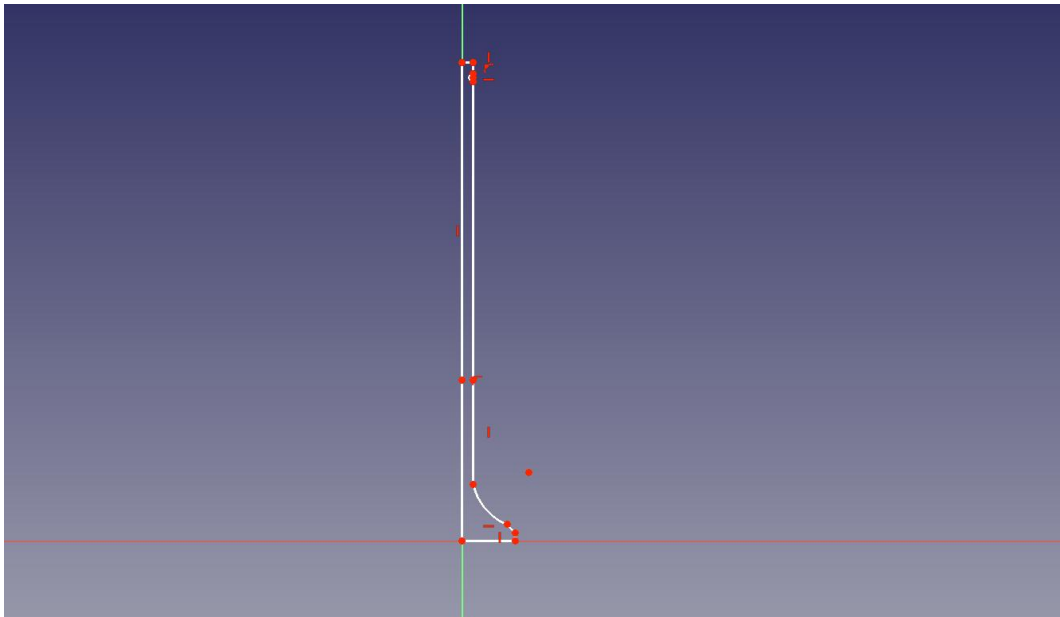


Figura 3.2: Croquis utilizado para el modelo de la válvula
Fuente: Colección propia







| Símbolo | Descripción |
|---|--|
|  | Dibuja un segmento entre dos puntos |
|  | Dibuja un arco |
|  | Fija una distancia horizontal entre dos puntos o dos aristas |
|  | Fija una distancia vertical entre dos puntos o dos aristas |
|  | Define el radio de una circunferencia o de un arco |
|  | Define el ángulo entre dos aristas |

Tabla 3.1: Simbología Sketcher



| Símbolo | Descripción |
|---|--|
|  | Se utiliza para crear un cuerpo nuevo |
|  | Se utiliza para crear un nuevo croquis |

Tabla 3.2: Simbología Part Design

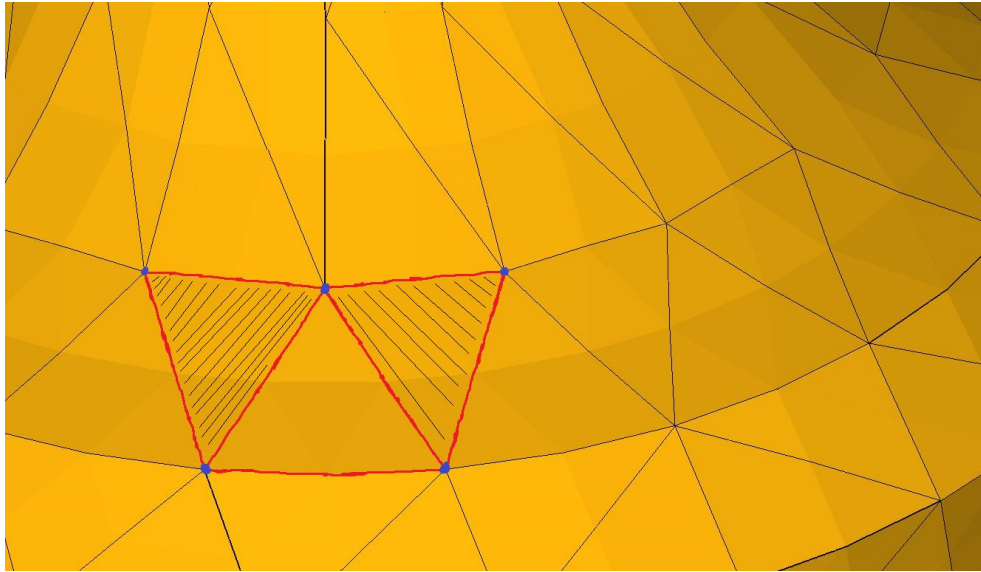


Figura 3.3: Ejemplo de nodos y elementos
Fuente: Colección propia

3.3.3 FEM

Este es el banco donde se centra más la atención en este trabajo. Es donde se le hacen las pruebas termomecánicas a las piezas creadas gracias a los dos bancos de trabajo anteriores.

Esta herramienta hace las pruebas gracias al método de los elementos finitos. Es un método que se utiliza en ordenadores para dar una solución a ecuaciones diferenciales relacionadas a problemas físicos o de geometría muy complicados. Este método funciona de la siguiente manera, la superficie de la pieza se divide en segmentos llamados elementos. Estos tienen forma triangular y están unidos entre sí por nodos (los puntos de unión entre dos elementos). El conjunto de nodos y elementos forma la malla y gracias a esta el programa aplica las fuerzas o las temperaturas. Por lo cual la exactitud de los resultados depende del tamaño de la malla, si es más grande, es decir los elementos son grandes, los resultados serán aproximados, y si la malla es más pequeña, los elementos mas pequeños, el resultado será más exacto. En la fig. 3.3 se puede apreciar que los puntos azules son los nodos y las zonas sombreadas son los elementos. En la tabla 3.3 se puede ver las diferentes herramientas que se utilizó en este banco de trabajo. [2]

3.4 Modelaje 3D

Para que se pueda realizar el modelo 3D, se tiene que conseguir las dimensiones de las válvulas. En este caso la de admisión y de escape son casi idénticas, con la única diferencia que la galleta de admisión es más grande que la de escape.

Las dimensiones comunes de las válvulas están reflejadas en la tabla 3.4. Luego las dimensiones de admisión están expuestas en la tabla 3.5 y por último las dimensiones de escape están en la tabla 3.6. En las figuras 3.1 y 3.4 se puede observar las dos válvulas sin daños y la diferencia de tamaños.

Para que las pruebas fueran más fiables se tenía que aplicar diferentes temperaturas en una misma superficie, ya que no toda la válvula está expuesta a las mismas temperaturas y presiones antes mencionados. Por ese motivo en el diseño de los modelos 3D de las válvulas, la superficie del vástago se dividió en dos, exactamente a una altura de 100 mm, que es el punto donde el vástago de la válvula se introduce en la culata.











| Símbolo | Descripción |
|---|--|
|  | Crea un nuevo ambiente para análisis |
|  | Permite elegir un material para el análisis |
|  | Malla formada por Netgen |
|  | Permite definir una restricción fija a una cara, arista o punto |
|  | Permite aplicar una fuerza en Newtons de forma uniforme en una cara |
|  | Permite aplicar una presión en múltiplos de Pa de forma uniforme en una cara |
|  | Se utiliza para poner una temperatura ambiente en la pieza |
|  | Permite definir un flujo de calor sobre una cara, arista o punto |
|  | Se utiliza para aplicar una temperatura sobre una cara, arista o punto |
|  | Se utiliza para poder ver los resultados de un análisis |

Tabla 3.3: Simbología FEM

| | |
|----------------------|----------|
| Asiento | 5 mm |
| Alto | 297,5 mm |
| Diámetro del vástago | 14 mm |
| Diámetro del retén | 5 mm |

Tabla 3.4: Dimensiones comunes para las válvulas

| | |
|------------------------|---------|
| Diámetro de la galleta | 72,8 mm |
| Altura de la galleta | 6 mm |
| Radio de la curva | 37,8 mm |

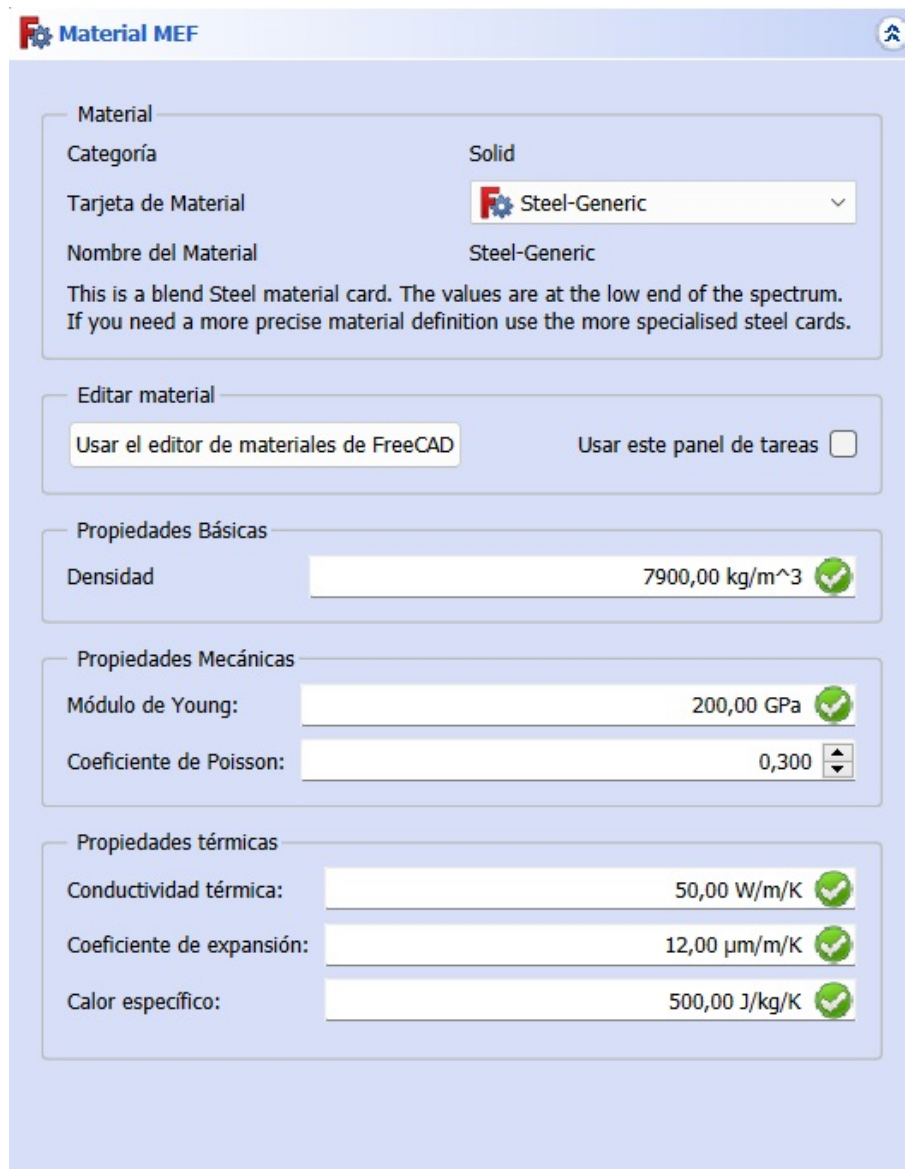
Tabla 3.5: Dimensiones para la válvula de admisión

| | |
|------------------------|--------|
| Diámetro de la galleta | 66 mm |
| Altura de la galleta | 5,3 mm |
| Radio de la curva | 35 mm |

Tabla 3.6: Dimensiones para la válvula de escape



Figura 3.4: Diferencia de tamaños entre las válvulas
Fuente: Colección propia



The screenshot shows the 'Material MEF' window in FreeCAD. It is divided into several sections:

- Material:** Categoría: Solid; Tarjeta de Material: Steel-Generic; Nombre del Material: Steel-Generic. A note below states: 'This is a blend Steel material card. The values are at the low end of the spectrum. If you need a more precise material definition use the more specialised steel cards.'
- Editar material:** Two buttons: 'Usar el editor de materiales de FreeCAD' and 'Usar este panel de tareas' (with an unchecked checkbox).
- Propiedades Básicas:** Densidad: 7900,00 kg/m³ (with a green checkmark).
- Propiedades Mecánicas:** Módulo de Young: 200,00 GPa (with a green checkmark); Coeficiente de Poisson: 0,300 (with a spinner).
- Propiedades térmicas:** Conductividad térmica: 50,00 W/m/K (with a green checkmark); Coeficiente de expansión: 12,00 µm/m/K (with a green checkmark); Calor específico: 500,00 J/kg/K (with a green checkmark).

Figura 3.5: Características del material utilizado para las pruebas termomecánicas
Fuente: Colección propia

3.5 Material

Según el manual del motor, las válvulas están fabricadas con acero fundido, pero al no tener las características exactas del material para las diferentes pruebas que se ha realizado, se ha optado por utilizar las características de un material disponible en FreeCAD, que es el acero genérico. Sus características se especifican en la fig. 3.5.

4 Resultados

4.1 Modelo 3D

Después de trabajar en los bancos de trabajo PartDesign y Sketcher los modelos de las válvulas terminaron, como se pueden observar en las figuras 4.1 y 4.2.

4.2 Análisis termomecánico

Antes de exponer los resultados del análisis hay que aclarar un término: Esfuerzo cortante, los esfuerzos cortantes son las tensiones que sufre las piezas debido a las fuerzas y las temperaturas aplicadas. Las zonas o los puntos donde estas fuerzas están presentes, es por donde más probabilidades tiene la pieza en deformarse o fracturarse.

Las pruebas se hicieron de dos maneras, cuando la válvula está abierta y cuando está cerrada. Los resultados se pueden dividir en dos partes:

- Ensayos térmicos
- Ensayos mecánicos

4.2.1 Ensayos térmicos

Estas pruebas son las que más influencia tienen sobre las válvulas, ya que cuando se le aplica las temperaturas en los lugares indicados, dependiendo de la condición que tenga la válvula (cerrada o abierta), los puntos donde los esfuerzos cortantes son mayores son exactamente las zonas donde la válvula rescatada de la culata se está empezando a fracturar o donde está deformada.

Como se puede observar en las figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6. Los daños recibidos cuando la válvula está cerrada se concentran en la galleta de la válvula, que es por donde empezó a fracturarse y cuando está abierta se concentran en la intersección donde la válvula se introduce en la culata y donde está expuesta a los diferentes gases, temperaturas y presiones en el colector correspondiente, de admisión o de escape.

También se pudo observar en las pruebas térmicas otro resultado que es la deformación. Cada válvula se deforma diferente dependiendo de la condición de trabajo que tenga, es decir si está abierta o cerrada. En las figuras 4.9, 4.8, 4.11, 4.12, se puede apreciar la deformación de las válvulas, pero de una forma exagerada para poder ver con claridad la deformación que sufren las válvulas según la condición que tengan.

4.2.1.1 Deformación de las válvulas cuando están cerradas

Como se puede ver en las figuras 4.9, 4.8, cuando la válvula está cerrada, la de admisión se deforma entre 2,14 y 5,22 mm (fig.4.9) por la zona del retén y la de escape se deforma entre 78,06 micrómetros y 0.32 mm (fig.4.10) por la zona de la galleta.

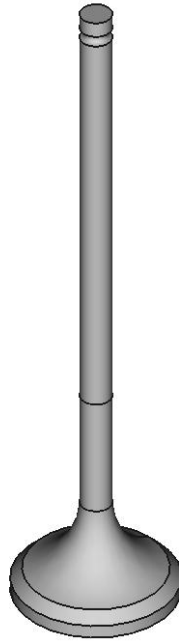


Figura 4.1: Modelo 3D de la válvula de admisión
Fuente: Colección propia

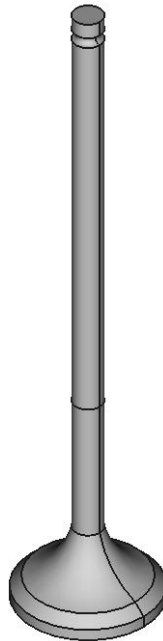


Figura 4.2: Modelo 3D de la válvula de escape
Fuente: Colección propia

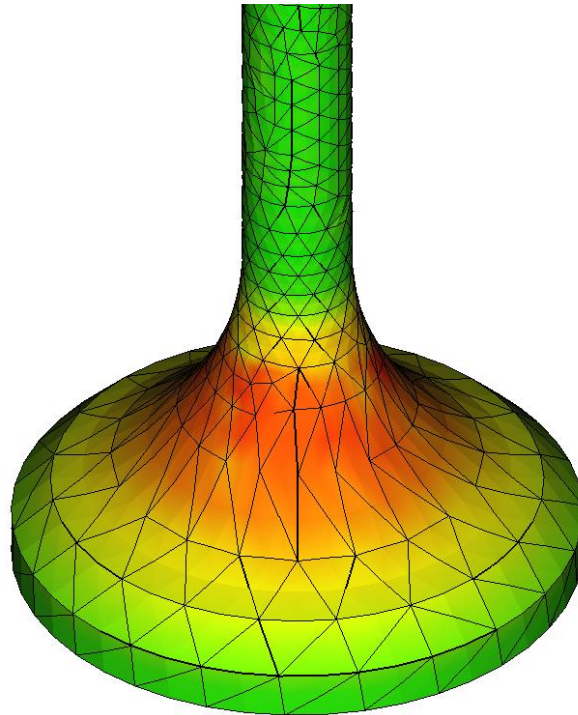


Figura 4.3: Esfuerzo cortante máximo cuando la válvula de admisión está cerrada
Fuente: Colección propia

4.2.1.2 Deformación de las válvulas cuando están abiertas

Se observa en las figuras 4.11 y 4.12, que la válvula de admisión se deforma toda la válvula entre 0,72 y 1,23 mm (fig.4.13) y la de escape se deforma entre 0,23 y 1,46 mm (fig.4.14) por la zona del retén.

4.2.2 Ensayos mecánicos

Estas pruebas se hacen aplicando una presión en el lugar indicado dependiendo si la válvula está cerrada o abierta. Las zonas donde las válvulas sufren más estrés coinciden según la condición de trabajo, si está cerrada o abierta.

4.2.2.1 Esfuerzo cortante máximo de las válvulas cuando están cerradas

Como se puede ver en la fig. 4.15 el esfuerzo cortante mayor está situado en la parte del retén, y sufre una presión entre 5155,55 kPa y 621,70 MPa para la de admisión (fig.4.17) y de 5558,16 kPa y 512,21 MPa para la de escape (4.18).

4.2.2.2 Esfuerzo cortante máximo de las válvulas cuando están abiertas

En la figura 4.16 se aprecia la zona donde el esfuerzo cortante es máximo. Sufre una presión de 796,93 Pa y 8770,46 kPa en la válvula de admisión (fig.4.19) y de 793,56 Pa y 817,78 kPa en escape (fig.4.20).



Figura 4.4: Daños en la válvula
Fuente: Colección propia

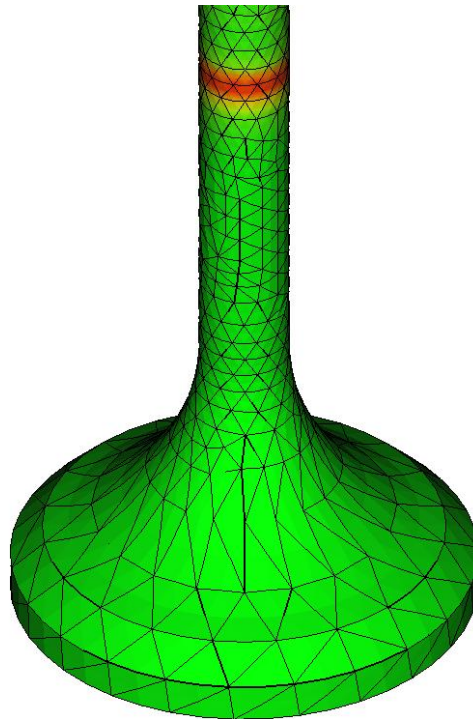


Figura 4.5: Esfuerzo cortante máximo cuando la válvula de admisión está abierta
Fuente: Colección propia



Figura 4.6: Deformación de la válvula.
Fuente: Colección propia

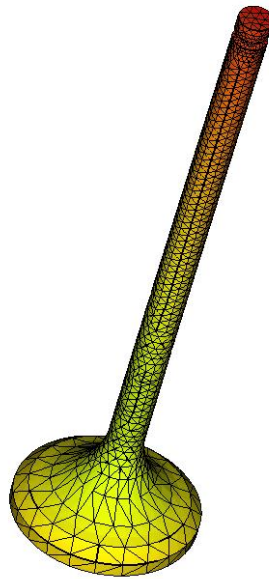


Figura 4.7: Deformación causada por la temperatura en admisión cuando está cerrada

Fuente: Colección propia

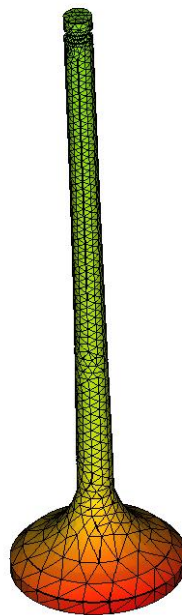
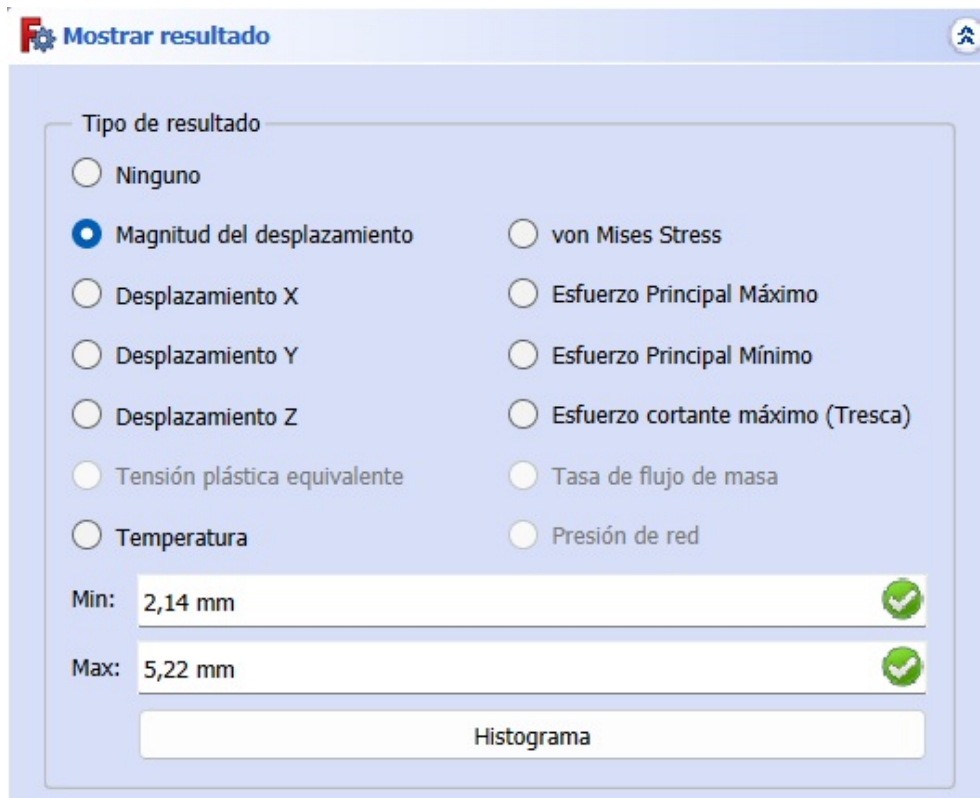


Figura 4.8: Deformación causada por la temperatura en escape cuando está cerrada

Fuente: Colección propia



Mostrar resultado

Tipo de resultado

- Ninguno
- Magnitud del desplazamiento
- Desplazamiento X
- Desplazamiento Y
- Desplazamiento Z
- Tensión plástica equivalente
- Temperatura
- von Mises Stress
- Esfuerzo Principal Máximo
- Esfuerzo Principal Mínimo
- Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
- Tasa de flujo de masa
- Presión de red

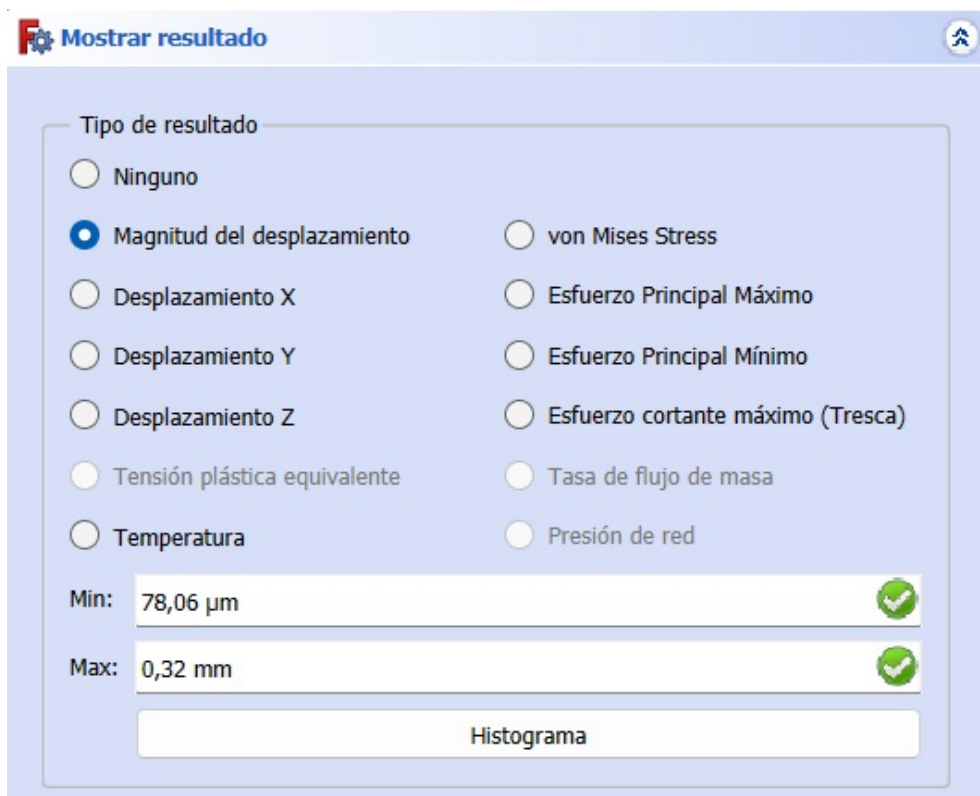
Min: 2,14 mm ✓

Max: 5,22 mm ✓

Histograma

Figura 4.9: Datos de la deformación causada por la temperatura en admisión cuando está cerrada

Fuente: Colección propia



Mostrar resultado

Tipo de resultado

- Ninguno
- Magnitud del desplazamiento
- Desplazamiento X
- Desplazamiento Y
- Desplazamiento Z
- Tensión plástica equivalente
- Temperatura
- von Mises Stress
- Esfuerzo Principal Máximo
- Esfuerzo Principal Mínimo
- Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
- Tasa de flujo de masa
- Presión de red

Min: 78,06 µm ✓

Max: 0,32 mm ✓

Histograma

Figura 4.10: Datos de la deformación causada por la temperatura en escape cuando está cerrada

Fuente: Colección propia

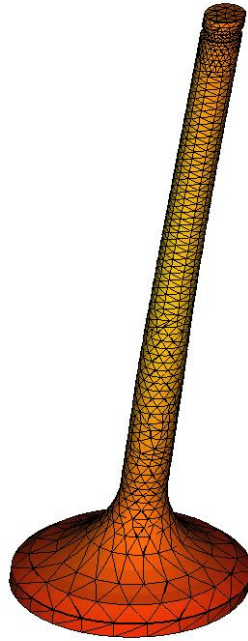


Figura 4.11: Deformación causada por la temperatura en admisión cuando está abierta

Fuente: Colección propia

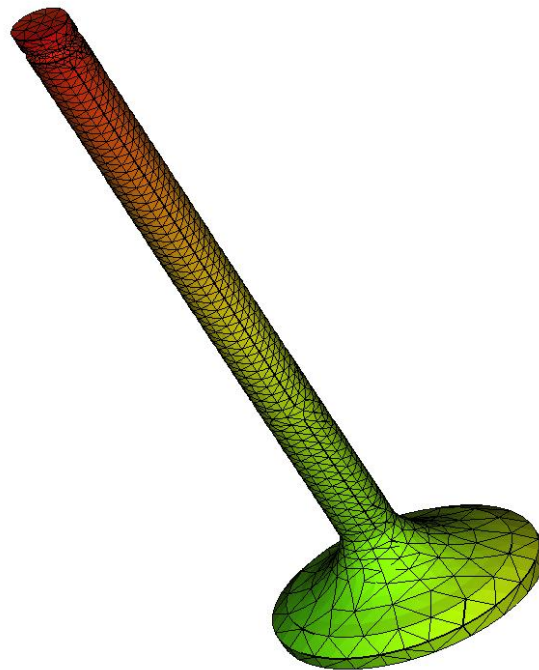


Figura 4.12: Deformación causada por la temperatura en escape cuando está abierta

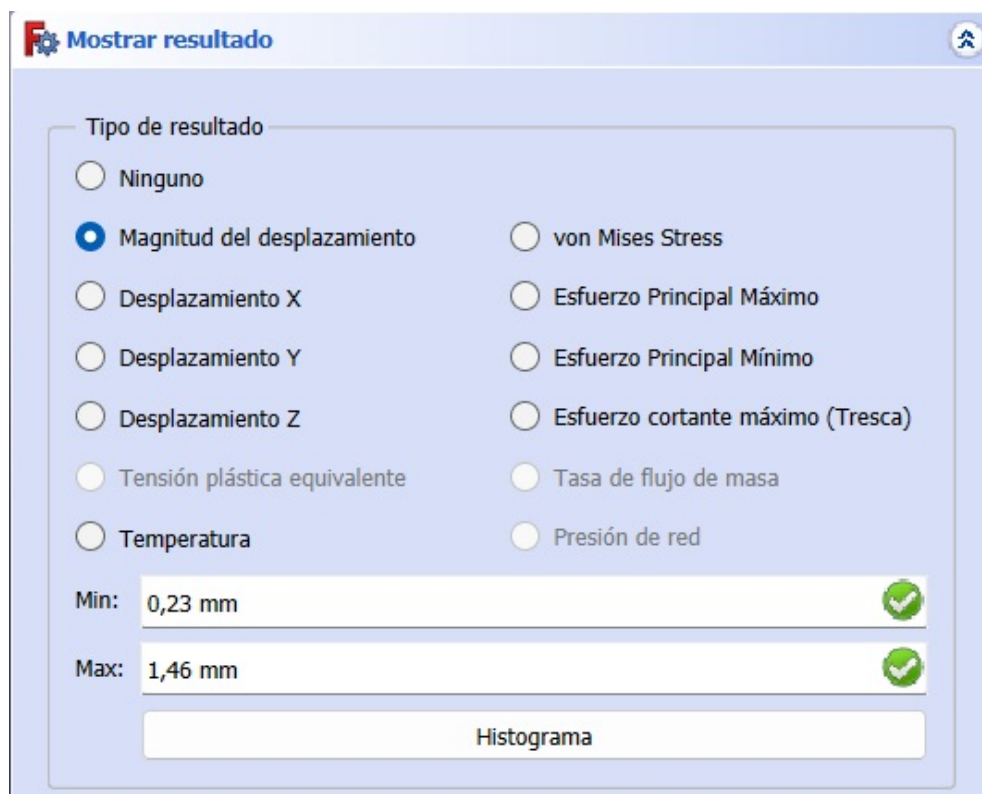
Fuente: Colección propia



The screenshot shows a software window titled "Mostrar resultado" with a gear icon and a home icon. Under the heading "Tipo de resultado", there are two columns of radio button options. The first column includes "Ninguno", "Magnitud del desplazamiento" (which is selected), "Desplazamiento X", "Desplazamiento Y", "Desplazamiento Z", "Tensión plástica equivalente", and "Temperatura". The second column includes "von Mises Stress", "Esfuerzo Principal Máximo", "Esfuerzo Principal Mínimo", "Esfuerzo cortante máximo (Tresca)", "Tasa de flujo de masa", and "Presión de red". Below the options, there are two input fields: "Min: 0,72 mm" and "Max: 1,23 mm", each with a green checkmark icon to its right. At the bottom, there is a button labeled "Histograma".

Figura 4.13: Datos de la deformación causada por la temperatura en admisión cuando está abierta

Fuente: Colección propia



The screenshot shows a software window titled "Mostrar resultado" with a gear icon and a home icon. Under the heading "Tipo de resultado", there are two columns of radio button options. The first column includes "Ninguno", "Magnitud del desplazamiento" (which is selected), "Desplazamiento X", "Desplazamiento Y", "Desplazamiento Z", "Tensión plástica equivalente", and "Temperatura". The second column includes "von Mises Stress", "Esfuerzo Principal Máximo", "Esfuerzo Principal Mínimo", "Esfuerzo cortante máximo (Tresca)", "Tasa de flujo de masa", and "Presión de red". Below the options, there are two input fields: "Min: 0,23 mm" and "Max: 1,46 mm", each with a green checkmark icon to its right. At the bottom, there is a button labeled "Histograma".

Figura 4.14: Datos de la deformación causada por la temperatura en escape cuando está abierta

Fuente: Colección propia

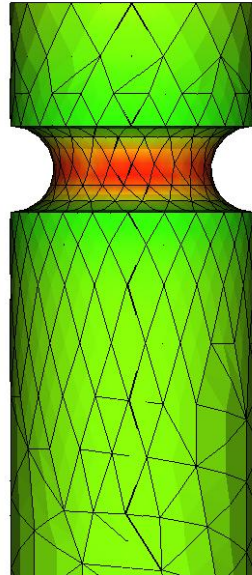


Figura 4.15: Esfuerzo cortante en prueba mecánica con la válvula cerrada
Fuente: Colección propia

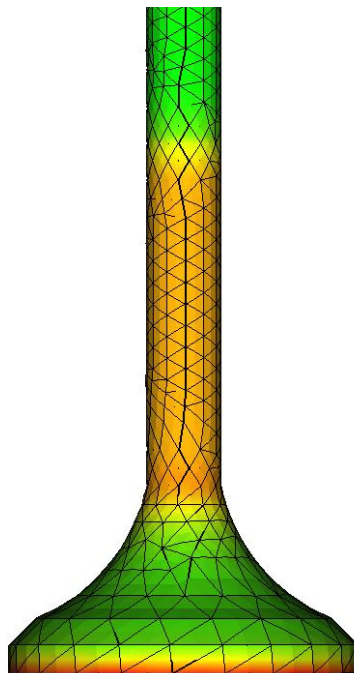


Figura 4.16: Esfuerzo cortante en prueba mecánica con la válvula abierta
Fuente: Colección propia

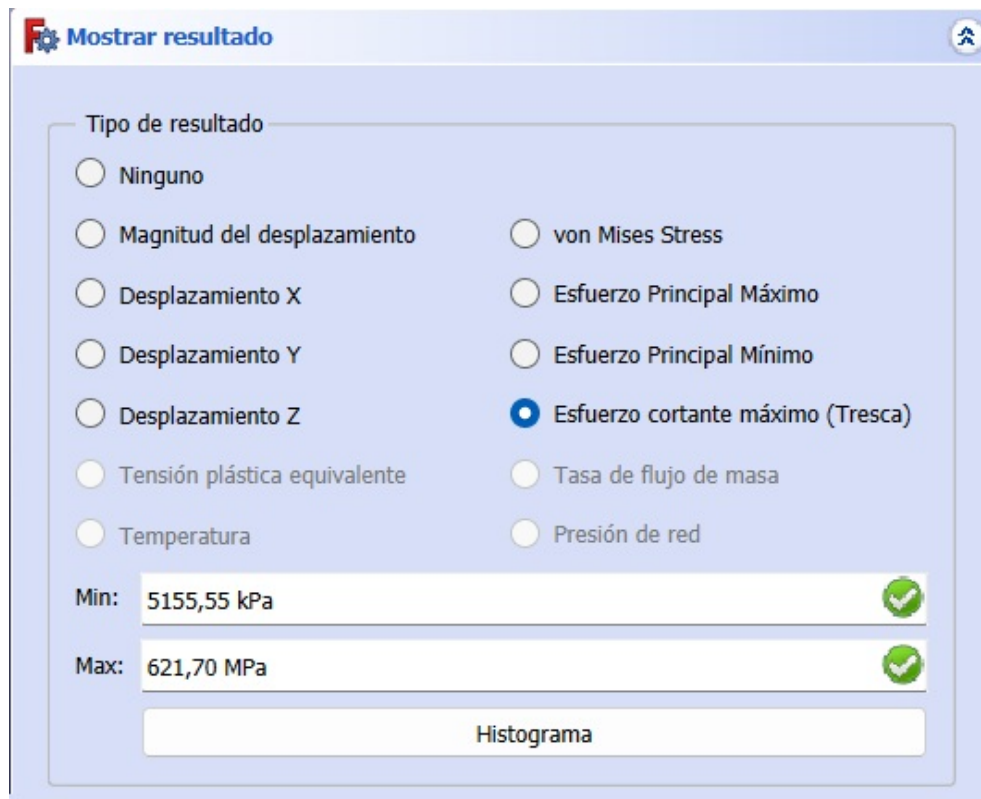


Figura 4.17: Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en admisión cuando está cerrada

Fuente: Colección propia

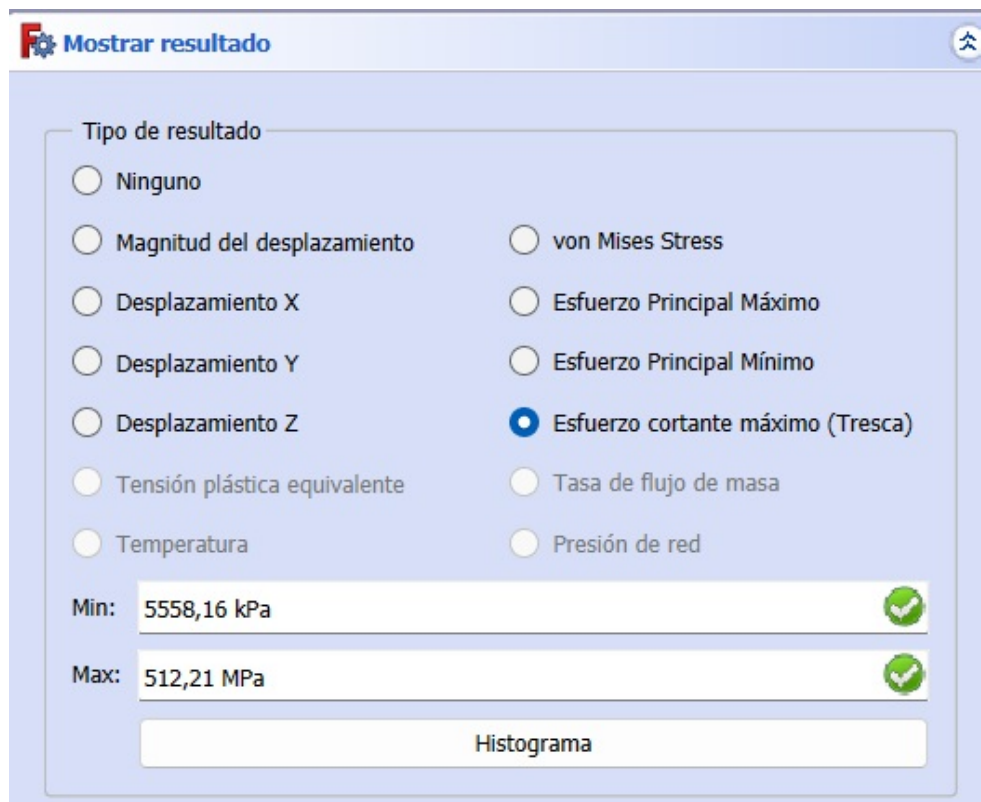
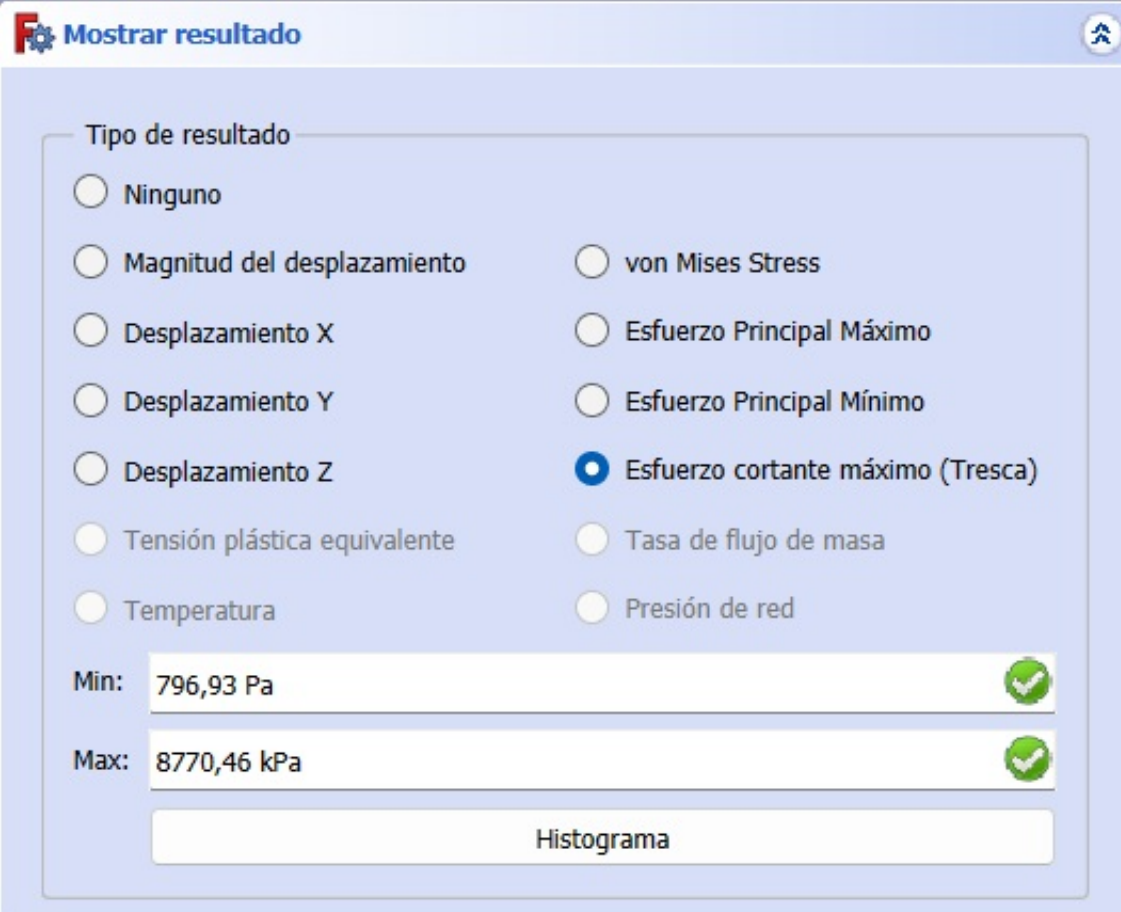


Figura 4.18: Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en escape cuando está cerrada

Fuente: Colección propia



Mostrar resultado

Tipo de resultado

- Ninguno
- Magnitud del desplazamiento
- Desplazamiento X
- Desplazamiento Y
- Desplazamiento Z
- Tensión plástica equivalente
- Temperatura
- von Mises Stress
- Esfuerzo Principal Máximo
- Esfuerzo Principal Mínimo
- Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
- Tasa de flujo de masa
- Presión de red

Min: 796,93 Pa ✓

Max: 8770,46 kPa ✓

Histograma

Figura 4.19: Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en admisión cuando está abierta

Fuente: Colección propia

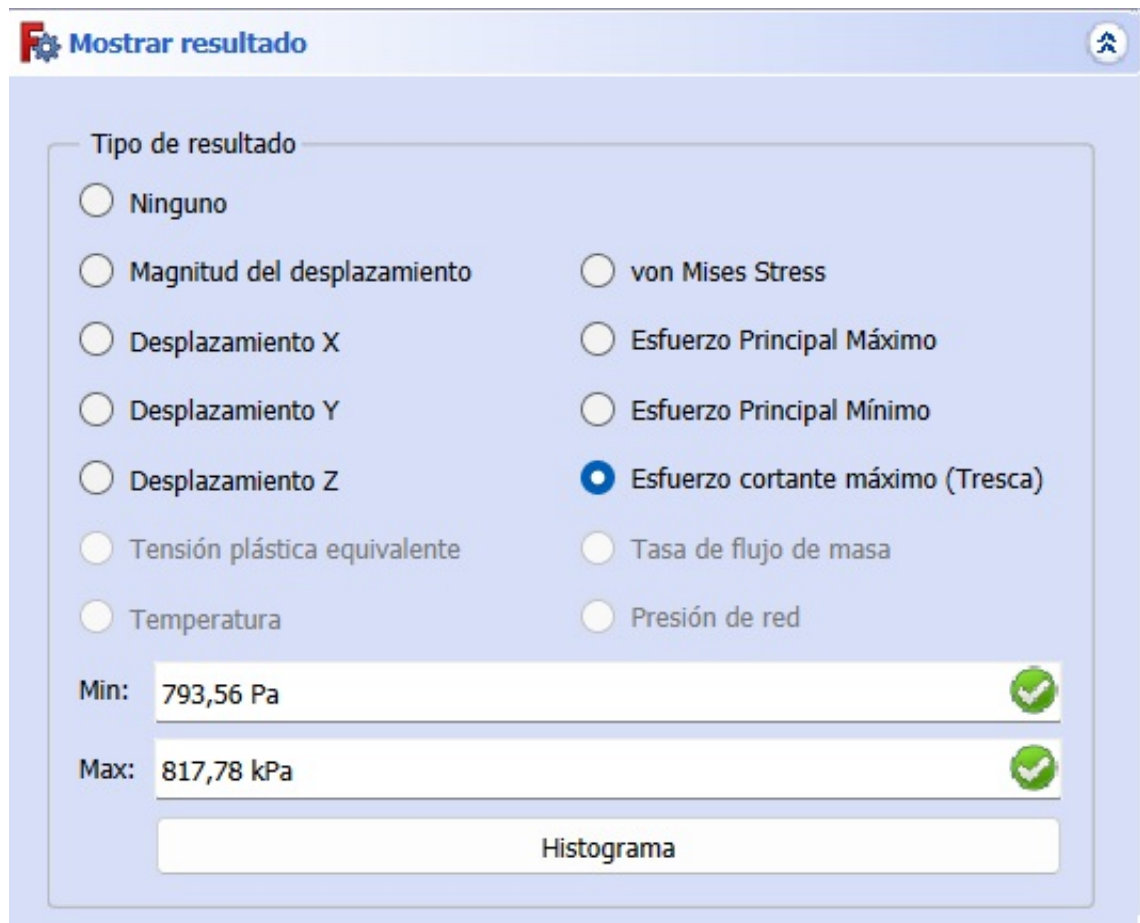


Figura 4.20: Datos del esfuerzo máximo causado por la presión en escape cuando está abierta

Fuente: Colección propia

5 Conclusiones

Se ha simulado las condiciones de las válvulas más próximas posibles a las de trabajo. Utilizando los valores representados en la tabla 1.1.

Como resultado de la simulación, la deformación de las válvulas en condiciones normales de trabajo están reflejados en las tablas 5.1 y 5.2.

Según todos los resultados expuestos anteriormente de los análisis y las marcas de las piezas que se tuvieron que sustituir, la hipótesis más plausible de como ocurrió en sí la avería, es que la válvula se deformó hasta tal punto que se atascase en el alojamiento de las válvulas de la culata. Haciendo que esta golpease con el pistón, provocando los daños que se pueden observar en la zona donde están los balancines. Después, aparte del golpeteo de las válvulas, dos de ellas se fracturaron por compresión golpeando el cilindro y la culata, para finalmente una de ellas incrustarse en la misma, y la otra no se pudo encontrar ya que se introdujo por el colector de escape produciendo daños en la turbo.

| | Efecto de: Temperatura | Efecto de: Presión |
|---------|---------------------------------------|--------------------|
| abierta | 21,45 micrómetros – 67,06 micrómetros | 8,96 mm |
| cerrada | 86,42 micrómetro – 0,46 mm | 0,45 mm |

Tabla 5.1: Deformación de admisión en condiciones normales de trabajo

| | Efecto de: Temperatura | Efecto de: Presión |
|---------|-----------------------------|--------------------|
| abierta | 0,43 mm – 0,78 mm | 9,13 mm |
| cerrada | 18,39 micrómetros – 0,29 mm | 0,38 mm |

Tabla 5.2: Deformación de escape en condiciones normales de trabajo

Anexos

A Figuras adicionales

En este anexo se incluyen diferentes figuras para añadir o complementar lo explicado en el trabajo.



Figura A.1: Posición de las válvulas en la culata dañada
Fuente: Colección propia



Figura A.2: Marcas en la cabeza del pistón causadas por el golpeteo de las válvulas
Fuente: Colección propia



Figura A.3: Daños observados en los balancines de la culata N^o9 del motor auxiliar N^o2

Fuente: Colección propia



Figura A.4: Otra vista del motor aux. N^o2
Fuente: Colección propia



Figura A.5: Motor con la turbo dañada
Fuente: Colección propia



Figura A.6: Colocando la turbo nueva en el motor
Fuente: Colección propia

Mostrar resultado

Tipo de resultado

Ninguno
 Magnitud del desplazamiento
 Desplazamiento X
 Desplazamiento Y
 Desplazamiento Z
 Tensión plástica equivalente
 Temperatura
 von Mises Stress
 Esfuerzo Principal Máximo
 Esfuerzo Principal Mínimo
 Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
 Tasa de flujo de masa
 Presión de red

Min: 0,00 mm ✓

Max: 8,96 nm ✓

Histograma

Figura A.7: Deformación causada por la presión en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta

Fuente: Colección propia

Mostrar resultado

Tipo de resultado

Ninguno
 Magnitud del desplazamiento
 Desplazamiento X
 Desplazamiento Y
 Desplazamiento Z
 Tensión plástica equivalente
 Temperatura
 von Mises Stress
 Esfuerzo Principal Máximo
 Esfuerzo Principal Mínimo
 Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
 Tasa de flujo de masa
 Presión de red

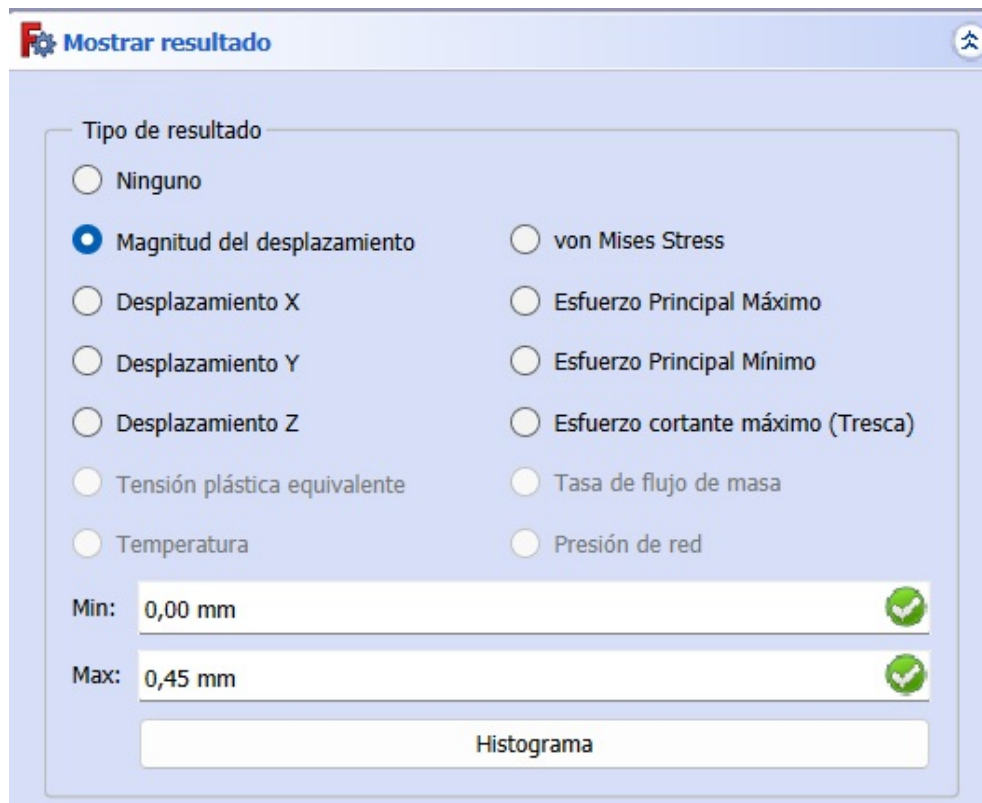
Min: 0,00 mm ✓

Max: 9,13 nm ✓

Histograma

Figura A.8: Deformación causada por la presión en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta

Fuente: Colección propia



Mostrar resultado

Tipo de resultado

- Ninguno
- Magnitud del desplazamiento
- Desplazamiento X
- Desplazamiento Y
- Desplazamiento Z
- Tensión plástica equivalente
- Temperatura
- von Mises Stress
- Esfuerzo Principal Máximo
- Esfuerzo Principal Mínimo
- Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
- Tasa de flujo de masa
- Presión de red

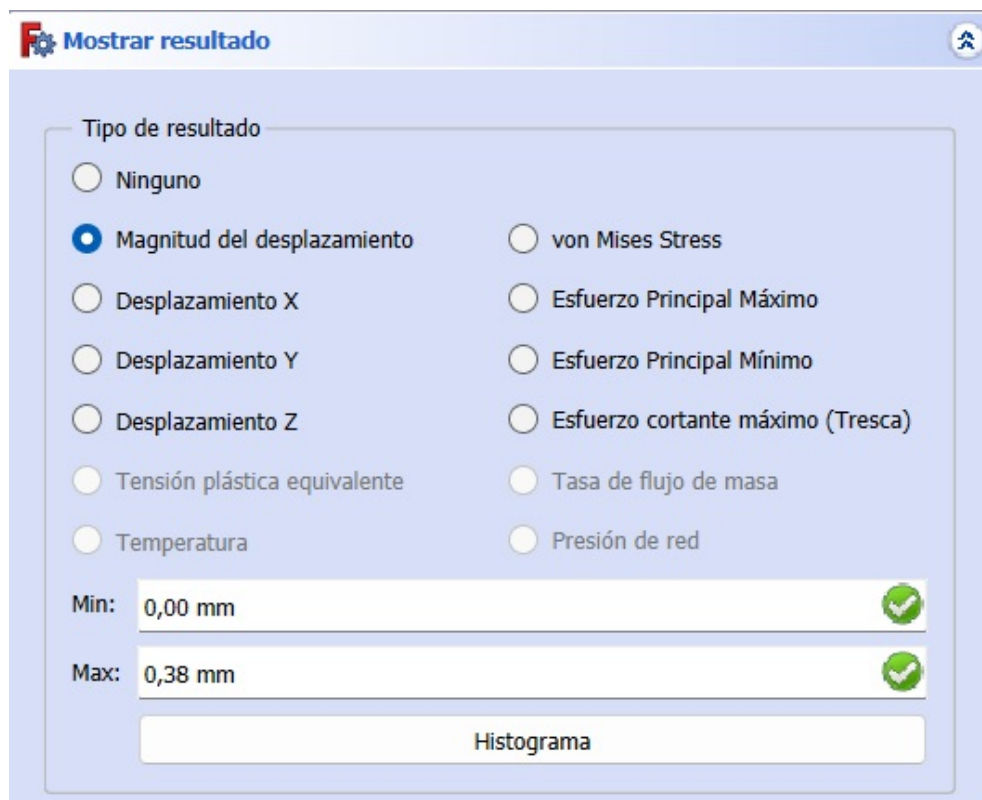
Min: 0,00 mm ✓

Max: 0,45 mm ✓

Histograma

Figura A.9: Deformación causada por la presión en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada

Fuente: Colección propia



Mostrar resultado

Tipo de resultado

- Ninguno
- Magnitud del desplazamiento
- Desplazamiento X
- Desplazamiento Y
- Desplazamiento Z
- Tensión plástica equivalente
- Temperatura
- von Mises Stress
- Esfuerzo Principal Máximo
- Esfuerzo Principal Mínimo
- Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
- Tasa de flujo de masa
- Presión de red

Min: 0,00 mm ✓

Max: 0,38 mm ✓

Histograma

Figura A.10: Deformación causada por la presión en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada

Fuente: Colección propia

Mostrar resultado

Tipo de resultado

Ninguno
 Magnitud del desplazamiento
 Desplazamiento X
 Desplazamiento Y
 Desplazamiento Z
 Tensión plástica equivalente
 Temperatura
 von Mises Stress
 Esfuerzo Principal Máximo
 Esfuerzo Principal Mínimo
 Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
 Tasa de flujo de masa
 Presión de red

Min: 21,45 µm ✓

Max: 67,06 µm ✓

Histograma

Figura A.11: Deformación causada por la temperatura en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta

Fuente: Colección propia

Mostrar resultado

Tipo de resultado

Ninguno
 Magnitud del desplazamiento
 Desplazamiento X
 Desplazamiento Y
 Desplazamiento Z
 Tensión plástica equivalente
 Temperatura
 von Mises Stress
 Esfuerzo Principal Máximo
 Esfuerzo Principal Mínimo
 Esfuerzo cortante máximo (Tresca)
 Tasa de flujo de masa
 Presión de red

Min: 18,39 µm ✓

Max: 0,29 mm ✓

Histograma

Figura A.12: Deformación causada por la temperatura en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta abierta

Fuente: Colección propia

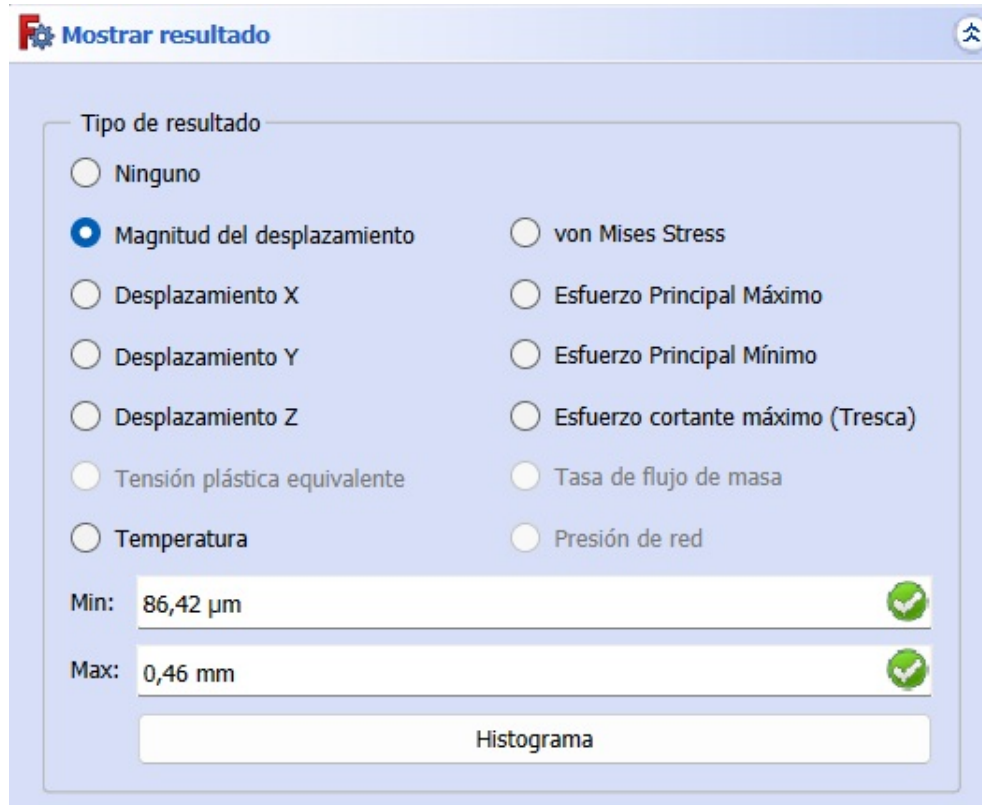


Figura A.13: Deformación causada por la temperatura en admisión en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada

Fuente: Colección propia



Figura A.14: Deformación causada por la temperatura en escape en condiciones normales de trabajo cuando la válvula esta cerrada

Fuente: Colección propia

Bibliografía

- [1] DESCONOCIDO, “Ambiente de trabajo DiseñoPiezas”. [en línea], consultado el 30 de enero de 2024. Url:<https://wiki.freecad.org/PartDesignWorkbench/es>.
- [2] DESCONOCIDO, “FEM Workbench”. [en línea], consultado el 30 de enero de 2024. Url:<https://wiki.freecad.org/FEMWorkbench>.
- [3] DESCONOCIDO, “FreeCAD”. [en línea], consultado el 30 de enero de 2024. Url:https://wiki.freecad.org/Manual:What_is_FreeCAD/es.
- [4] DESCONOCIDO, “Sketcher Workbench”. [en línea], consultado el 30 de enero de 2024. Url:<https://wiki.freecad.org/SketcherWorkbench>.