



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA
ELECTRÓNICA**

TESIS

**ANÁLISIS NUMÉRICO EN PRUEBA DE
ENVEJECIMIENTO ACELERADO POR
TEMPERATURAS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
AUTOMOTRICES**

PRESENTA:

ISRAEL GONZÁLEZ VÁZQUEZ

ASESOR:

M.C. JUAN MANUEL JIMÉNEZ RODRÍGUEZ



PUEBLA, PUE. DICIEMBRE 2023

Resumen

El enfoque principal de este estudio fue llevar a cabo una simulación de una prueba de envejecimiento acelerado aplicada al cofre del vehículo Toyota Yaris 2010 [1]. Esto implicó un análisis numérico en condiciones térmicas en estado transitorio, combinado con un análisis estático estructural. La importancia de realizar el análisis de este componente radica en que los resultados obtenidos y la investigación realizada permiten proponer una metodología que puede aplicarse en pruebas similares en otros ensambles automotrices. Se realizó una validación numérica de los resultados de una investigación científica, que sirvió como base metodológica para los análisis realizados en el cofre del vehículo Toyota Yaris 2010 [1]. Como resultado de esto, se obtuvo un modelo virtual del cofre que se utilizó en la simulación numérica asistida por computadora.

Posteriormente, se procede a la recopilación de parámetros y al desarrollo del análisis térmico transitorio y estructural estático, haciendo uso del material generalmente empleado de manera numérica.

Finalmente, se evalúan las holguras resultantes durante la prueba en diversas ubicaciones del cofre con el fin de comprender la importancia de la prueba en la evaluación de los componentes ensamblados bajo distintas condiciones de temperatura, con el propósito de proponer una metodología útil para investigaciones futuras basada en los resultados obtenidos.

En última instancia, se concluye sobre la importancia del uso de herramientas numéricas, como el software de elemento finito ANSYS Academic 2022 R2, en la validación de la investigación científica y en el cofre para validar la prueba de envejecimiento acelerado. Esto, a su vez, reduce el número de diseños de prototipos que se someten a pruebas de laboratorio.

Contenido

Resumen	I
Contenido	II
Lista de figuras	IV
Lista de tablas	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Justificación	9
1.3. Objetivo general.....	10
1.4. Objetivos particulares	10
1.5. Alcances y limitaciones.....	11
1.6. Descripción de la solución	12
1.7. Organización de la tesis	14
CAPÍTULO 2	15
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Pruebas de envejecimiento acelerado en la industria automotriz	15
2.2. Tópicos de transferencia de calor	23
2.3. Análisis térmico transitorio	39
2.4. Análisis termo-mecánico.....	43
CAPÍTULO 3	47
3. VALIDACIÓN CON ELEMENTO FINITO DE METODOLOGÍAS Y RESULTADOS UTILIZADOS COMO REFERENCIA.....	47

3.1.	Metodología de análisis térmico transitorio de difusión de calor.....	47
3.1.1.	Validación de resultados numéricos	55
3.2.	Metodología de análisis termo-mecánico aplicado en la estructura de un micro-voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos	57
3.2.1.	Comportamiento del voladizo a diferentes temperaturas.....	60
3.2.1.1.	Validación de resultados numéricos	65
3.2.2.	Con variación de temperatura dependiente del tiempo	66
3.2.2.1.	Validación de resultados numéricos	71
CAPITULO 4		74
4.	PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO POR TEMPERATURA EN UN COFRE AUTOMOTRIZ	74
4.1.	Modelo CAE del cofre de un Toyota Yaris Modelo 2010	74
4.2.	Análisis térmico transitorio	77
4.3.	Análisis termo-mecánico del cofre de un Toyota Yaris 2010 sometido a la prueba de envejecimiento acelerado.....	87
4.4.	Análisis de holguras resultantes durante la prueba de envejecimiento acelerado	89
CAPÍTULO 5		110
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	110
5.1.	Conclusiones	110
5.2.	Recomendaciones para trabajos futuros	112
Referencias		115

Lista de figuras

Figura 1.1 Cámara de envejecimiento acelerado [4]	1
Figura 1.2 Cofre Toyota Yaris Sedán 2010 [6]	2
Figura 1.3 Toyota Yaris Sedán 2010 [7]	3
Figura 1.4 Las direcciones básicas de la prueba de envejecimiento acelerado [12]5	
Figura 1.5 Carga térmica propuesta para la prueba de envejecimiento acelerado ¹	13
Figura 2.1 Ejemplo aplicación de transferencia de calor [21]	25
Figura 2.2 Modos de transferencia de calor [19]: a) Conducción, b) Convección y c) Radiación.	25
Figura 2.3 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular [19]	26
Figura 2.4 Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A [21].	27
Figura 2.5 Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente [21]	29
Figura 2.6 Tipos de convección de acuerdo a la naturaleza del flujo [19]: a) Forzada y b) Natural.....	34
Figura 2.7 intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una superficie y sus alrededores [19]	37
Figura 2.8 Placa infinita sujeta a enfriamiento brusco de superficies [22]	40
Figura 2.9 Gráfica de los resultados de 145 pruebas de 21 aceros al carbono y aleados que muestra el efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la fluencia S_y y la resistencia última S_{ut} . [25]	43
Figura 2.10 Curva termofluencia-tiempo [25]	44
Figura 2.11 Elongación de una varilla debido al incremento de temperatura [27] .	46

Figura 3.1 Diagrama de objeto circular con propiedades constantes [8].....	48
Figura 3.2 Modelo virtual de objeto circular con propiedades constantes.	48
Figura 3.3 Propiedades térmicas de objeto circular con propiedades constantes.	48
Figura 3.4 Condición térmica de frontera aplicada en objeto circular con propiedades constantes.	49
Figura 3.5 Distribución de temperatura en el segundo 6 en punto de interés, marcado en color azul.	49
Figura 3.6 Distribución de temperatura en el segundo 600 en punto de interés, marcado en color azul.	50
Figura 3.7 Distribución de temperatura en el segundo 1200 en punto de interés, marcado en color azul.	50
Figura 3.8 Distribución de temperatura en el segundo 1800 en punto de interés, marcado en color azul.	51
Figura 3.9 Distribución de temperatura en el segundo 2400 en punto de interés, marcado en color azul.	51
Figura 3.10 Distribución de temperatura en el segundo 3000 en punto de interés, marcado en color azul.	52
Figura 3.11 Distribución de temperatura en el segundo 3600 en punto de interés, marcado en color azul.	52
Figura 3.12 Distribución de temperatura en el segundo 4200 en punto de interés, marcado en color azul.	53
Figura 3.13 Distribución de temperatura en el segundo 4800 en punto de interés, marcado en color azul.	53
Figura 3.14 Distribución de temperatura en el segundo 5400 en punto de interés, marcado en color azul.	54

Figura 3.15 Comparativo de resultados entre artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada.....	57
Figura 3.16 Diagrama de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos [10]	57
Figura 3.17 Modelo 3D de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos. .	58
Figura 3.18 Diagrama de materiales de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos.....	59
Figura 3.19 Propiedades térmicas y propiedades mecánicas del Oro utilizado [9]	59
Figura 3.20 Propiedades térmicas y propiedades mecánicas del Titanio utilizado [9]	60
Figura 3.21 Condiciones térmicas aplicadas	60
Figura 3.22 Perfil de temperatura aplicado de acuerdo a artículo de investigación científica [9]	61
Figura 3.23 Condiciones de frontera aplicadas para el estudio termo mecánico ..	61
Figura 3.24 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 50 °C	62
Figura 3.25 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 100 °C	62
Figura 3.26 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 150 °C	63
Figura 3.27 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 200 °C	63
Figura 3.28 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 250 °C	64
Figura 3.29 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 300 °C	64
Figura 3.30 Comparativo de resultados	65
Figura 3.31 Perfil De temperatura aplicado de acuerdo a articulo de investigación científica [10]	67
Figura 3.32 Condiciones de frontera de temperatura aplicadas	67
Figura 3.33 Condiciones de frontera aplicadas	68

Figura 3.34 Desplazamiento del voladizo transcurridos 1 segundo	69
Figura 3.35 Desplazamiento del voladizo transcurridos 2160 segundos.....	69
Figura 3.36 Desplazamiento del voladizo transcurridos 20000 segundos.....	70
Figura 3.37 Desplazamiento del voladizo transcurridos 38330 segundos.....	70
Figura 3.38 Desplazamiento del voladizo transcurridos 41160 segundos.....	71
Figura 3.39 Resultados numéricos ANSYS 2022 vs referencia [10]	72
Figura 4.1 Modelo 3D de cofre de Toyota Yaris obtenido de CCSA [28]	74
Figura 4.2 Comparativa entre elementos: solid, shell y solid shell [30].	75
Figura 4.3 Modelo corregido y optimizado para el análisis: a) Vista superior y b) Vista inferior	76
Figura 4.4 Punto de validación paramétrica del cofre corregido.....	76
Figura 4.5 Propiedades térmicas asignadas al material del cofre empleado.	78
Figura 4.6 Carga térmica aplicada durante el análisis térmico transitorio	79
Figura 4.7 Exposición a la radiación solar: a) Vista isométrica y b) Sección transversal de vista lateral.....	79
Figura 4.8 Factor de emisividad del cofre empleado en la investigación	80
Figura 4.9 Distribución de temperatura en el cofre, después de 432 segundos: a) Vista superior y b) Vista inferior.....	80
Figura 4.10 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 12 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	81
Figura 4.11 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 24 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	82
Figura 4.12 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 36 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	82
Figura 4.13 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 48 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	83

Figura 4.14 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 60 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	84
Figura 4.15 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 72 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	85
Figura 4.16 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 84 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.	86
Figura 4.17 Grafico comparativo de la distribución de temperatura en el cofre.....	86
Figura 4.18 Conexión esquemática entre el estudio térmico transitorio el estudio estático estructural	87
Figura 4.19 Propiedades de contacto para observar la holgura resultante	88
Figura 4.20 Condiciones de frontera para el análisis estático estructural	88
Figura 4.21 Holgura del cofre al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado.	89
Figura 4.22 Puntos de holgura en particular analizados	90
Figura 4.23 Holgura al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	90
Figura 4.24 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	91
Figura 4.25 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	91
Figura 4.26 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	92
Figura 4.27 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	92
Figura 4.28 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	93

Figura 4.29 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A	94
Figura 4.30 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto A.....	94
Figura 4.31 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A.....	95
Figura 4.32 Holgura resultante al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B.....	96
Figura 4.33 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	96
Figura 4.34 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	97
Figura 4.35 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	98
Figura 4.36 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	98
Figura 4.37 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	99
Figura 4.38 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B	99
Figura 4.39 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto B.....	100
Figura 4.40 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B.....	101
Figura 4.41 Holgura resultante al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C.....	102

Figura 4.42 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	102
Figura 4.43 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	103
Figura 4.44 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	103
Figura 4.45 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	104
Figura 4.46 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	105
Figura 4.47 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C	105
Figura 4.48 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto C.....	106
Figura 4.49 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C.....	107

Lista de tablas

Tabla 1.1 Tiempos de carga térmica ¹	13
Tabla 2.1 Factor de envejecimiento para vehículo con garantía de 36 000 millas [15]	19
Tabla 2.2 Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente [21].....	30
Tabla 2.3 Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura [21]	30
Tabla 2.4 Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente [21]	32
Tabla 2.5 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [21]	35
Tabla 2.6 Emisividades de algunos materiales a 300 K [21]	38
Tabla 2.7 Coeficientes de dilatación térmica (Coeficientes medios lineales para el intervalo de temperatura de 0 a 100°C) [26]	45
Tabla 3.1 Comparativo de resultados numéricos entre artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada.....	55
Tabla 3.2 Porcentaje de error relativo entre los resultados numéricos del artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada	56
Tabla 3.3 Parámetros utilizados por el artículo de investigación científica [10].....	58
Tabla 3.4 Porcentaje de error relativo entre resultados a diferentes temperaturas.....	66
Tabla 3.5 Porcentaje de error relativo entre resultados con temperatura transiente	72
Tabla 4.1 Comparativo de holguras resultante vs tiempo para los puntos A, B y C.	108

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria automotriz se destaca como una de las más importantes y competitivas a nivel mundial. En este contexto, los fabricantes se enfrentan al desafío de ofrecer vehículos que satisfagan las crecientes expectativas de calidad y seguridad de los clientes [2].

En consecuencia, con el objetivo de diseñar y fabricar vehículos más eficientes y seguros, una de las técnicas utilizadas para evaluar la resistencia de los materiales es la prueba de envejecimiento acelerado por temperaturas. Esta prueba somete a los materiales a condiciones extremas de temperaturas con el propósito de simular el envejecimiento y evaluar su desempeño a largo plazo [3]. Específicamente, esta prueba expone a los materiales a altas temperaturas y ciclos de enfriamiento rápidos. Sin embargo, realizar estas pruebas de manera física en cámaras de envejecimiento acelerado implica la necesidad de instalaciones amplias, como se ilustra en la figura 1.1 [4]. Además, se requiere equipo especializado para llevar a cabo este tipo de pruebas, lo que conlleva un procedimiento costoso y consume mucho tiempo debido a la necesidad de realizar ajustes específicos para cada tipo de objeto que se va a evaluar.



Figura 1.1 Cámara de envejecimiento acelerado [4]

En respuesta a esta necesidad, la simulación numérica a través de software especializado se convierte en una valiosa herramienta para evaluar el comportamiento de los componentes de los vehículos en diversas condiciones térmicas y mecánicas. Esto permite a los fabricantes diseñar vehículos más seguros y de mayor calidad a un tiempo menor y con ahorro de recursos. Esta técnica combina principios de física, mecánica y termodinámica para analizar y predecir el comportamiento de sistemas físicos en condiciones extremas. Uno de los software ampliamente utilizado con este propósito es ANSYS, que posibilita el análisis de fenómenos como la transferencia de calor, la deformación y el esfuerzo en distintos componentes del vehículo, optimizando así el proceso de diseño, reduciendo costos y acelerando el tiempo de comercialización [5].

Por otro lado, el cofre de un vehículo desempeña un papel crítico en la protección del motor y otros componentes vitales, además de contribuir a la aerodinámica y la reducción de ruido y vibraciones. En consecuencia, resulta importante llevar a cabo un análisis detallado de las holguras resultantes en el cofre para evaluar como la temperatura afecta su desempeño y funcionalidad a lo largo de su vida útil.



Figura 1.2 Cofre Toyota Yaris Sedán 2010 [6]

Asimismo, la holgura resultante se considera como una medida de la deformación en la estructura del vehículo bajo ciertas condiciones de carga, y puede ser ocasionada por diversos factores, incluyendo la temperatura y los esfuerzos mecánicos.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis numérico de las holguras resultantes en la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura aplicada al cofre del vehículo Toyota Yaris 2010, tal como se muestra en la figura 1.2 [6]. Esto se realiza con el propósito de comprender y predecir el comportamiento del cofre del Toyota Yaris 2010, el cual se ilustra en la figura 1.3 [7], bajo condiciones extremas de envejecimiento acelerado.



Figura 1.3 Toyota Yaris Sedán 2010 [7]

También se presenta un panorama general del análisis realizado, que incluye una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura y análisis numérico de estructuras automotrices. Esto proporciona una sólida comprensión de los conceptos y técnicas relevantes en el campo de estudio.

Asimismo, se toman como referencia metodologías que, aunque difieren en geometría y mecánica específica, comparten la base de análisis térmico y análisis termo-mecánico basado en el método de elementos finitos. Estas metodologías consideran un análisis térmico transitorio de difusión de calor en un objeto con forma circular y propiedades constantes [8], así como un análisis termo-mecánico aplicado en la estructura de un micro-voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos (MEMS) [9, 10]. La inclusión de estas referencias se justifica por la necesidad de adaptar principios previamente validados al análisis térmico y termo-mecánico en el cofre del Toyota Yaris 2010, asegurando así la consistencia interna de la metodología propuesta.

Además, se obtiene un modelo tridimensional del cofre del vehículo, el cual se utiliza como objeto de estudio. Esto se realiza teniendo en cuenta las especificaciones geométricas, las propiedades materiales, así como las características de ensamblaje y fijación al chasis del vehículo. Posteriormente, se realiza un análisis numérico en el que se aplican las condiciones de temperatura correspondientes a la prueba de envejecimiento acelerado por temperaturas, simulando los ciclos térmicos a los que se somete el cofre.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se realiza una evaluación detallada de las holguras resultantes en el cofre del Toyota Yaris 2010. Los resultados se comparan con la condición inicial del cofre, analizando su distribución y determinando su impacto en la integridad estructural y la funcionalidad del cofre. Se espera que los resultados obtenidos permitan sentar las bases para futuros estudios en este campo y contribuyan al desarrollo de nuevas metodologías y herramientas para la evaluación del rendimiento y la optimización del diseño de los componentes automotrices sometidos a condiciones extremas de temperatura. Además, se prevé que proporcionen información valiosa para la industria automotriz en el diseño y fabricación de vehículos más seguros y eficientes.

1.1. Planteamiento del problema

En la industria automotriz, la evaluación del rendimiento y la seguridad de los vehículos es de suma importancia para garantizar la calidad del vehículo y la satisfacción del cliente. Por este motivo, el propósito primordial de la prueba de envejecimiento acelerado es obtener información inicial relacionada con la calidad, confiabilidad, mantenibilidad, soporte y disponibilidad [11]. Esto se logra mediante la predicción del comportamiento final utilizando la información proporcionada por la prueba, simulando el desgaste de los materiales y evaluando su desempeño a largo plazo. Sin embargo, en el análisis del envejecimiento existen tres posibles direcciones básicas a seguir [12], como se ilustra en la figura 1.4.

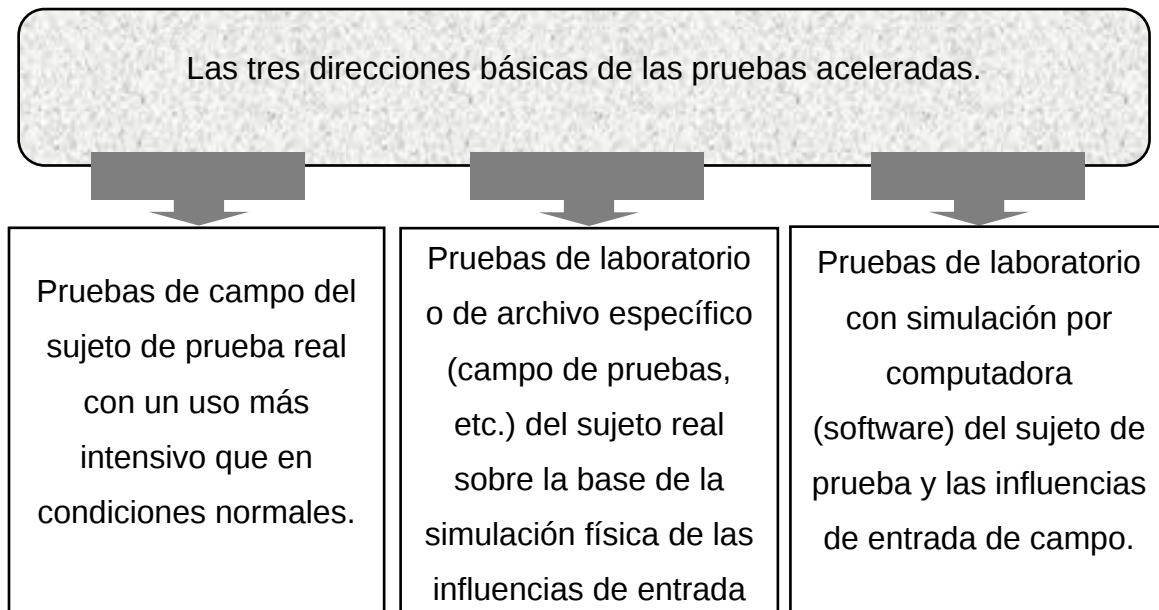


Figura 1.4 Las direcciones básicas de la prueba de envejecimiento acelerado [12]

La primera técnica se realiza en condiciones naturales (en campo), y es la más efectiva para evaluar un producto. No obstante, consume demasiado tiempo, lo que puede convertirse en un problema que retrasa el proceso de diseño.

La segunda técnica se lleva a cabo en condiciones de laboratorio (artificiales), dentro de cámaras climáticas. Sin embargo, para cada método o tipo de equipo a probar, se requiere equipo especializado e instalaciones de prueba adecuadas, lo que resulta en costos significativos.

Otra técnica empleada es el enfoque basado en la simulación numérica por computadora (software). La simulación numérica por computadora se define como "una recreación matemática no analítica de un proceso natural utilizando software especializado" [13]. Mediante el uso de simulaciones numéricas, se pueden estudiar procesos físicos, de ingeniería, económicos e incluso biológicos. La utilización de simulaciones numéricas para abordar un problema suele requerir un cuidadoso estudio de los métodos numéricos y algoritmos a utilizar, así como de los procesos fundamentales que deben incluirse en la simulación.

Por esta razón, resulta factible abordar esta problemática a través de un análisis numérico que permite obtener una aproximación de los efectos de la prueba, lo que ahorra costos y tiempos.

En este contexto, uno de los propósitos de la prueba de envejecimiento acelerado es predecir el comportamiento de las holguras resultantes en la estructura de un componente automotriz. Cada holgura específica entre piezas tiene una medida determinada y tolerancias aceptadas por el fabricante. Para obtener estos datos, es necesario consultar el manual del fabricante. En caso de no contar con esta información, se puede medir la holgura inicial y compararla con la final.

Además, la holgura resultante representa una medida de la deformación en la estructura del vehículo bajo ciertas condiciones de carga, la cual puede ser causada por diversos factores, como la temperatura y los esfuerzos mecánicos. Considerando lo anterior, la holgura adquiere una importancia crítica en relación con la seguridad del vehículo y el confort de los ocupantes, tanto el conductor como los pasajeros.

Así, por ejemplo, algunos elementos de la carrocería, como el cofre, las puertas o la cajuela, se abren de forma continua. Esto hace que sea fundamental comprobar que su apertura y cierre se desarrollen con suavidad a lo largo de su vida útil. Un cierre que requiere un golpe fuerte al cerrar, o una apertura que muestra resistencia

y empuja la puerta con cierta brusquedad al abrirse, son síntomas muy molestos para el propietario del vehículo.

El vehículo Toyota Yaris 2010 es ampliamente reconocido, y su cofre desempeña un papel importante en la seguridad y el rendimiento del automóvil. Sin embargo, la evaluación de la holgura en el cofre del Toyota Yaris 2010 es un desafío técnico que requiere herramientas avanzadas de análisis. Hasta ahora, no se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de las holguras resultantes en el cofre durante la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, lo que limita la comprensión de los efectos de la prueba y dificulta el desarrollo de estrategias para mejorar la resistencia y durabilidad de los componentes automotrices.

Además, durante la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, el cofre se expone a condiciones extremas, como altas temperaturas y ciclos de enfriamiento rápidos, que pueden provocar deformaciones, tensiones y holguras que afecten la integridad estructural y la funcionalidad del cofre. Este componente es esencial para proteger el compartimento del motor y otros sistemas importantes.

Por consiguiente, es factible abordar esta problemática mediante un análisis numérico confiable, como el método de elementos finitos, que permite simular el comportamiento del material y prever las deformaciones y tensiones resultantes, proporcionando una evaluación detallada de las holguras en el cofre del vehículo Toyota Yaris 2010 durante la realización de la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura. Esta investigación proporciona información crucial para identificar posibles deficiencias en el diseño del cofre y, a su vez, contribuye al desarrollo de estrategias efectivas para mejorar la resistencia y durabilidad de los componentes automotrices expuestos a condiciones extremas de temperatura.

Aunque existen diversas técnicas y herramientas disponibles para llevar a cabo simulaciones numéricas de la estructura del vehículo, el análisis termo-mecánico representa un desafío que requiere la combinación de técnicas de análisis mecánico y térmico. Además, el análisis de la holgura en el cofre del Toyota Yaris 2010

demanda una comprensión detallada de la geometría y los materiales utilizados en su construcción. Con una aproximación integral, es posible evaluar de manera precisa la holgura en el cofre durante la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura y, así, comprender el comportamiento de los componentes automotrices sometidos a esta prueba.

En este contexto, el problema central de esta tesis reside en la necesidad de comprender cómo distintas condiciones de carga térmica afectan la holgura resultante en la estructura del cofre del vehículo Toyota Yaris 2010. La holgura en el cofre representa un factor clave que puede indicar deformaciones excesivas o estrés en la estructura del vehículo, lo cual compromete la seguridad y comodidad del conductor y los pasajeros. Para abordar esta problemática, se propone la aplicación de técnicas de simulación numérica utilizando el análisis de elementos finitos (FEA) para analizar el comportamiento termo-mecánico del cofre del vehículo bajo diversas condiciones de carga. Esta investigación busca proporcionar una solución práctica y eficiente al desafío técnico crítico de entender cómo las temperaturas afectan la holgura resultante en el cofre, evitando la necesidad de pruebas físicas y optimizando el tiempo y los costos asociados.

A partir de la bibliografía consultada en relación con los temas de envejecimiento acelerado por temperatura y análisis termo-mecánico, se observa que todavía existe un amplio campo por explorar en este ámbito del conocimiento. En este sentido, esta propuesta de tesis plantea el desarrollo de una investigación para el análisis numérico de una prueba de envejecimiento acelerado por temperatura aplicada a un cofre automotriz, con el propósito de establecer las bases para investigaciones posteriores y ofrecer una solución de menor costo.

1.2. Justificación

El análisis numérico de un componente automotriz durante la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura es de gran relevancia en la industria automotriz. El propósito de esta prueba consiste en proporcionar información que permita mejorar la seguridad y el rendimiento de los vehículos al identificar posibles deformaciones excesivas o estrés en la estructura de sus componentes.

Además, el uso de métodos de análisis numérico contribuye a la optimización del proceso y a la toma de decisiones relacionadas con la resistencia y durabilidad del cofre, lo que ahorra tiempo y costos al reducir la necesidad de realizar pruebas físicas.

Por otro lado, el análisis actual permite comprender mejor los efectos del envejecimiento acelerado por temperatura en el cofre del Toyota Yaris 2010, proporcionando información valiosa para futuras investigaciones y mejoras en la industria automotriz. Asimismo, los hallazgos y metodologías desarrollados en este estudio pueden servir como punto de partida para investigaciones posteriores sobre otros componentes y materiales en el contexto del envejecimiento acelerado por temperatura.

Finalmente, de acuerdo con la revisión bibliográfica consultada hasta ahora, se observa que hay poca información disponible respecto al análisis numérico de la prueba de envejecimiento acelerado. Por ello, esta propuesta de tesis se centra en la evaluación del comportamiento del cofre al ser sometido a variaciones de temperatura propias de la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, con el objetivo de realizar una comparativa del comportamiento de las holguras durante la prueba.

1.3. Objetivo general

Analizar numéricamente el comportamiento de las holguras resultantes en el cofre del vehículo Toyota Yaris 2010 después de ser sometido a la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura.

1.4. Objetivos particulares

- a) Interpretar los conceptos, métodos y técnicas relevantes sobre pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura y análisis numérico de componentes automotrices.
- b) Validar de forma numérica un artículo de investigación científica, sobre análisis térmico transitorio y un artículo de investigación científica sobre análisis termo-mecánico, que sean utilizados como referencia para la metodología de investigación empleada.
- c) Obtener un modelo CAD tridimensional del cofre del vehículo Toyota Yaris 2010, en función de las especificaciones geométricas disponibles.
- d) Analizar de forma numérica las condiciones de frontera correspondientes a la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, aplicado al modelo del cofre del Toyota Yaris 2010.
- e) Evaluar los desplazamientos y tensiones resultantes en el cofre, así como determinar las holguras resultantes en diferentes áreas del cofre mediante el análisis numérico.

1.5. Alcances y limitaciones

En esta sección se exponen las restricciones o limitaciones que deben considerarse durante el desarrollo del estudio, las cuales son necesarias para alcanzar el objetivo planteado. De esta manera, los siguientes alcances y limitaciones permiten establecer expectativas realistas y definir el alcance del trabajo de investigación.

Alcances

- a) Análisis numérico de las holguras resultantes en el cofre del vehículo Toyota Yaris 2010 después de ser sometido a la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura.
- b) Obtención de un modelo virtual, que represente las características del modelo físico.
- c) Análisis numérico mediante el software de elemento finito ANSYS Academic 2022 R2, del cofre de un vehículo seleccionado como caso de estudio.

Limitaciones

- a) Los resultados obtenidos estarán sujetos a las limitaciones de los modelos y suposiciones utilizados, así como a las propiedades de los materiales y condiciones de carga y temperatura consideradas.
- b) El análisis numérico estará en función de la información disponible sobre el diseño y las propiedades del cofre del Toyota Yaris 2010.
- c) No se realizará análisis experimental del componente seleccionado como caso de estudio.
- d) No se abordarán otros componentes del vehículo.

- e) Otros factores que pueden influir en la resistencia y durabilidad del cofre, como la corrosión, vibraciones o impactos, no serán abordados en esta investigación.
- f) No se realizarán propuestas de optimización para el diseño del componente.

1.6. Descripción de la solución

El presente trabajo se enfoca en la evaluación del cofre de un Toyota Yaris Sedán Modelo 2010 [1] mediante un análisis numérico, con el objetivo de observar el comportamiento de las holguras en el mismo al aplicar distintas temperaturas durante un período prolongado.

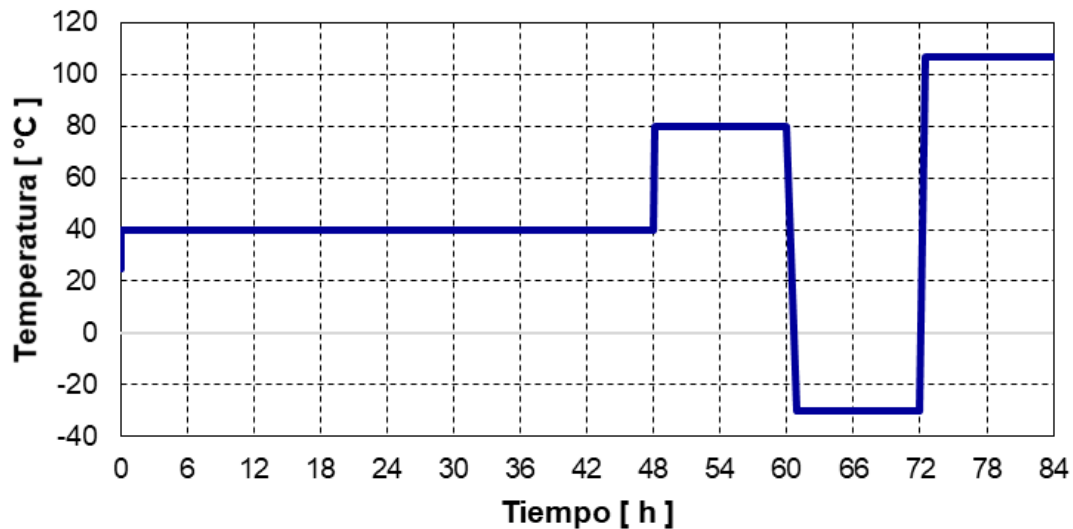
La propuesta de solución de esta tesis abarca las siguientes actividades:

- a) Validación de resultados reportados. Se propone realizar la validación numérica de un artículo de investigación científica sobre un análisis térmico transitorio, así como de un análisis termo-mecánico.
- b) Obtener un modelo virtual del cofre del vehículo Toyota Yaris Sedan 2010.
- c) Recopilar los datos relevantes del cofre del Toyota Yaris 2010, incluyendo las especificaciones geométricas, las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones de frontera aplicadas durante la prueba de envejecimiento acelerado.
- d) Realizar un análisis numérico en condiciones térmicas en estado transitorio. Se utilizará el software de elemento finito ANSYS Academic 2022 R2 para desarrollar el análisis numérico y analizar los resultados térmicos. Los tiempos de carga térmica aplicados se muestran en la tabla 1.1, los cuales serán aplicados como se muestra en la figura 1.5.

Tabla 1.1 Tiempos de carga térmica¹

Secuencia de temperaturas						
Temperatura	Evaluación inicial	40°C	80°C	-30°C	107°C	Evaluación final
Duración	-	48 h	12 h	12 h	12 h	-

Prueba de envejecimiento acelerado

Figura 1.5 Carga térmica propuesta para la prueba de envejecimiento acelerado¹

- e) Realizar un análisis termo-mecánico para analizar las holguras resultantes por la variación de temperatura.
- f) Reportar los hallazgos encontrados como parte de la respuesta termo-mecánica en el cofre seleccionado como caso de estudio, tales como esfuerzos, desplazamientos y holguras en los puntos de interés seleccionados

1. Autoría propia

1.7. Organización de la tesis

La tesis se compone de cinco capítulos. El primer capítulo presenta una introducción general acerca de la prueba de envejecimiento acelerado y la relevancia del cofre en la estructura del vehículo. Se incluye el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos generales y específicos, así como los alcances y limitaciones, junto con la metodología a seguir.

El segundo capítulo profundiza en la bibliografía relacionada con las pruebas de envejecimiento acelerado, los conceptos de transferencia de calor y los análisis térmicos en estado transitorio, así como los análisis termo-mecánicos.

El tercer capítulo se enfoca en el desarrollo de la validación de las metodologías de análisis térmico transitorio y análisis termo-mecánico de los artículos de investigación científica, además de describir la comparación de los resultados obtenidos.

Luego, en el cuarto capítulo, se elabora el modelo numérico para la prueba de envejecimiento acelerado por computadora aplicado al cofre de un vehículo seleccionado como caso de estudio, con el propósito de realizar una posterior comparación de las holguras resultantes al finalizar la prueba.

Finalmente, el quinto capítulo aborda las conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos en los análisis, así como las referencias consultadas que han servido de apoyo durante el proceso de resolución.

CAPÍTULO 2

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tiene como objetivo fortalecer la fiabilidad de la investigación mediante una revisión exhaustiva de la literatura existente. Para lograrlo, se abordan diferentes aspectos relevantes para la investigación, como las pruebas de envejecimiento acelerado en la industria automotriz y los temas relacionados con la transferencia de calor. También se explora el enfoque del análisis térmico transitorio y el análisis termo-mecánico, con el fin de obtener un amplio conocimiento bibliográfico que respalde la metodología de investigación.

2.1. Pruebas de envejecimiento acelerado en la industria automotriz

Un **producto** o **material**, para ser puesto en el mercado, debe ser apropiadamente **diseñado** y luego **probado** [14].

En la industria automotriz, los vehículos se encuentran constantemente expuestos a diversas condiciones y desafíos a lo largo de su vida útil, como cambios de temperatura, vibraciones, humedad, exposición a productos químicos y radiación solar. Estas condiciones pueden impactar la integridad y el rendimiento de los componentes automotrices, lo que, a su vez, puede afectar la seguridad y la calidad del vehículo.

Además, dado que la capacidad de llevar productos automotrices al mercado de manera más rápida, económica y confiable es de suma importancia [15], las pruebas de envejecimiento acelerado desempeñan un papel fundamental al agilizar el proceso de desarrollo y fabricación.

Por lo tanto, el envejecimiento acelerado se presenta como una ventaja, ya que permite evaluar y predecir la vida útil, resistencia y durabilidad de materiales, productos o componentes en un período más corto que en condiciones normales.

Es posible lograr esto al someter piezas o ensamblajes a entornos de prueba que superan los límites de diseño y replican las anomalías de falla observadas durante la operación normal, sin invadir la región de destrucción del sistema [15]. Este proceso implica exponer estos materiales a condiciones extremas, como altas temperaturas, humedad, vibraciones intensas, ciclos repetidos de carga y descarga, así como la exposición a productos químicos agresivos, entre otros factores de estrés. El objetivo es simular y acelerar el proceso de envejecimiento que experimentarían en condiciones reales de uso.

Al mismo tiempo, otra ventaja significativa del envejecimiento acelerado es que facilita la realización de varias iteraciones de diseño en un corto período de tiempo, validando cada iteración a través de pruebas. De esta manera, los productos pueden ser validados de manera sólida antes de ser lanzados al mercado, manteniendo las tasas de defectos por debajo del 0,5 % [15] sin incurrir en un diseño costoso en exceso.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo principal de las pruebas de envejecimiento acelerado es identificar posibles fallas o debilidades en los diseños y materiales de los vehículos antes de que lleguen a los consumidores finales en un período de tiempo más corto. Esto proporciona información valiosa sobre el rendimiento y la durabilidad de los vehículos.

Además, otro objetivo de las pruebas de envejecimiento acelerado es calcular el tiempo de vida útil de los materiales, asegurando que los objetos que salen al mercado o se integran en la cadena productiva cumplan con los requisitos de calidad establecidos en la legislación vigente [16]. Esto permite reproducir, en un tiempo limitado, las condiciones a las que un objeto se sometería durante meses o años. Este proceso es esencial para cumplir con los plazos de planificación y comercialización, ya que no se puede esperar la reacción real de un objeto expuesto a las condiciones de envejecimiento durante largos períodos.

Sin embargo, el envejecimiento acelerado es un fenómeno de deterioro avanzado que no ocurre de manera natural, sino que se induce mediante la exposición controlada a situaciones ambientales artificiales en laboratorios científicos e industriales. Esto se debe a que los equipos de envejecimiento acelerado operan aplicando ciclos de prueba para representar el desgaste que se va a producir [17].

Además, en consideración de que las pruebas de envejecimiento acelerado se llevan a cabo con el propósito de medir la evolución de los materiales frente a condiciones climáticas extremas, es necesario recrear condiciones específicas en cámaras climáticas, combinando diversos factores ambientales para obtener información valiosa sobre las propiedades de las muestras [18].

No obstante, se debe tener en cuenta que cada producto envejece de acuerdo a su entorno de uso, lo que implica diferentes factores de envejecimiento dependiendo de su ubicación dentro del vehículo y cómo se utilicen. Por ejemplo, un automóvil presenta al menos cinco entornos de uso: el compartimento del motor, debajo del tablero, el compartimento de pasajeros, la cajuela y el chasis [15]. Por lo tanto, tener la capacidad de calcular el factor de envejecimiento para cada ubicación de uso permite a un ingeniero desarrollar perfiles de prueba acelerados con períodos de exposición de prueba que no exceden una décima parte de la vida normal. Esto resulta en factores de envejecimiento calculados iguales o superiores a las condiciones de uso normales.

Además, uno de los factores involucrados en la investigación es la tasa de cambio de masa por °C por minuto [15]. Esta medida permite evaluar cómo la masa de un producto cambia en relación con los cambios de temperatura durante un período de tiempo determinado.

También es necesario considerar el número de ciclos térmicos a los que se somete el producto durante las pruebas. Estos ciclos térmicos representan los

cambios repetidos de temperatura a los que se expone el producto para simular su uso en condiciones reales.

A su vez, el total de horas de exposición al entorno de prueba también es un elemento importante, esto debido a que, cuantas más horas se exponga el producto a condiciones extremas, mayor será el envejecimiento acelerado y la validación de su confiabilidad.

Por último, el intervalo de temperaturas en °C es otro aspecto relevante [15]. Este intervalo define los límites de temperatura a los que se someterá el producto durante las pruebas de envejecimiento acelerado.

Debido a esto, resulta especialmente relevante para componentes que, en condiciones favorables, tendrían una expectativa de vida de más de 60 años, pero que sufren degradación debido al desgaste mecánico [15]. Por ejemplo, Siemens NAMO propone un programa de envejecimiento acelerado que busca solucionar la necesidad de validar la tolerancia del diseño en un período de tiempo fijo, reproduciendo artificialmente lo que normalmente tomaría meses o incluso años [15]. Si consideramos un automóvil con una garantía de 50,000 millas que funciona las 24 horas del día a una velocidad promedio de 30 millas por hora, la vida útil de la garantía sería de aproximadamente 70 días. Dado que los ingenieros no disponen de 70 días para validar sus diseños, se hace necesario adoptar métodos de envejecimiento acelerado.

Considerando lo anterior, para un vehículo con una garantía de 36,000 millas, la tabla 2.1 [15] muestra que el factor de envejecimiento es un mínimo de 14 para las condiciones que se muestran. La tabla también presenta escenarios para vehículos con garantías de hasta 150,000 millas y los factores de envejecimiento correspondientes.

Tabla 2.1 Factor de envejecimiento para vehículo con garantía de 36 000 millas [15]

Garantía	Años de Garantía	Horas de vida	Baja temperatura [°C]	Alta temperatura [°C]	Ciclos de vida	Tasa de cambio [°C/min]	Factor de envejecimiento
36 000	3	1 200	40	107	8 760	5	14
50 000	5	1 667	40	107	14 600	5	22
75 000	7	2 500	40	107	20 440	5	32
100 000	8	3 333	40	107	23 360	5	39
150 000	10	5 000	40	107	29 200	5	53

Como resultado de la implementación de este procedimiento, los tiempos de prueba se reducen significativamente en comparación con los métodos tradicionales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que algunas de las condiciones aplicadas pueden exceder los límites de diseño, aunque no lleguen a invadir la región de destrucción.

Métodos de envejecimiento acelerado

En la industria automotriz, se utilizan diversos métodos para llevar a cabo las pruebas de envejecimiento acelerado. Estos métodos son fundamentales para evaluar la resistencia de los materiales y sistemas automotrices frente a entornos adversos. Además, se evalúa la resistencia estructural y la durabilidad de los componentes, así como la resistencia de los materiales automotrices a ambientes corrosivos. También se analiza el impacto de la radiación ultravioleta y la exposición solar en los materiales. Los métodos más comunes incluyen las siguientes pruebas:

- **Envejecimiento acelerado de materiales por radiación:** Dentro de este ámbito, se realizan pruebas para estudiar el proceso de envejecimiento de los materiales durante su exposición a la luz mediante cantidades controladas de radiación ultravioleta. También se llevan a cabo ensayos para comprobar los efectos de radiaciones ionizantes como los rayos X y los rayos gamma.

- **Envejecimiento acelerado de materiales por temperatura:** Este proceso implica situar los materiales en cámaras térmicas que inducen temperaturas específicas, tanto de forma constante como con cambios bruscos [16]. Generalmente, se estudian los rangos térmicos que cada sustancia debe soportar en función de su ubicación geográfica y funcional.
- **Envejecimiento acelerado de materiales por humedad:** Estas pruebas miden la acción corrosiva del agua en sus distintas fases y formas, ya sean naturales o artificiales, teniendo en cuenta factores relevantes como la humedad relativa del aire y su salinidad. Entre los métodos utilizados para llevar a cabo estas pruebas destacan las diferentes modalidades de ensayos de corrosión.
- **Envejecimiento acelerado de materiales por gases contaminantes:** Este tipo de pruebas analizan la acción de los gases presentes en el medio ambiente, incluidos los generados por la contaminación de las ciudades. Se realizan estudios con ozono, dicloro y otros gases corrosivos como el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de azufre o el dióxido de nitrógeno.
- **Envejecimiento acelerado de materiales por erosión:** Este procedimiento implica situar las muestras en un entorno con aire cargado de partículas abrasivas. Esto sirve para medir el desarrollo de la erosión sobre la superficie de los materiales que deben permanecer al aire libre o en lugares con condiciones ambientales exigentes.

En particular, la investigación se enfoca en la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, por lo cual no se profundizará en los otros métodos de envejecimiento.

Normatividad

Existen numerosas regulaciones que rigen los diferentes tipos de pruebas, y cada una de ellas está específicamente diseñada para el tipo de producto que se evalúa. A continuación, se mencionan algunas de las regulaciones más importantes,

que incluyen pruebas de envejecimiento acelerado para la electrónica, así como los productos y áreas de aplicación relacionados [14].

- **Materiales textiles:** AATCC TM186, ISO 105-B02, ISO 105 B-04.
- **Los materiales bituminosos:** ASTM D1670 & ASTM D4799.
- **Los materiales plásticos:** ASTM D4329, ASTM D4674, ASTM D208 & ASTM F1164, ISO 4892-2, ISO 7326-2016, BS-2782-5.
- **Automóvil:** GM 9125P, SAE J2020, JIS-D 0205.
- **Militar:** MIL STD-810F.
- **Componentes electrónicos:** IEC 60068-2-60 e DIN 40046-37.

En resumen, las regulaciones que rigen las pruebas en diferentes sectores y productos son numerosas y específicas. Cada una de ellas tiene como objetivo asegurar la calidad, la seguridad y la durabilidad de los productos en sus respectivas áreas de aplicación. No obstante, aunque las normas establecen el procedimiento para llevar a cabo un tipo específico de prueba, no garantizan siempre que el producto supere todas las pruebas en situaciones reales. Esto se debe a que resulta prácticamente imposible replicar exactamente todas las condiciones reales a las que el producto estará expuesto a lo largo de su ciclo de vida.

En este sentido, resulta de suma importancia contar con un conocimiento profundo del material y sus propiedades. Esto permite anticipar todas las variables que podrían afectar sus cambios en la medida de lo posible. Un ejemplo de esto es considerar todos los demás materiales con los que el producto entrará en contacto, así como la frecuencia con la que ocurrirá esta interacción. De esta manera, al tener un entendimiento detallado de las características del material y al anticipar posibles influencias externas, se puede realizar una evaluación más precisa de su desempeño y comportamiento a lo largo del tiempo. Esto contribuye al desarrollo de productos de mayor calidad y durabilidad, adecuados a las condiciones reales a las que estarán expuestos.

En conclusión, de acuerdo con la presente revisión bibliográfica, existe una amplia expectativa en cuanto a las pruebas de envejecimiento acelerado y su utilidad en la industria automotriz. Sin embargo, varios factores, específicamente relacionados con la temperatura, influyen en la prueba de envejecimiento acelerado y deben ser considerados. En la siguiente sección se abordan los conceptos de transferencia de calor básicos con la finalidad de proporcionar un amplio panorama de los factores térmicos involucrados en esta prueba en particular.

2.2. Tópicos de transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno fundamental en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas. Comprender y controlar los procesos de transferencia de calor resulta crucial para mejorar la eficiencia energética, optimizar el diseño de sistemas térmicos y garantizar la seguridad en diversas industrias. En este sentido, es esencial para comprender los procesos que ocurren dentro de una cámara de envejecimiento acelerado por temperatura.

En relación a la transferencia de calor, esta se define como la energía en tránsito debido a diferencias de temperatura [19]. En otras palabras, es la ciencia que busca predecir cómo la energía se transfiere entre cuerpos materiales debido a diferencias de temperatura [20]. Al mismo tiempo, según la termodinámica, esta transferencia de energía se denomina "calor". Sin embargo, su objetivo no se limita únicamente a explicar la transferencia de energía calorífica, sino también a predecir la rapidez con la que ocurre este intercambio en condiciones específicas.

Es importante destacar que la transferencia de energía en forma de calor siempre ocurre desde el medio con una temperatura más elevada hacia el que tiene una temperatura más baja, y cesa cuando ambos medios alcanzan la misma temperatura [21].

Por tanto, el requisito fundamental para la transferencia de calor es la existencia de una diferencia de temperatura, ya que, si dos medios están a la misma temperatura, no hay transferencia neta de calor entre ellos. Para ilustrar mejor, la diferencia de temperatura es lo que impulsa la transferencia de calor, de manera similar a cómo la diferencia de tensión impulsa el flujo de corriente eléctrica y la diferencia de presión impulsa el flujo de fluidos. Además, la velocidad de la transferencia de calor en una dirección determinada depende del gradiente de temperatura, es decir, de la magnitud del cambio de temperatura por unidad de longitud o de la tasa de cambio de temperatura en esa dirección. En consecuencia,

cuanto mayor sea el gradiente de temperatura, mayor será la velocidad de transferencia de calor.

Ahora bien, en la práctica, es más relevante conocer la razón de transferencia de calor, es decir, la transferencia de calor por unidad de tiempo, que la cantidad total de calor transferido [21].

De ahí que, en la ingeniería, la transferencia de calor desempeña un papel fundamental en el diseño de equipos involucrados en las pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura; como intercambiadores de calor, calentadores, hornos y refrigeradores. También se utiliza para resolver problemas prácticos que se dividen en dos grupos: los problemas de capacidad nominal, que se refieren a la determinación de la tasa de transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia de temperatura específica; y, por otro lado, los problemas de dimensionamiento, que están relacionados con la determinación del tamaño de un sistema para lograr una tasa de transferencia de calor específica a una diferencia de temperatura determinada [21]

Por otra parte, es posible estudiar un aparato o proceso de dos formas: experimentalmente, mediante pruebas y mediciones; o analíticamente, a través de análisis y cálculos. El enfoque experimental tiene la ventaja de trabajar con el sistema físico real y obtener mediciones directas, pero puede resultar costoso, lento e impráctico en muchos casos. Además, a veces es necesario realizar el análisis antes de que el sistema exista, como en el caso de dimensionar sistemas completos de calefacción y enfriamiento para una cámara climática. Por otro lado, el enfoque analítico, que incluye métodos numéricos, es más rápido y económico, pero los resultados están sujetos a las suposiciones y aproximaciones realizadas en el análisis.

Al mismo tiempo, la transferencia de calor tiene diversas aplicaciones en la vida cotidiana y en ingeniería. Un ejemplo ilustrativo es el proceso de enfriamiento de una barra de acero caliente cuando se sumerge en agua [20]. La transferencia de

calor nos permite predecir las temperaturas tanto de la barra como del agua en función del tiempo.

Además, por ejemplo, para comprender mejor cuánto tiempo tomará enfriar una bebida caliente en una jarra, la transferencia de calor nos permite determinar las tasas de transferencia de calor hacia y desde el sistema, los tiempos de enfriamiento o calentamiento, así como las variaciones de temperatura, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.1 [21].

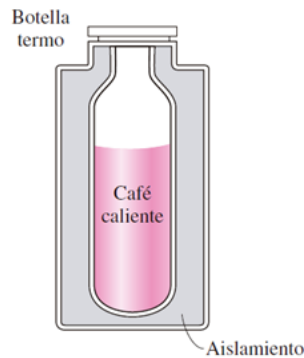


Figura 2.1 Ejemplo aplicación de transferencia de calor [21]

Sin embargo, es importante considerar que el estudio de la transferencia de calor implica tres modos distintos, como se ilustra en la figura 2.2 [19]: conducción, convección y radiación. Estos modos hacen referencia a los diversos mecanismos físicos a través de los cuales se produce la transferencia de calor.

Conducción a través de un sólido o fluido estacionario	Convección desde una superficie hacia un fluido en movimiento	Transferencia de calor neta por radiación entre dos superficies
a)	b)	c)

Figura 2.2 Modos de transferencia de calor [19]: a) Conducción, b) Convección y c) Radiación.

En las pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura, resulta fundamental comprender estos mecanismos físicos y emplear los modelos adecuados para determinar la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo en cada modo. En este sentido, a continuación, se examinará con mayor detalle cada uno de estos modos de transferencia de calor.

Conducción de calor

La conducción térmica es un fenómeno que ocurre cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, lo que da lugar a la transferencia de energía desde la región de alta temperatura hacia la región de baja temperatura [20]. Esta transferencia de energía se produce mediante la conducción, y la velocidad de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Para ilustrar este proceso de manera más clara, en la figura 2.3 [19], se puede observar cómo las moléculas atraviesan constantemente un plano hipotético en x_0 debido a su movimiento aleatorio. Sin embargo, las moléculas que provienen de la región superior tienen una temperatura más alta que las moléculas de la región inferior, lo que resulta en una transferencia neta de energía en la dirección positiva de x_0 . Esta transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio se conoce como difusión de energía.

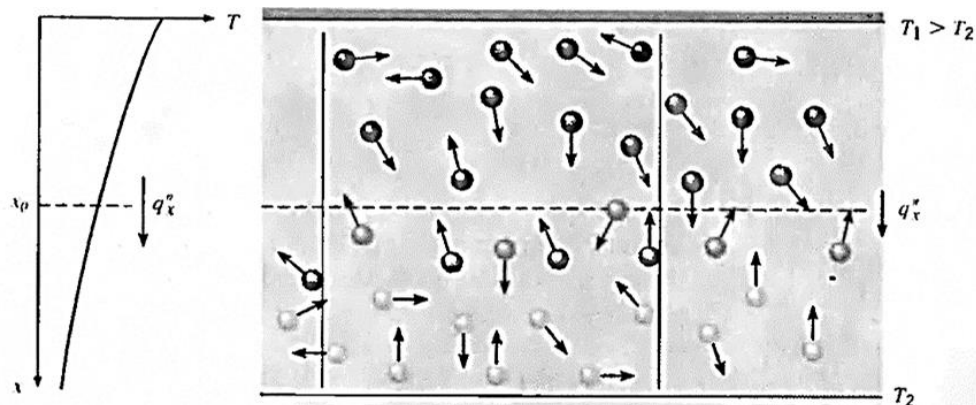


Figura 2.3 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular [19]

No obstante, es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados que sirven para calcular la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo. En particular, en el caso de la conducción de calor, se utiliza la ecuación o modelo conocido como la ley de Fourier.

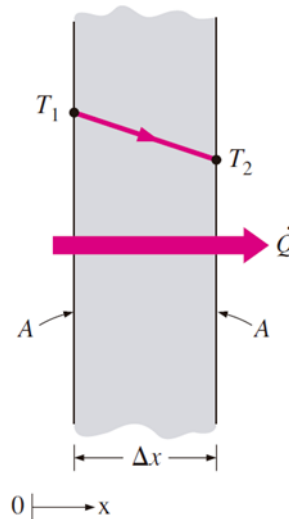


Figura 2.4 Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A [21].

De acuerdo con lo anterior, para la pared plana unidimensional representada en la figura 2.4 [21], que presenta una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad [\text{W}] \quad (2.2.1)$$

Esta expresión describe el flujo de calor por conducción en dicha pared.

Rapidez o razón de la conducción de calor

Al mismo tiempo, la rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de su configuración geométrica, espesor, material y de la diferencia de temperatura a través de él [21]. Se concluye que la razón de conducción de calor a través de una capa plana es directamente proporcional a la diferencia de temperatura a través de ella y al área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor de la capa [21]. En otras palabras,

$$\text{Razón de conducción del calor} = \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

o bien,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \right) = -kA \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad [\text{W}] \quad (2.2.2)$$

Donde la constante de proporcionalidad k es la **conductividad térmica** del material, que mide la capacidad de un material para conducir calor [21].

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación (2.2.2) mencionada se reduce a su forma diferencial:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad [\text{W}] \quad (2.2.3)$$

Aquí, dT/dx representa el gradiente de temperatura, que es la pendiente de la curva de temperatura en un gráfico T - x (es decir, la tasa de cambio de T con respecto a x) en la ubicación x . Además, la relación anterior indica que la tasa de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor se conduce en la dirección de la temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando la temperatura disminuye a medida que x aumenta [19]. Debido a esto, el signo negativo en la ecuación 2.2.3 asegura que la transferencia de calor en la dirección positiva de x sea una cantidad positiva.

Es importante señalar que la ecuación (2.2.3) es la igualdad que define la conductividad térmica, y en un sistema de unidades típico en el que el flujo de calor se expresa en watts, k tiene unidades de $\text{W/m}^\circ\text{C}$. Además, el área A de transferencia de calor siempre es perpendicular a la dirección de dicha transferencia.

Conductividad térmica

Por otra parte, la conductividad térmica (k) es una medida de la capacidad de un material para conducir calor [19]. Por ejemplo, el agua tiene una conductividad

térmica de $0.607 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, mientras que el hierro tiene una conductividad térmica de $80.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Esto indica que el hierro conduce el calor más de 100 veces más rápido que el agua. Debido a esto, aunque el agua es un buen almacenador de energía térmica, se considera un mal conductor del calor en comparación con el hierro.

En consecuencia, la conductividad térmica se define como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura [21]. Como resultado, un valor elevado de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor, mientras que un valor bajo indica que es un mal conductor o un aislante.

Las conductividades térmicas de los materiales varían sobre un amplio intervalo, tal como se muestra en la figura 2.5 [21]. En general, los metales como el cobre y la plata, que son buenos conductores eléctricos, también son buenos conductores del calor y tienen valores elevados de conductividad térmica. Por otro lado, materiales como el caucho, la madera y la espuma de estireno son malos conductores del calor y tienen valores bajos de conductividad térmica.

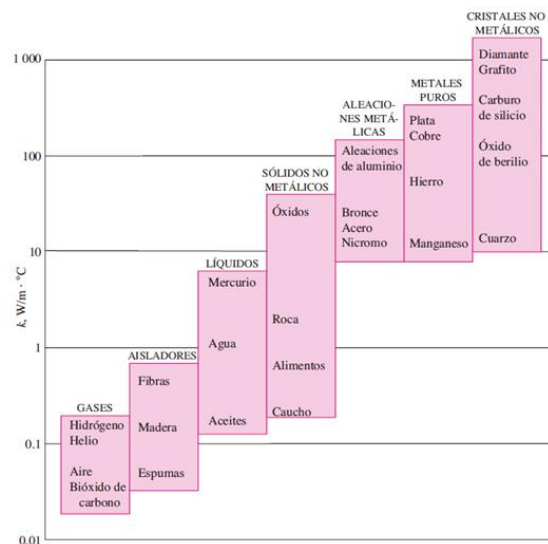


Figura 2.5 Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente [21]

Además, en la tabla 2.2 se presentan los valores de conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente [21]:

Tabla 2.2 Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente [21]

Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente	
Material	K, W/m°C
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Vidrio	0.78
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Es importante mencionar que la conductividad térmica de los materiales también puede variar con la temperatura, como se observa en la tabla 2.3 [21]. Por ejemplo, algunos sólidos muestran incrementos significativos en su conductividad térmica a bajas temperaturas, llegando a convertirse en superconductores.

Tabla 2.3 Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura [21]

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura		
	k, W/m°C	
T, K	Cobre	Aluminio
100	482	302
200	413	237
300	401	237
400	393	240
600	379	231
800	366	218

De este modo, es importante tener en cuenta que estas propiedades térmicas pueden variar según el material y las condiciones específicas aplicables.

Difusividad

Por otra parte, la difusividad térmica es una propiedad importante en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio. Esta propiedad representa cuán rápido se difunde el calor en un material y se define como [21]:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Donde k es la conductividad térmica del material y ρC_p es la capacidad calorífica. De modo que, cuanto mayor sea el valor de α , más rápida será la difusión de calor a través del material, lo que indica una elevada rapidez de transferencia de energía o un valor bajo de la capacidad calorífica ρC_p .

Además, la difusividad térmica se entiende como la relación entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen [20]. Un material con alta conductividad térmica o baja capacidad calorífica presenta una mayor difusividad térmica. Una difusividad térmica más elevada indica una propagación más rápida del calor en el medio, mientras que un valor bajo de difusividad térmica significa que el calor es absorbido en su mayor parte por el material y solo una pequeña cantidad se conduce a través de él.

Tanto el calor específico c_p como la capacidad calorífica ρc_p representan la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Sin embargo, c_p se expresa por unidad de masa, mientras que ρc_p se expresa por unidad de volumen, como se puede observar a partir de sus unidades $J/kg \cdot ^\circ C$ y $J/m^3 \cdot ^\circ C$, respectivamente [21].

La conductividad térmica k refleja la eficiencia con la que un material conduce el calor, mientras que la capacidad calorífica ρC_p indica cuánta energía puede almacenar un material por unidad de volumen.

En la Tabla 2.4 [21] se presentan las difusividades térmicas de algunos materiales comunes para 20 °C. Es interesante observar que la difusividad térmica varía ampliamente, desde $0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para el agua hasta $149 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para la plata, una diferencia de más de mil veces. Además, se destaca que la difusividad térmica del aluminio es de $97.5 \text{ m}^2/\text{s}$, tomando en cuenta que el cofre está compuesto por láminas de aluminio es importante conocer su difusividad térmica.

Tabla 2.4 Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente [21]

Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente	
Material	$\alpha, \text{m}^2/\text{s}$
Plata	149
Oro	127
Cobre	113
Aluminio	97.5
Hierro	22.8
Mercurio (l)	4.7
Mármol	1.2
Hielo	1.2
Concreto	0.75
Ladrillo	0.52
Suelo macizo (seco)	0.52
Vidrio	0.34
Lana de vidrio	0.23
Agua (l)	0.14
Carne de res	0.14
Madera	0.13

En conclusión, la relación entre este modo de transferencia de calor y la prueba de envejecimiento acelerado por temperatura radica en que, cuando un

material se expone a temperaturas elevadas durante un período prolongado, la transferencia de calor puede provocar cambios en su estructura. La conducción de calor puede acelerar este proceso al permitir que el calor se distribuya a través del material, causando cambios más rápidos de lo que ocurrirían a temperaturas normales.

En resumen, la conducción de calor es un proceso que se considera al diseñar pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura, ya que la forma en que el calor se propaga a través de los materiales, de acuerdo a las condiciones mencionadas, puede influir en cómo reaccionará y envejecerá cuando se exponga a condiciones elevadas de temperatura en pruebas de laboratorio.

Convección de calor

La convección es un modo de transferencia de calor que ocurre cuando hay movimiento de un líquido o gas sobre una superficie sólida [21]. Se compone de dos mecanismos: la difusión, que es la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio, y el movimiento global del fluido [19]. Este movimiento del fluido contribuye a la transferencia de calor. En consecuencia, cuando el fluido se mueve rápidamente, la transferencia de calor por convección es mayor [21].

Es importante señalar que la convección ocurre en una región conocida como la capa límite, donde la velocidad y la temperatura del fluido experimentan cambios desde la superficie hasta el flujo exterior [19].

Es fundamental destacar que, en ausencia de cualquier movimiento significativo del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente se debe exclusivamente a la conducción térmica. Simultáneamente, la presencia de un movimiento sustancial del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, aunque también complica la determinación de los factores que influyen en dicha transferencia [21]

Tipos de convección

La convección se puede clasificar en dos tipos principales, de acuerdo con la naturaleza del flujo, tal como se ilustra en la figura 2.6 [19]:

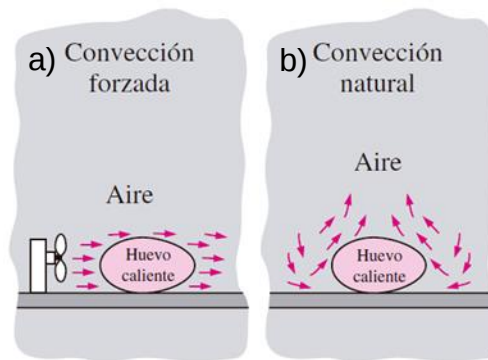


Figura 2.6 Tipos de convección de acuerdo a la naturaleza del flujo [19]: a) Forzada y b) Natural

En primer lugar, se presenta la convección forzada, la cual ocurre cuando el flujo es inducido por medios externos, como un ventilador, una bomba o el viento [21]. Una aplicación de este tipo de convección es el enfriamiento por aire mediante el uso de un ventilador para disipar el calor de componentes calientes durante una etapa de enfriamiento en una cámara climática de envejecimiento acelerado.

Por otro lado, se encuentra la convección libre, también conocida como convección natural, la cual se produce cuando el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido [19]. Un ejemplo de convección natural es la transferencia de calor que ocurre cuando componentes calientes disipan calor en un arreglo vertical de tarjetas de circuitos en aire inmóvil. El aire caliente asciende debido a su menor densidad, mientras que el aire más frío se desplaza hacia abajo para reemplazarlo.

Además, cabe mencionar la posibilidad de convección mezclada, en la cual se combinan características de la convección forzada y la convección natural [19]. Esto puede ocurrir cuando las velocidades del flujo son bajas y/o las fuerzas de empuje son significativas. Por ejemplo, en un arreglo de tarjetas de circuitos, si se utiliza un

ventilador para forzar el flujo de aire hacia arriba o hacia abajo, se puede generar un flujo secundario que interactúa con el flujo de empuje. Este tipo de convección combinada tiene un impacto significativo en la transferencia de calor desde los componentes. Por lo tanto, además de la convección forzada y la convección natural, existe la posibilidad de condiciones que resulten en convección mezclada.

Según la ley de enfriamiento de Newton, la transferencia de calor por convección se expresa mediante la ecuación [21]:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad [\text{W}] \quad (2.2.4)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$, A_s representa el área superficial a través de la cual ocurre la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido alejado de la superficie. Es importante notar que, en la superficie, la temperatura del fluido es igual a la del sólido. En la tabla 2.5 se proporcionan algunos valores típicos de h [21].

Tabla 2.5 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [21]

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección	
Tipo de convección	$h, \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$
Convección libre de gases	2 - 5
Convección libre de líquidos	10 – 1 000
Convección forzada de gases	25 - 250
Convección forzada de líquidos	50 – 20 000
Ebullición y condensación	2 500 - 100 000

Ahora bien, el coeficiente de transferencia de calor por convección, denotado como "h" y a veces referido como conductancia de película debido a su relación con el proceso de conducción en la delgada capa estacionaria de fluido sobre la superficie de la pared [19], no constituye una propiedad intrínseca del fluido. En cambio, es un parámetro que se determina experimentalmente, y su valor depende de todas las variables que influyen en el proceso de convección. Estas variables incluyen la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y su velocidad masiva [20].

En resumen, la convección de calor resulta desempeñar un papel importante en una prueba de envejecimiento acelerado por temperatura, ya que permite controlar y mantener la temperatura deseada de manera uniforme en toda la muestra. De esto modo ayuda a distribuir el calor de manera más eficiente dentro de la cámara de prueba, lo que permite que la temperatura se mantenga constante en toda la muestra, replicando condiciones realistas de envejecimiento.

Radiación de calor

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones debido a los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas [21]. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio material; puede ocurrir incluso en el vacío [19]. Además, se trata de la forma más rápida de transferencia de calor, ya que se propaga a la velocidad de la luz y no se atenúa en el vacío [21].

Es importante destacar que la radiación térmica es un tipo de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura y difiere de otras formas de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, las microondas y las ondas de radio y televisión. Esto se debe a que todos los cuerpos con una temperatura por encima del cero absoluto emiten radiación térmica [21].

La radiación emitida por una superficie se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por dicha superficie, y se puede medir mediante la potencia emisiva superficial E , como se muestra en la Figura 2.7a. Esta figura representa la velocidad a la que se libera energía por unidad de área [19], Según esta ley, la máxima cantidad de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s se describe de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{emitida,max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad [\text{W}] \quad (2.2.5)$$

Donde

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, que es la constante de Stefan-Boltzmann.

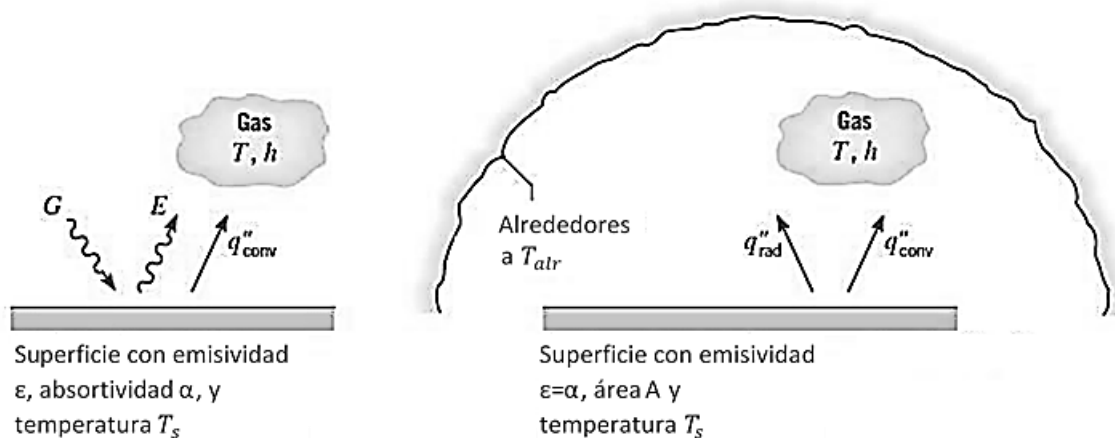


Figura 2.7 intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre una superficie y sus alrededores [19]

No obstante, las consideraciones termodinámicas indican que un radiador ideal, también conocido como cuerpo negro, emite energía a una velocidad proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, y el intercambio de calor neto entre dos cuerpos por radiación es proporcional a las diferencias en T^4 . Esta relación se aplica exclusivamente a los cuerpos negros [20]

Además, es importante destacar que esta ecuación se aplica únicamente a la radiación térmica y no a otros tipos de radiación electromagnética [20].

Es decir, la radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, y se expresa de la siguiente manera [21]:

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad [\text{W}] \quad (2.2.6)$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, con valores en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro [19]. Esto depende marcadamente del material de la superficie y del acabado. En la tabla 2.6 [21] se proporcionan algunos valores representativos, notando que el valor de la emisividad para una hoja de aluminio es de 0.07.

Tabla 2.6 Emisividades de algunos materiales a 300 K [21]

Emisividades de algunos materiales a 300 K	
Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96

En conclusión, la radiación de calor se puede utilizar como parte de un proceso de prueba de envejecimiento acelerado por temperatura para evaluar cómo un material o un producto reacciona y se degrada cuando se expone a temperaturas elevadas durante un período de tiempo relativamente corto. El calor radiante se utiliza para elevar la temperatura de manera controlada en la muestra bajo prueba. La temperatura elevada acelera los procesos de degradación, lo que permite observar los efectos a corto plazo que normalmente tomarían años en condiciones ambientales normales. Esto ayuda a identificar debilidades en el material o el producto, como deformación, fragilización, decoloración, pérdida de propiedades mecánicas y químicas, entre otros efectos adversos.

Ahora bien, el enfoque de este estudio se centra en un análisis térmico transitorio que busca observar la velocidad con la que se transfiere la energía en un componente automotriz. Por lo tanto, se presentarán las consideraciones adicionales pertinentes para este tipo de análisis.

2.3. Análisis térmico transitorio

Cuando un cuerpo sólido experimenta un cambio abrupto en su entorno, se requiere un tiempo determinado para que alcance una condición de equilibrio en cuanto a la temperatura [22]. Este estado de equilibrio se conoce como estado estacionario, y su distribución de temperatura y transferencia de calor se pueden calcular utilizando los métodos previamente descritos. Sin embargo, durante el proceso de calentamiento o enfriamiento transitorio que ocurre en el período intermedio antes de alcanzar el equilibrio, es necesario ajustar el análisis para considerar los cambios en la energía interna del cuerpo a lo largo del tiempo. Además, las condiciones de contorno deben ajustarse para reflejar la situación física presente en el problema de transferencia de calor en estado transitorio.

Debido a esto, el análisis de transferencia de calor en estado transitorio reviste una gran importancia práctica, dado que numerosos procesos de calentamiento y enfriamiento deben calcularse en la prueba de envejecimiento acelerado por

temperatura. Estos procesos implican cambios temporales en las temperaturas y, por ende, requieren un enfoque especial para el estudio de la distribución de calor y la transferencia de energía durante este período de transición. Considerar el estado transitorio es crucial para comprender y predecir el comportamiento térmico de los cuerpos sólidos en situaciones prácticas y para tomar decisiones adecuadas en el diseño y la operación de las cámaras térmicas para envejecimiento acelerado.

De este modo, para analizar un problema de transferencia de calor transitoria, se procede a resolver la ecuación general de conducción de calor mediante el método de separación de variables. Considérese la placa infinita de espesor $2L$, como se muestra en la figura 2.8. Inicialmente, la placa se encuentra a una temperatura uniforme T_i , y en el momento $T = 0$, las superficies experimentan una brusca reducción a $T = T_1$.

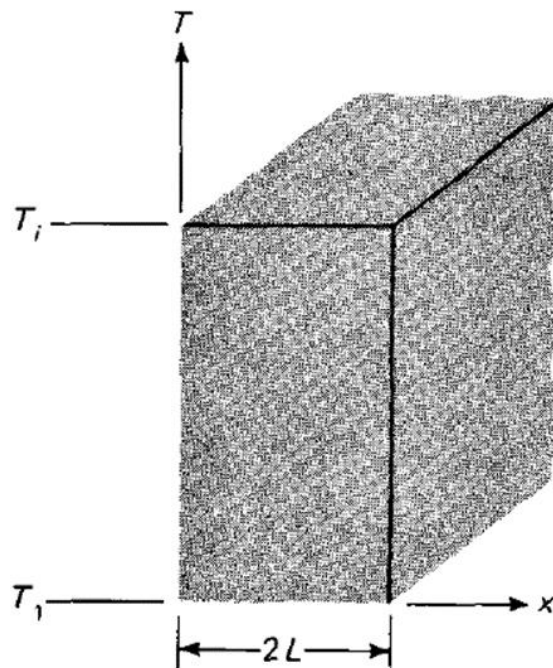


Figura 2.8 Placa infinita sujeta a enfriamiento brusco de superficies [22]

Por lo tanto, la ecuación diferencial se expresa como sigue [22]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.3.1)$$

Para una mayor conveniencia, se introduce la variable $\theta = T - T_1$, lo que lleva a la siguiente formulación:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2.33.2)$$

Estas ecuaciones van acompañadas de condiciones iniciales y de frontera definidas de la siguiente manera:

$$\theta = \theta_i = T_i - T_1 \quad \text{En } \tau = 0, 0 \leq x \leq 2L \quad (a)$$

$$\theta = 0 \quad \text{En } x = 0, \tau > 0 \quad (b)$$

$$\theta = 0 \quad \text{En } x = 2L, \tau > 0 \quad (c)$$

Suponiendo una solución de producto $\theta(x, \tau) = X(x) \aleph(\tau)$ se obtienen las dos ecuaciones diferenciales ordinarias [22]:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \lambda^2 X = 0$$

$$\frac{d\aleph}{d\tau} + \alpha \lambda^2 \aleph = 0$$

Donde λ^2 es la constante de separación. Para satisfacer las condiciones de frontera, es necesario que λ^2 sea mayor que cero, lo que lleva a la siguiente forma de la solución:

$$\theta = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sen \lambda x) e^{-(\lambda^2 \alpha \tau)}$$

Debido a la condición de frontera (b), se deduce que C_1 debe ser igual a cero para $\tau > 0$. Dado que C_2 o puede ser cero, la condición de frontera (c) lleva a la conclusión de que $\sen(2L\lambda) = 0$, lo que se expresa como:

$$\lambda = \frac{n\pi}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Por tanto, la forma de la serie final de la solución es:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\left(\left[\frac{n\pi}{2L}\right]^2 \alpha \tau\right)} \sen\left(\frac{n\pi x}{2L}\right)$$

Esta ecuación puede reconocerse como una expansión sinusoidal de Fourier, con las constantes C_n determinadas a partir de la condición inicial (a) y la siguiente ecuación [22]:

$$C_n = \frac{1}{L} \theta_i \int_0^L \sin\left(\frac{n\pi x}{2L}\right) dx = \frac{4}{n\pi} \theta_i \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

La serie final de la solución es, por consiguiente: [22]

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_1}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\left[\frac{n\pi}{2L}\right]^2 \alpha \tau} \sin\left(\frac{n\pi x}{2L}\right) \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.3.3)$$

En este momento, el propósito es mostrar cómo se puede resolver la ecuación de conducción de calor en estado transitorio mediante el método de separación de variables, al menos para un caso específico.

Lamentablemente, muchas figuras geométricas de interés práctico quedan fuera de estas categorías. Además, en algunos problemas, las condiciones de frontera varían con el tiempo. Estas condiciones transitorias en las fronteras, así como la geometría del cuerpo en cuestión, pueden ser tales que resulte imposible encontrar una solución matemática al problema [23]. En tales situaciones, es más adecuado abordar los problemas mediante técnicas numéricas, ya sea utilizando calculadoras manuales o computadoras, dependiendo de la precisión requerida y de los recursos económicos disponibles.

El planteamiento del problema es el mismo, independientemente de si se calcula manualmente o se utiliza una computadora. Sin embargo, en esta investigación se adopta un enfoque numérico asistido por computadora.

2.4. Análisis termo-mecánico

El análisis termo-mecánico (TMA, por sus siglas en inglés, Termomechanical Analysis) proporciona mediciones de penetración, dilatación, contracción y alargamiento de los materiales en función de la temperatura [24].

Asimismo, las propiedades de resistencia, ductilidad o fragilidad se ven afectadas por la temperatura del entorno de operación [25]. Para ilustrar esto de manera más clara, se puede considerar el efecto de la temperatura sobre las propiedades estáticas de los aceros, como se muestra en la figura 2.9 [25]. En el gráfico se observa que la resistencia a la tensión apenas varía hasta que se alcanza una cierta temperatura, a partir de la cual disminuye rápidamente. Por otro lado, la resistencia a la fluencia disminuye de manera continua a medida que la temperatura ambiente aumenta. Además, la ductilidad experimenta un aumento significativo, como era de esperar, a temperaturas más elevadas.

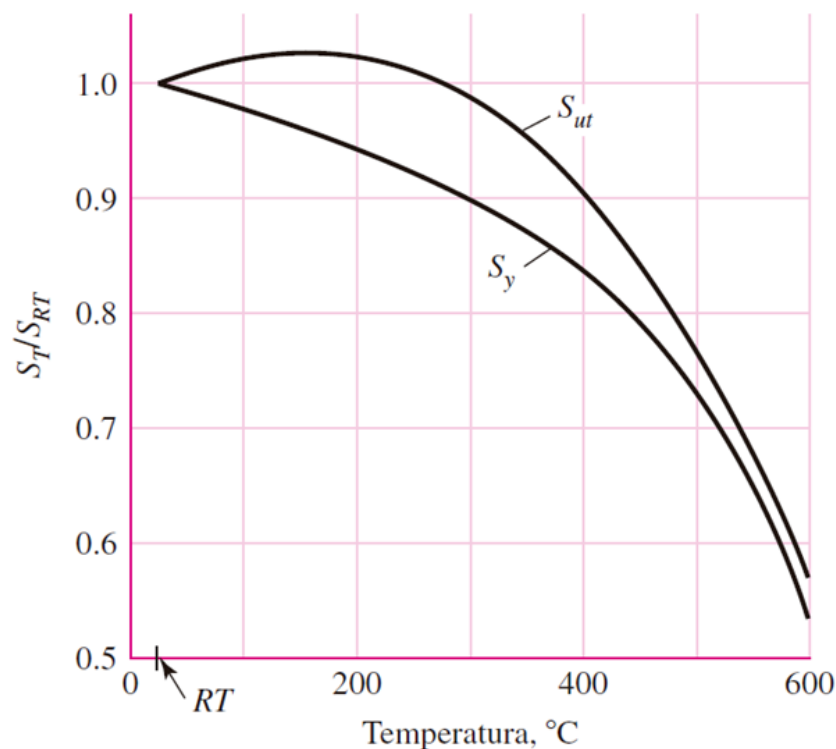


Figura 2.9 Gráfica de los resultados de 145 pruebas de 21 aceros al carbono y aleados que muestra el efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la fluencia S_y y la resistencia última S_{ut} . [25]

Por otro lado, se denomina "termofluencia" a la deformación bajo carga continua [25]. En la Figura 2.10 se presenta una curva típica que ilustra este tipo de pruebas, obtenida a una temperatura constante especificada [25]. Es importante señalar que, con frecuencia, se llevan a cabo varias pruebas de manera simultánea con diferentes niveles de esfuerzo. Como se puede observar en la imagen 2.10, la curva exhibe tres regiones distintas. En la primera etapa se engloban las deformaciones elásticas y plásticas, además de mostrar una disminución gradual en la velocidad de la termofluencia debido al endurecimiento por deformación. Posteriormente, en la segunda etapa, se experimenta una velocidad constante mínima de termofluencia provocada por el efecto de recocido. Por último, en la tercera etapa, el área de la pieza se reduce de manera significativa, el esfuerzo verdadero aumenta y, eventualmente, la termofluencia conduce a la fractura.

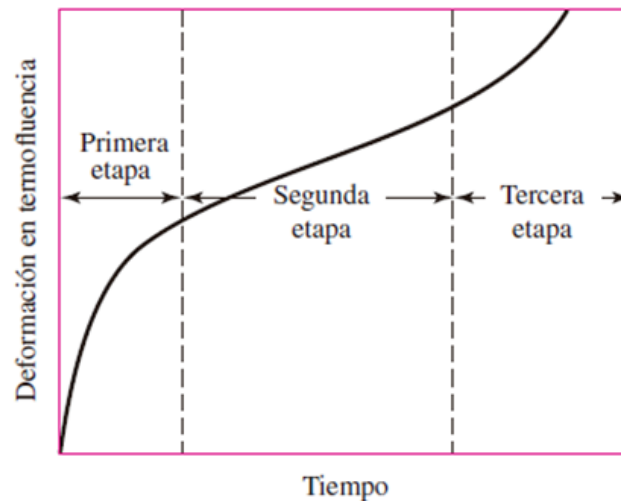


Figura 2.10 Curva termofluencia-tiempo [25]

En consecuencia, cuando la temperatura de un cuerpo sin restricciones aumenta de manera uniforme, este se dilata y su deformación unitaria normal es la siguiente [26]:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \alpha(\Delta T) \quad (2.4.1)$$

Donde α representa el coeficiente de dilatación térmica y ΔT es el cambio de temperatura en grados. En este caso, el cuerpo experimenta un simple aumento en el volumen y las componentes de la deformación por cortante son nulas.

Por otro lado, si una barra recta se encuentra restringida en sus extremos para evitar la dilatación longitudinal y se le somete a un incremento uniforme de temperatura, se desarrolla un esfuerzo de compresión debido a la restricción axial [26]. El esfuerzo se define como:

$$\sigma = -\epsilon E = -\alpha(\Delta T)E \quad (2.4.2)$$

De manera similar, si los bordes de una placa plana uniforme se restringen, y su temperatura también experimenta un incremento uniforme, el esfuerzo de compresión desarrollado se rige por la siguiente ecuación:

$$\sigma = -\frac{\alpha(\Delta T)E}{1-\nu} \quad (2.4.3)$$

Los esfuerzos expresados mediante las ecuaciones (2.4.2) y (2.4.3) se denominan esfuerzos térmicos y tienen su origen en un cambio de temperatura en un elemento que está sujeto o restringido [26]. Estos esfuerzos se producen, por ejemplo, durante el proceso de soldadura, ya que las piezas que se van a unir deben estar sujetas previamente. En la tabla 2.7 se presentan algunos valores aproximados de los coeficientes de dilatación térmica.

Tabla 2.7 Coeficientes de dilatación térmica (Coeficientes medios lineales para el intervalo de temperatura de 0 a 100°C) [26]

Material	Escala Celsius [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	Escala Fahrenheit [$^{\circ}\text{F}^{-1}$]
Acero al carbono	$10.8(10)^{-6}$	$6.0(10)^{-6}$
Acero al níquel	$13.1(10)^{-6}$	$7.3(10)^{-6}$
Acero inoxidable	$17.3(10)^{-6}$	$9.6(10)^{-6}$
Aluminio	$23.9(10)^{-6}$	$13.3(10)^{-6}$
Hierro fundido	$10.6(10)^{-6}$	$5.9(10)^{-6}$
Latón, fundición	$18.7(10)^{-6}$	$10.4(10)^{-6}$
Magnesio	$25.2(10)^{-6}$	$14.0(10)^{-6}$
Tungsteno	$4.3(10)^{-6}$	$2.4(10)^{-6}$

Por otra parte, considerando la varilla homogénea AB con sección transversal uniforme, que descansa libremente en una superficie horizontal lisa, como se muestra en la figura 2.11a. Si la temperatura de la varilla se eleva en ΔT , se observa que la varilla se alarga por una cantidad δT . Esta elongación es proporcional tanto al cambio de temperatura ΔT como a la longitud L de la varilla, como se ilustra en la figura 2.11b [27]. Por lo tanto, podemos expresar esta relación de la siguiente manera:

$$\delta T = \alpha(\Delta T)L \quad (2.3.4)$$

Donde α es una constante característica del material, denominada coeficiente de expansión térmica. Dado que ΔT y L se expresan en unidades de longitud, α se representa como una cantidad por grado Celsius o por grado Fahrenheit, dependiendo si el cambio de temperatura se expresa en grados Celsius o Fahrenheit.

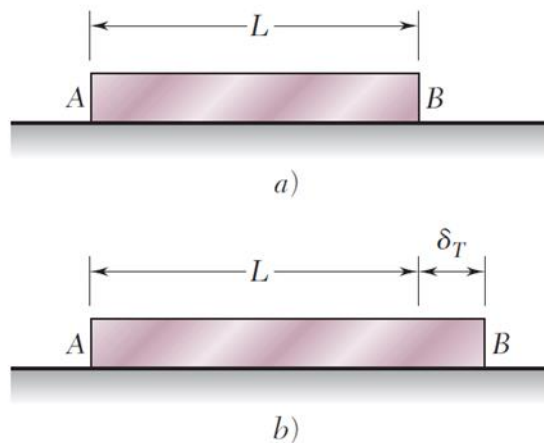


Figura 2.11 Elongación de una varilla debido al incremento de temperatura [27]

De acuerdo con la revisión bibliográfica en este capítulo, se cuenta con un amplio conocimiento para abordar el tema de investigación sobre pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura en la industria automotriz. Además, se posee un sólido entendimiento de los conceptos y teorías involucrados en dicho tema. En el siguiente capítulo, se procederá con el análisis del artículo de investigación para validar los conceptos expuestos en este capítulo.

CAPÍTULO 3

3. VALIDACIÓN CON ELEMENTO FINITO DE METODOLOGÍAS Y RESULTADOS UTILIZADOS COMO REFERENCIA

Con la información obtenida en el capítulo anterior, relativa a la revisión bibliográfica, se han seleccionado el artículo de investigación titulado "Análisis térmico transitorio de difusión de calor en un objeto en forma circular con propiedades constantes" [8] y dos artículos de investigación relacionados con "Análisis termo-mecánico aplicado en la estructura de un micro-voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos" [9, 10]. Estos han sido elegidos con el propósito de llevar a cabo la validación de resultados y comprender el comportamiento mecánico de un cuerpo cuando se le somete a un calentamiento de manera transitoria.

3.1. Metodología de análisis térmico transitorio de difusión de calor

El análisis numérico de un objeto con forma circular y propiedades constantes se está llevando a cabo en estado transitorio con el apoyo del software ANSYS Student 2022 R2. Asimismo, se ha realizado el diseño virtual del mismo, el cual se obtuvo de acuerdo con el diagrama de la figura 3.1 proporcionado en el artículo de investigación [8]. En la figura 3.2, se presenta el modelo virtual del objeto circular que se utilizará para un análisis en 2D.

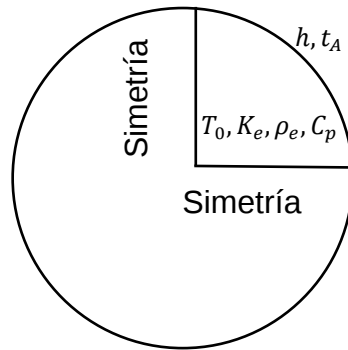


Figura 3.1 Diagrama de objeto circular con propiedades constantes [8]

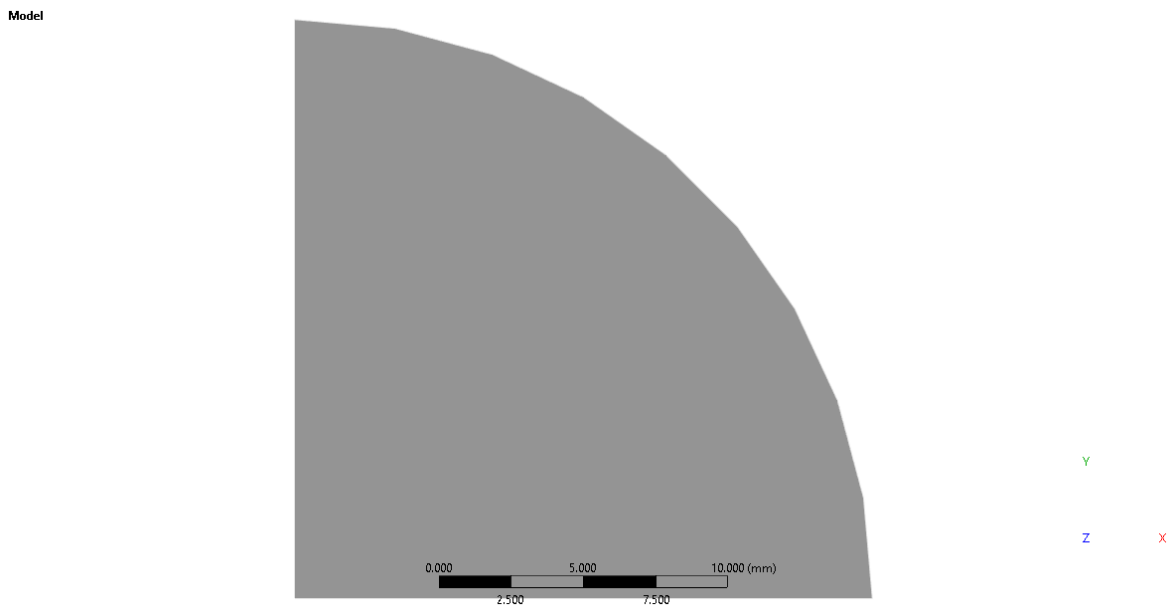


Figura 3.2 Modelo virtual de objeto circular con propiedades constantes.

En cuanto a las propiedades térmicas utilizadas en el análisis térmico en régimen transitorio, estas se presentan en la figura 3.3, basadas en el material propuesto en el artículo de investigación [8].

Properties of Outline Row 3: Propuesta				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2195.3	kg m ⁻³	
4	Isotropic Thermal Conductivity	4.87	W m ⁻¹ K ⁻¹	
5	Specific Heat Constant Pressure, C _p	12857	J kg ⁻¹ K ⁻¹	

Figura 3.3 Propiedades térmicas de objeto circular con propiedades constantes.

Al mismo tiempo, se aplica una temperatura de 333 K en la superficie exterior del objeto, tal como se muestra en la figura 3.4.

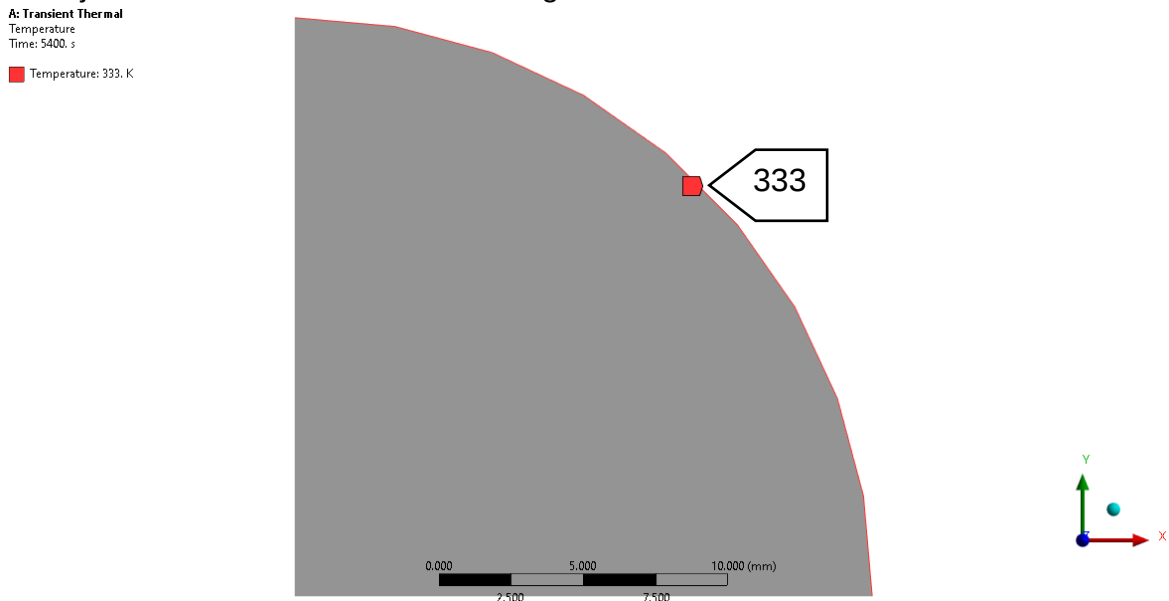


Figura 3.4 Condición térmica de frontera aplicada en objeto circular con propiedades constantes.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis térmico transitorio, el punto de interés se encuentra en el centro del objeto, identificado mediante el marcador azul utilizado en las figuras que se presentan a continuación. La temperatura en el segundo 6 es de 298 K, tal como se ilustra en la figura 3.5.

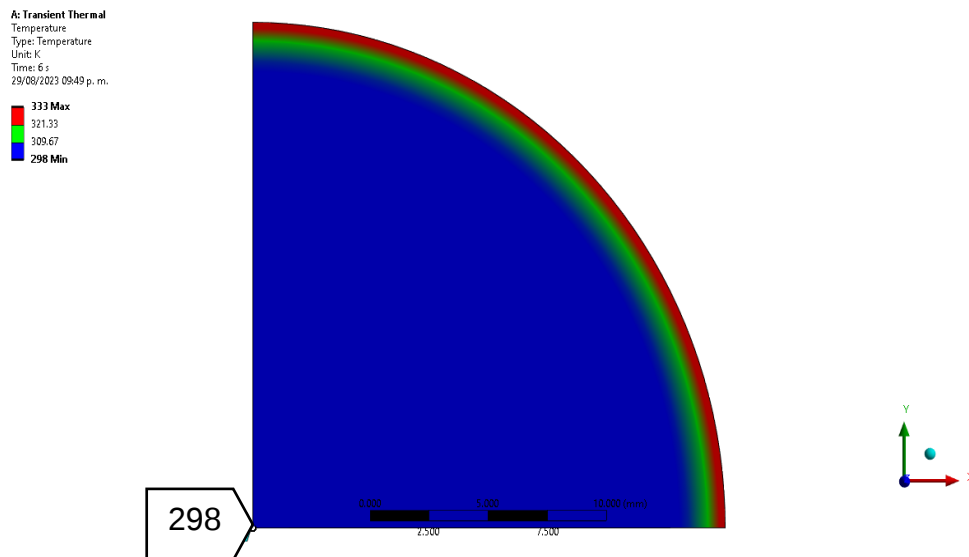


Figura 3.5 Distribución de temperatura en el segundo 6 en punto de interés, marcado en color azul.

Posteriormente, en el segundo 600, la temperatura en el punto de interés se incrementa a 319.33 K, tal como se muestra en la Figura 3.6.

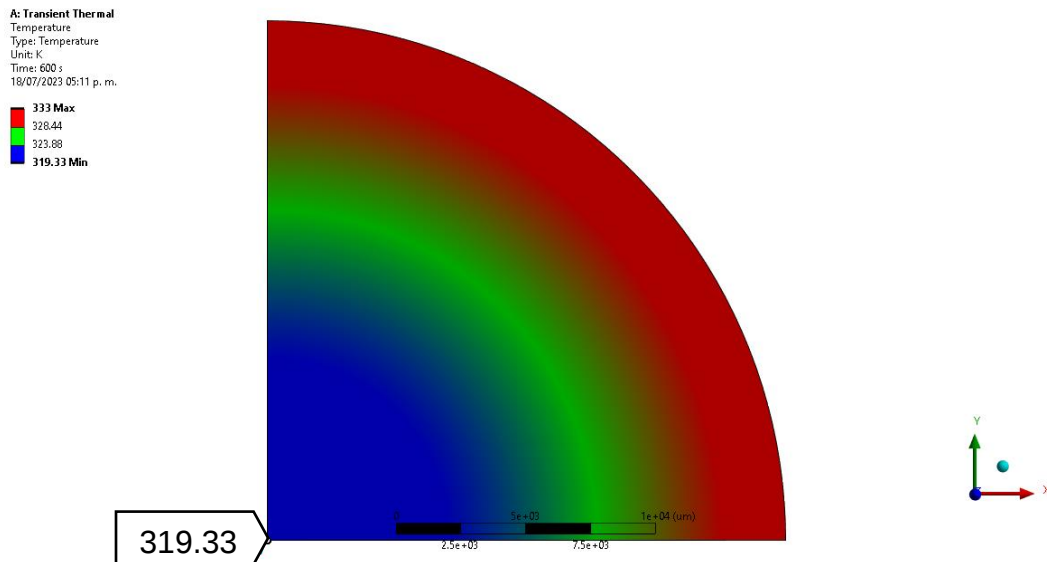


Figura 3.6 Distribución de temperatura en el segundo 600 en punto de interés, marcado en color azul.

A continuación, la temperatura en el segundo 1200 en el punto de interés se incrementa a 329.59 K, como se muestra en la figura 3.7.

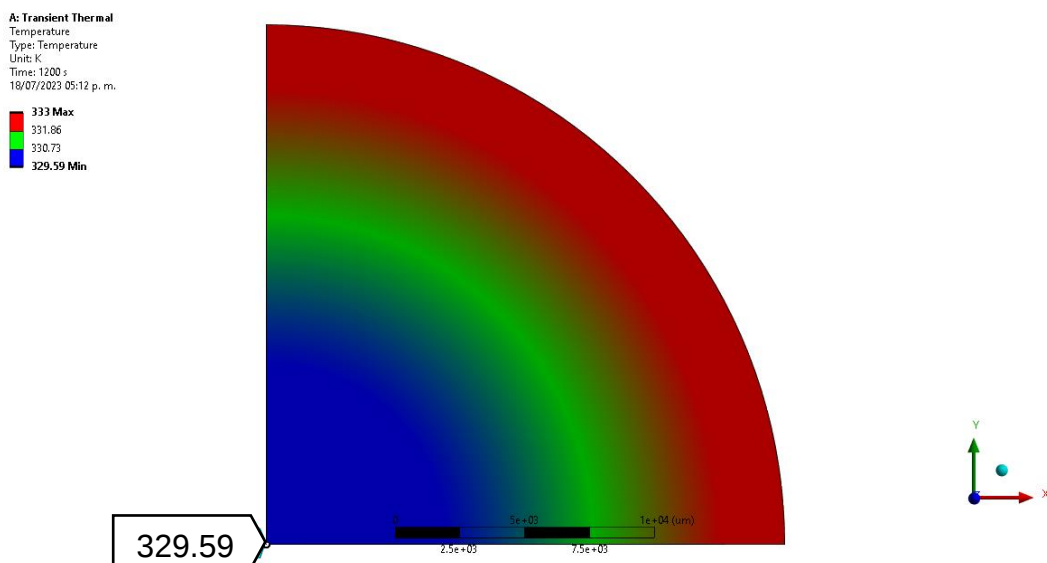


Figura 3.7 Distribución de temperatura en el segundo 1200 en punto de interés, marcado en color azul.

Después, la temperatura en el instante que transcurren 1800 segundos en el punto de interés aumenta a 332.15 K, como se ilustra en la figura 3.8.

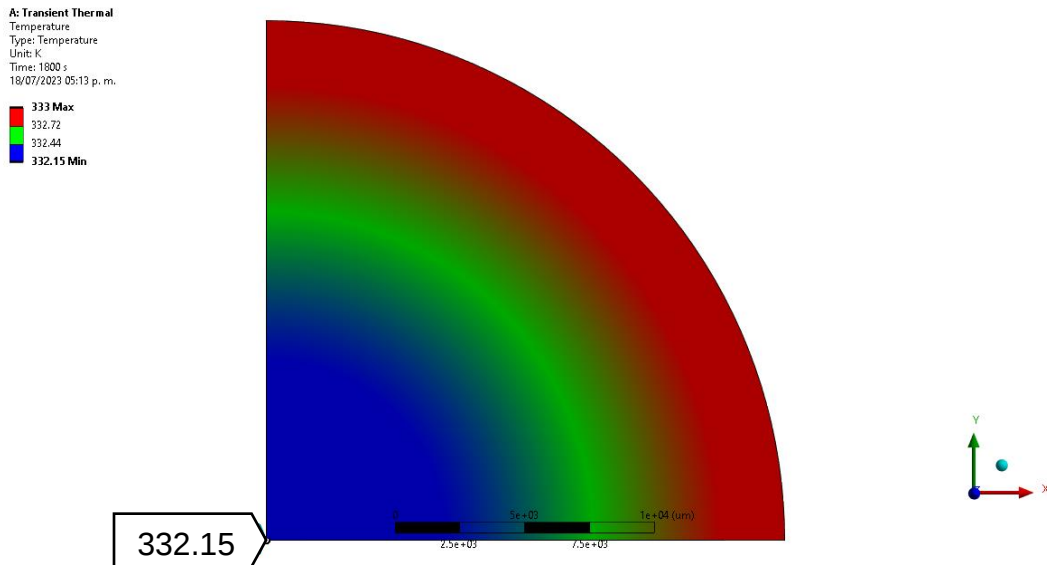


Figura 3.8 Distribución de temperatura en el segundo 1800 en punto de interés, marcado en color azul.

Después, la temperatura en el segundo 2400, en el punto de interés aumenta a 332.79 K, como se muestra en la figura 3.9.

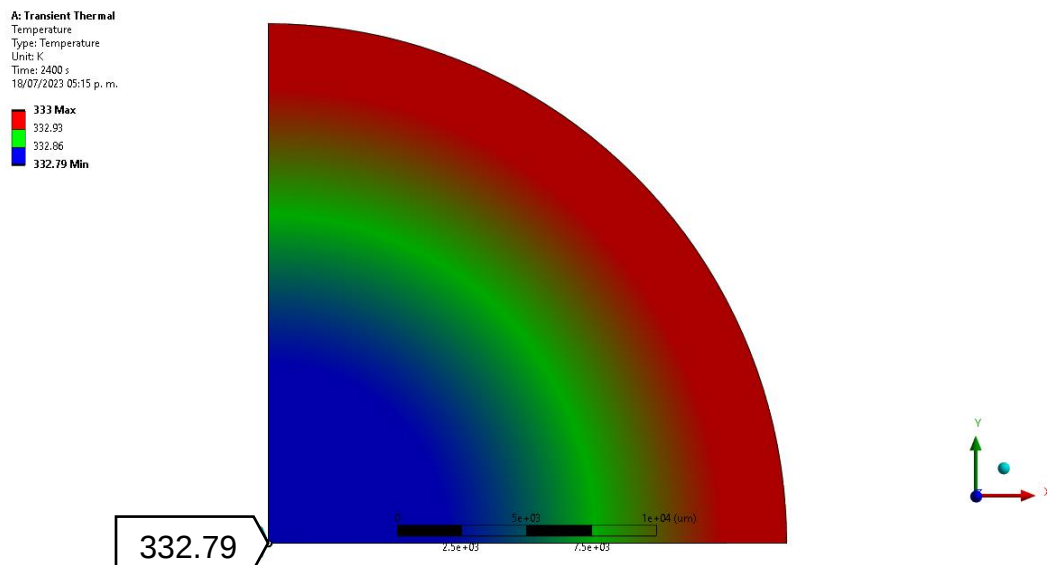


Figura 3.9 Distribución de temperatura en el segundo 2400 en punto de interés, marcado en color azul.

A continuación, la temperatura en el punto de interés aumenta a 332.95 después de transcurrir 3000 segundos, como se muestra en la figura 3.10.

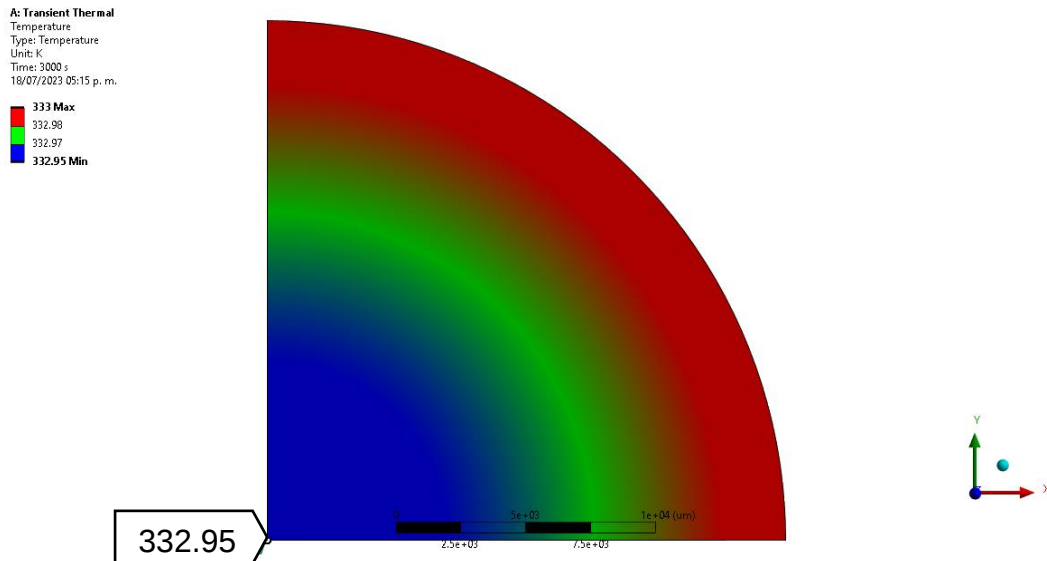


Figura 3.10 Distribución de temperatura en el segundo 3000 en punto de interés, marcado en color azul.

Después de 3600 segundos, la temperatura en el punto de interés aumenta a 332.99 K, como se muestra en la figura 3.11.

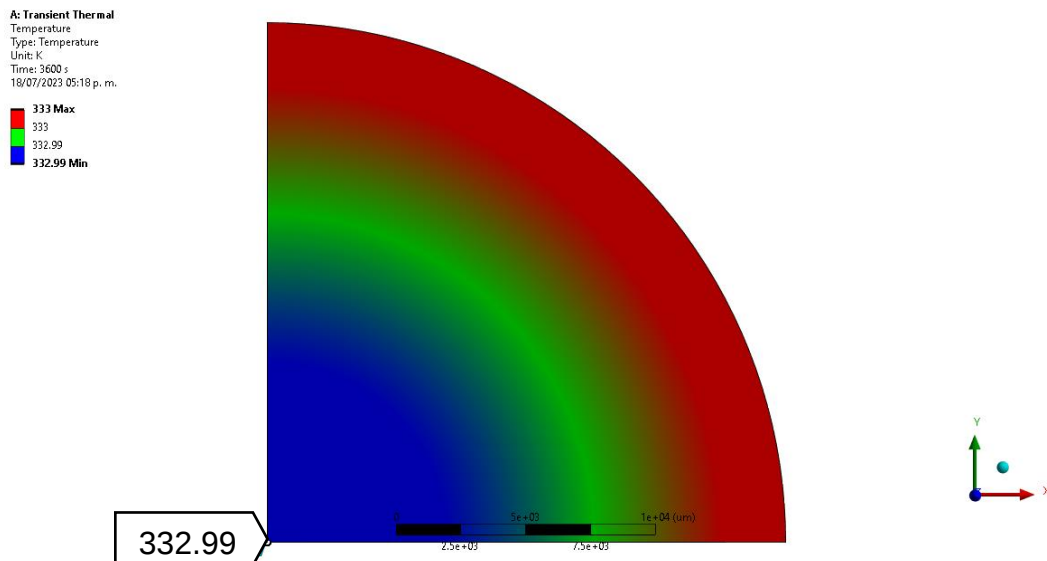


Figura 3.11 Distribución de temperatura en el segundo 3600 en punto de interés, marcado en color azul.

Después, la temperatura en el punto de interés se incrementa a 333 K transcurridos 4200 segundos, tal como se ilustra en la figura 3.12.

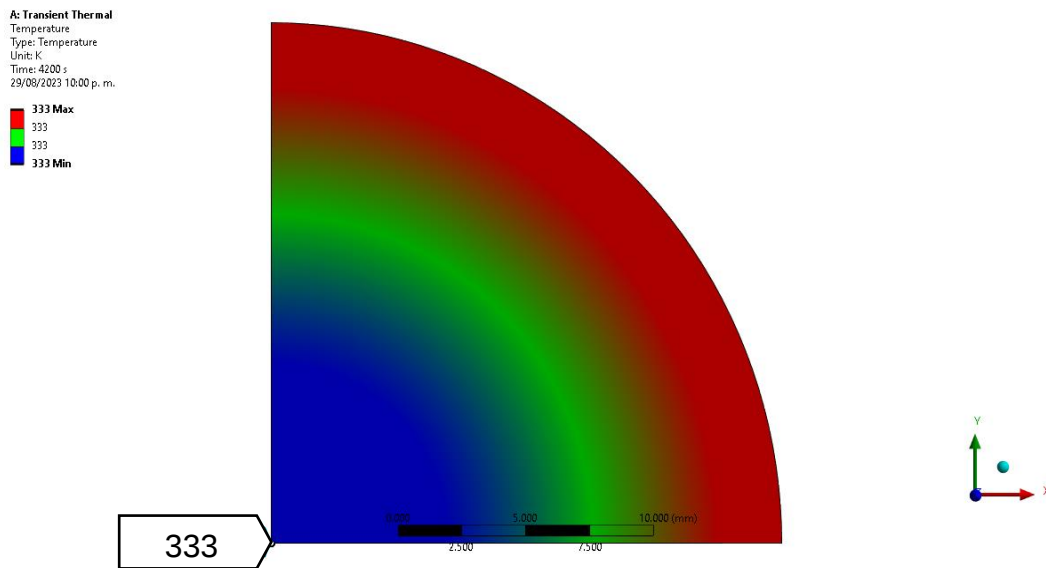


Figura 3.12 Distribución de temperatura en el segundo 4200 en punto de interés, marcado en color azul.

Para finalizar, a partir de los 4200 segundos, la temperatura alcanza el punto de equilibrio, como se muestra en las siguientes figuras 3.13 y 3.14:

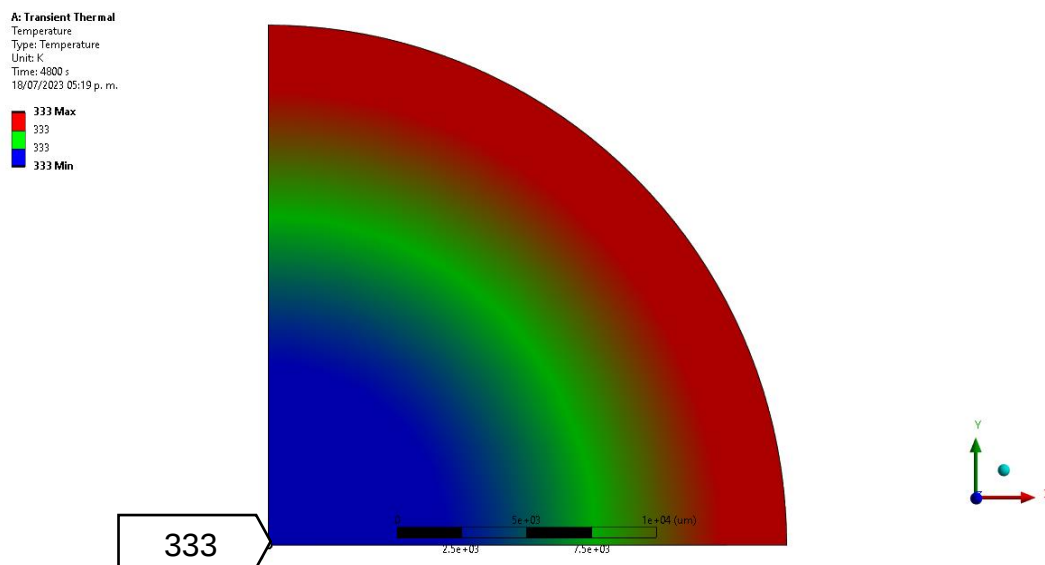


Figura 3.13 Distribución de temperatura en el segundo 4800 en punto de interés, marcado en color azul.

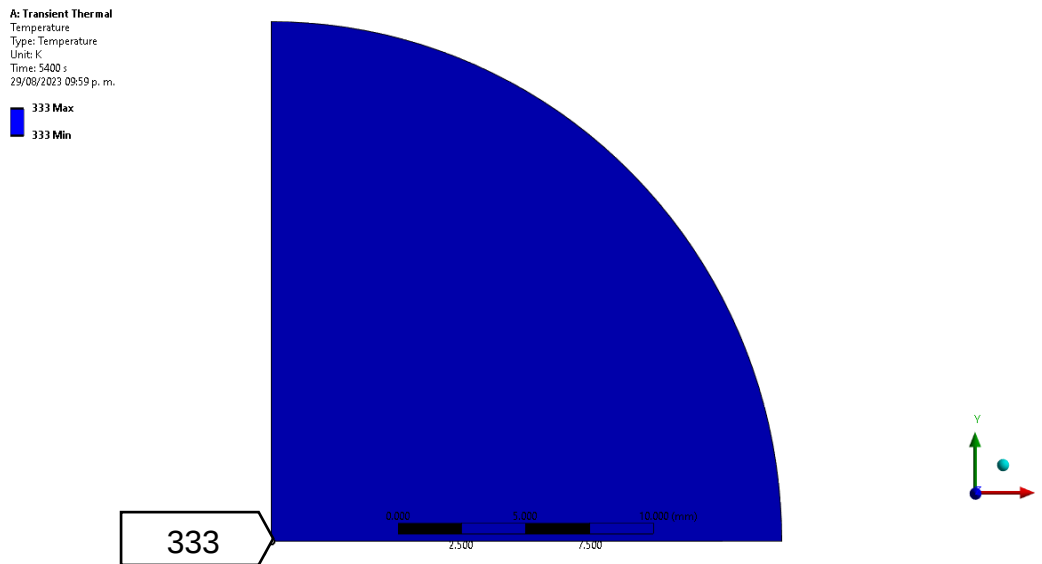


Figura 3.14 Distribución de temperatura en el segundo 5400 en punto de interés, marcado en color azul.

A partir de los resultados obtenidos, en la siguiente sección se procede a realizar una comparación con los datos obtenidos en el artículo de investigación, esto con el propósito de validar la metodología que se utiliza en la presente tesis.

3.1.1. Validación de resultados numéricos

De acuerdo con el análisis realizado, en la tabla 3.1 se recopilan los resultados numéricos para observar la variación del análisis numérico con base en los resultados expuestos en el artículo de investigación científica [8] y los resultados obtenidos mediante la metodología utilizada.

Tabla 3.1 Comparativo de resultados numéricos entre artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada.

Tiempo [s]	Temperatura [K]		
	Paúl Torres [8] (Volúmenes finitos)	ANSYS 16.0 [8]	ANSYS 2022
0	298	297.85	298
600	308.17	308.667	319.33
1200	320.25	321.656	329.59
1800	325.58	327.935	332.15
2400	327.87	330.676	332.79
3000	328.79	331.879	332.95
3600	329.03	332.416	332.99
4200	329.17	332.656	333
4800	329.26	332.763	333
5400	329.33	332.811	333

Posteriormente, en la tabla 3.2 se presenta el porcentaje de error entre los resultados numéricos obtenidos mediante la metodología utilizada y los resultados proporcionados en el artículo de investigación científica [8].

Tabla 3.2 Porcentaje de error relativo entre los resultados numéricos del artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada

% de error relativo ANSYS 2022 vs Referencia [8]	
Paúl Torres	ANSYS 16.0
0.00%	-0.05%
-3.62%	-3.45%
-2.92%	-2.47%
-2.02%	-1.29%
-1.50%	-0.64%
-1.27%	-0.32%
-1.20%	-0.17%
-1.16%	-0.10%
-1.14%	-0.07%
-1.11%	-0.06%

Con base en la tabla 3.2, se puede concluir que los resultados se encuentran dentro de un intervalo de error menor al 4%. Además, se observa un comportamiento similar en el análisis realizado en comparación con los resultados reportados en el artículo [8], tal como se aprecia en la figura 3.15.

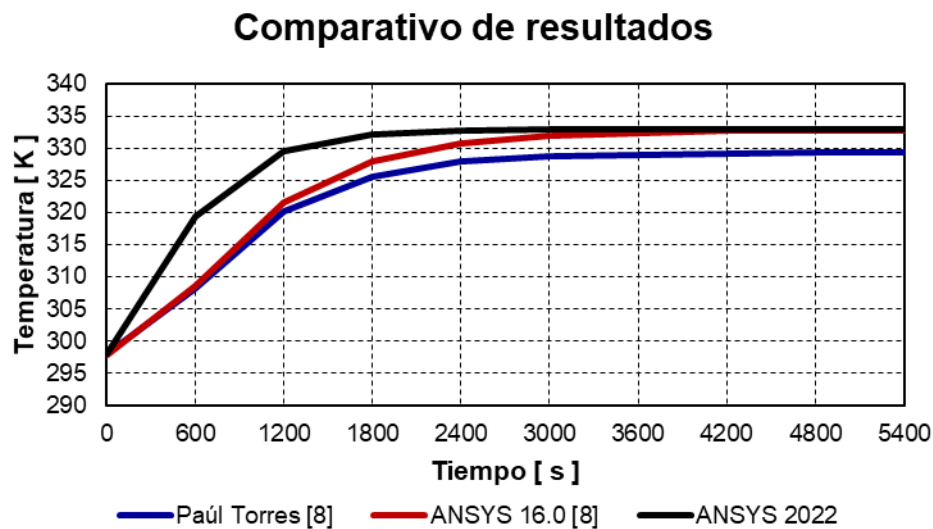


Figura 3.15 Comparativo de resultados entre artículo de investigación científica [8] y metodología utilizada

3.2. Metodología de análisis termo-mecánico aplicado en la estructura de un micro-voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos

Con el objetivo de obtener una mejor comprensión de cómo llevar a cabo un análisis termo mecánico, se ha seleccionado la metodología aplicada en la estructura de un micro voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos [10]. En el voladizo propuesto, se ha replicado de acuerdo con el diagrama mostrado en la figura 3.16 [10].

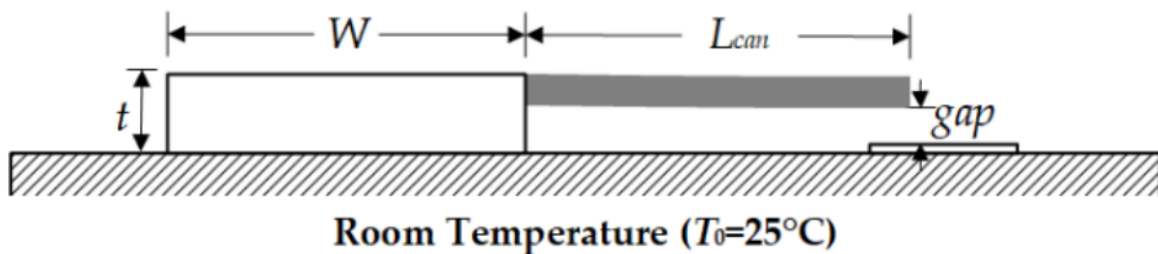


Figura 3.16 Diagrama de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos [10]

A continuación, en la tabla 3.3 se presentan los valores utilizados para cada uno de los parámetros mencionados en el diagrama de la figura 3.16. Estos parámetros

serán modelados a través del espacio de trabajo DesignModeler, que forma parte del entorno de herramientas de ANSYS Academic 2022 R2.

Tabla 3.3 Parámetros utilizados por el artículo de investigación científica [10]

Parámetro	Medida [μm]
W	75
L_{can}	140
t	2.5
Gap	1

Como resultado, el modelo 3D utilizado, respetando los parámetros mencionados anteriormente, se presenta en la figura 3.17.

Geometry
17/07/2023 06:32 p. m.

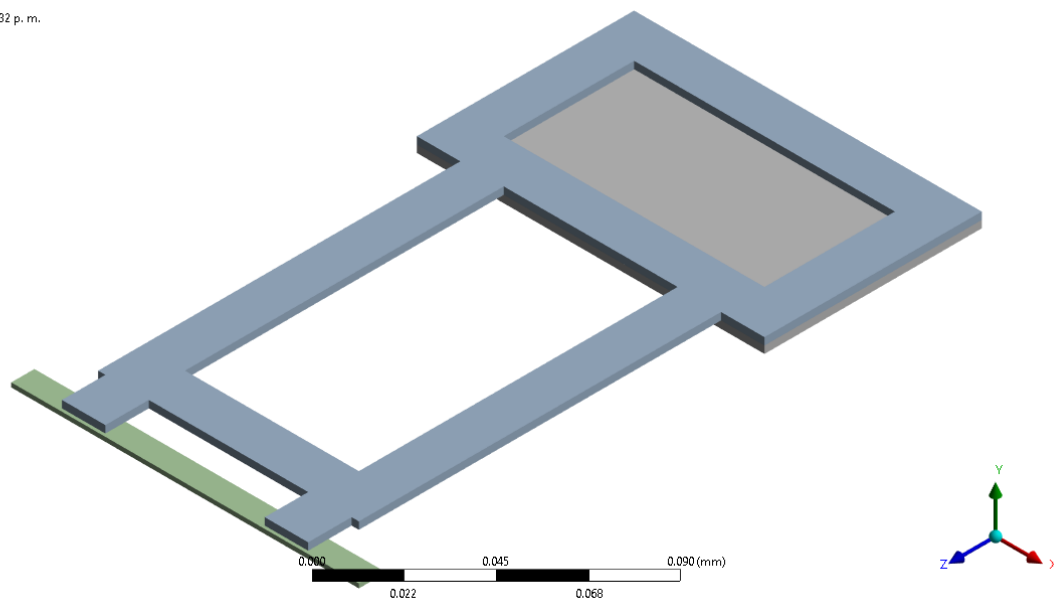


Figura 3.17 Modelo 3D de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos.

Al mismo tiempo, se lleva a cabo la selección de los materiales para el voladizo de acuerdo con el diagrama presentado en la figura 3.18 [9] Se observa que el voladizo se compone de una placa delgada de titanio, además de la placa de oro. Por lo tanto, se opta por mantener este conjunto de materiales en la elaboración y seguimiento de la metodología propuesta.

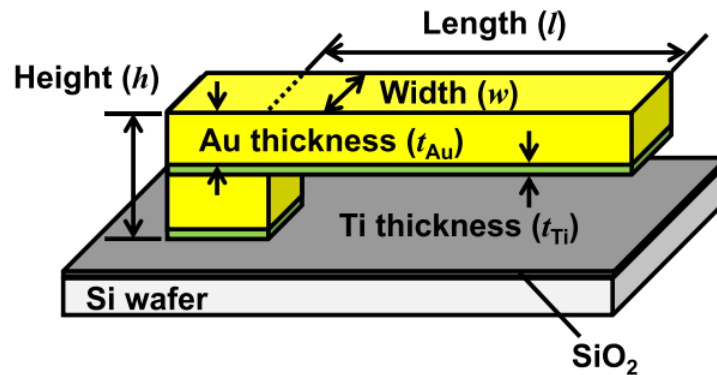


Figura 3.18 Diagrama de materiales de voladizo de oro en sistemas microelectromecánicos.

En consecuencia, en la figura 3.19 se presentan las propiedades mecánicas utilizadas para el oro, mientras que en la figura 3.20 se exponen las propiedades térmicas correspondientes al titanio. Para una mejor visualización, hemos delimitado en un rectángulo las propiedades de ambos materiales, utilizando el color azul para las propiedades mecánicas y el rojo para las propiedades térmicas. Estos datos se han establecido de acuerdo con la información proporcionada en el artículo de investigación correspondiente [9].

Properties of Outline Row 3: Gold			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	19300	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.42E-05	K ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	7E+10	Pa
9	Poisson's Ratio	0.44	
10	Bulk Modulus	1.9444E+11	Pa
11	Shear Modulus	2.4306E+10	Pa
12	Tensile Yield Strength	5.5E+07	Pa
13	Compressive Yield Strength	5.5E+07	Pa
14	Tensile Ultimate Strength	2E+08	Pa
15	Compressive Ultimate Strength	0	Pa
16	Isotropic Thermal Conductivity	315	W m ⁻¹ K ⁻¹
17	Specific Heat Constant Pressure, C _p	129	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Figura 3.19 Propiedades térmicas y propiedades mecánicas del Oro utilizado [9]

Properties of Outline Row 5: Titanium Alloy		
	A	B
1	Property	Value
2	Material Field Variables	Table
3	Density	4620
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	
5	Coefficient of Thermal Expansion	8.6E-06
6	Isotropic Elasticity	
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
8	Young's Modulus	1.157E+11
9	Poisson's Ratio	0.36
10	Bulk Modulus	1.3774E+11
11	Shear Modulus	4.2537E+10
12	Tensile Yield Strength	4.8E+08
13	Compressive Yield Strength	4.8E+08
14	Tensile Ultimate Strength	1.07E+09
15	Compressive Ultimate Strength	0
16	Isotropic Thermal Conductivity	21.9
17	Specific Heat Constant Pressure, C _p	522

Figura 3.20 Propiedades térmicas y propiedades mecánicas del Titanio utilizado [9]

A continuación, la metodología se divide en dos partes: una en la que se observa el comportamiento del voladizo a diferentes temperaturas en estado estable y la segunda en la que la temperatura varía con el tiempo, es decir, en estado transitorio. A continuación, se presenta el desarrollo y la validación de ambas partes.

3.2.1. Comportamiento del voladizo a diferentes temperaturas

En la primera parte del artículo, se observa el comportamiento del voladizo a diferentes temperaturas una vez que se ha alcanzado el estado estable. Para esto, se aplican las temperaturas en la parte inferior del soporte del voladizo, tal como se muestra en la figura 3.21. Además, las temperaturas se aplican de acuerdo con la gráfica mostrada en la figura 3.22, en la que cada paso representa la temperatura aplicada al alcanzar el estado estable.

B: Transient Thermal
Temperature
Time: 1. s
18/07/2023 05:34 p. m.
Temperature: 50. °C

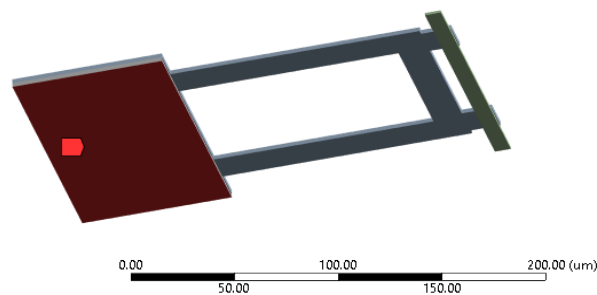


Figura 3.21 Condiciones térmicas aplicadas

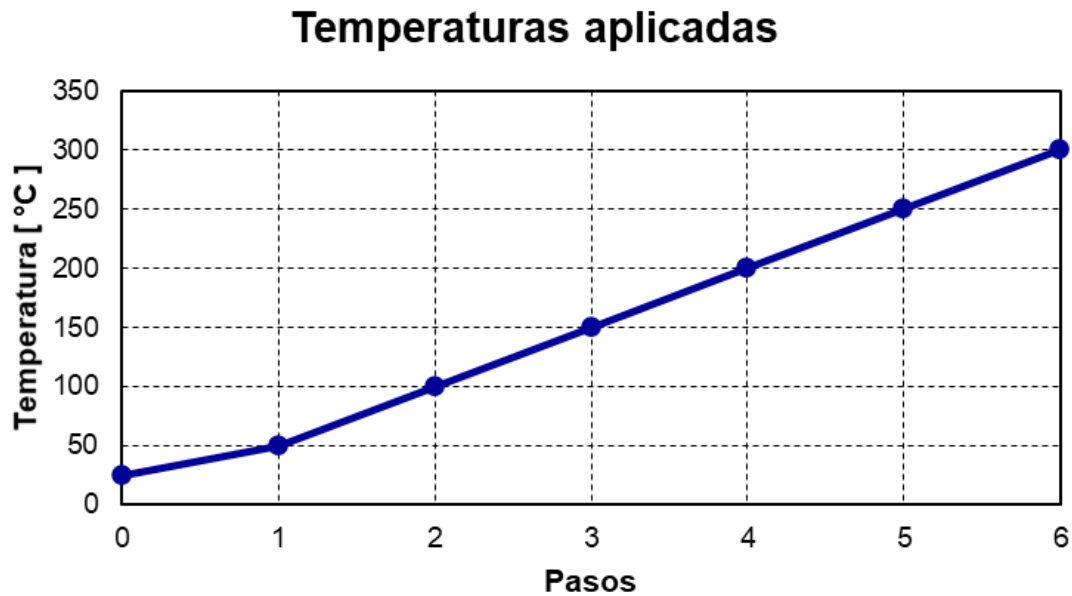


Figura 3.22 Perfil de temperatura aplicado de acuerdo a artículo de investigación científica [9]

Posteriormente, se aplican las condiciones de frontera para el análisis termo-mecánico, restringiendo todos los grados de libertad tanto del soporte del voladizo como del capacitor, como se observa en la figura 3.23.

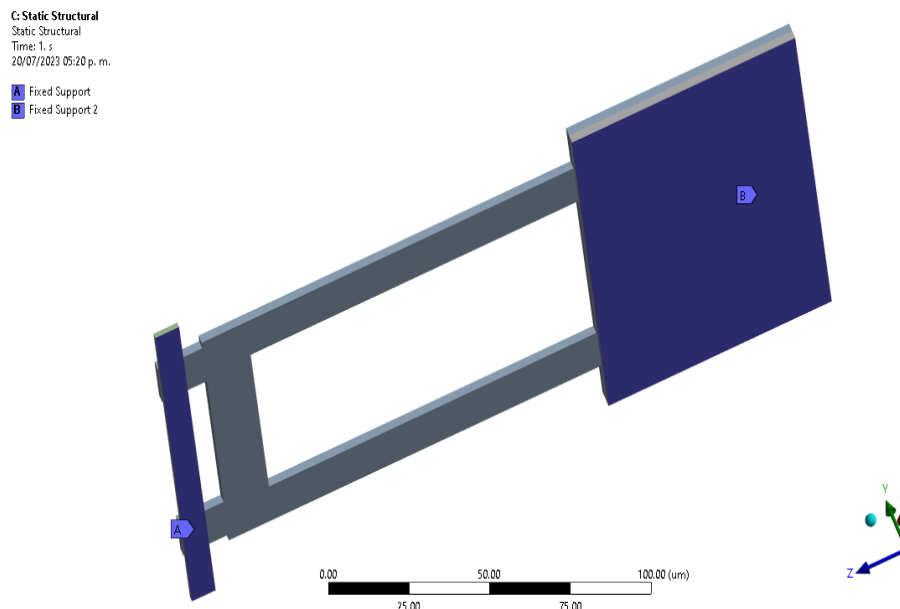


Figura 3.23 Condiciones de frontera aplicadas para el estudio termo mecánico

De este modo, una vez aplicadas las condiciones de frontera pertinentes, se lleva a cabo la simulación del análisis. Los resultados obtenidos son los siguientes para las diferentes temperaturas aplicadas

Para el caso de la temperatura a 50 °C (figura 3.24), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.92681 μm, es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu m - 0.92681 \mu m = -0.07319 \mu m$$

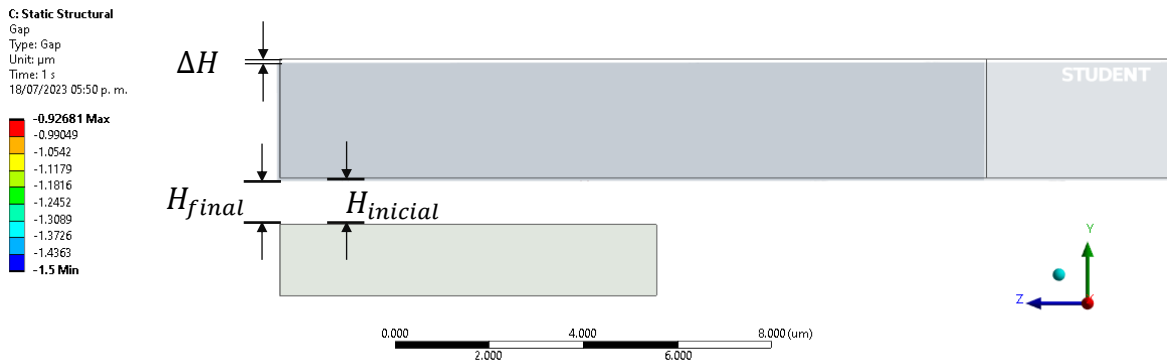


Figura 3.24 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 50 °C

Para el caso de la temperatura a 100 °C (figura 3.25), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.76634 μm, es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu m - 0.76634 \mu m = -0.23366 \mu m$$

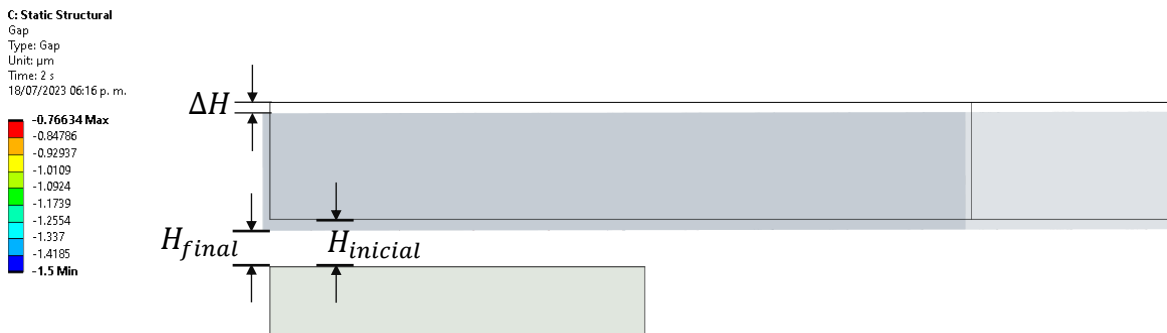


Figura 3.25 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 100 °C

Para el caso de la temperatura a 150°C (figura 3.26), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.60366 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.60366 \mu\text{m} = -0.39634 \mu\text{m}$$

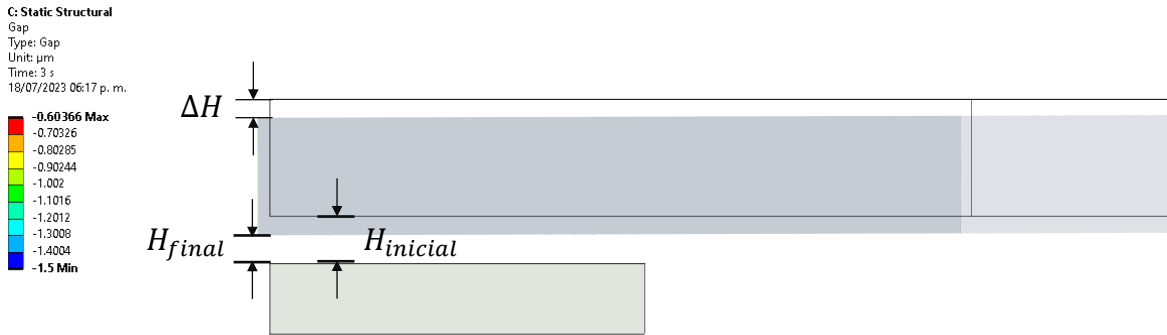


Figura 3.26 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 150 °C

Para el caso de la temperatura a 200°C (figura 3.27), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.43984 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.43984 \mu\text{m} = -0.56016 \mu\text{m}$$

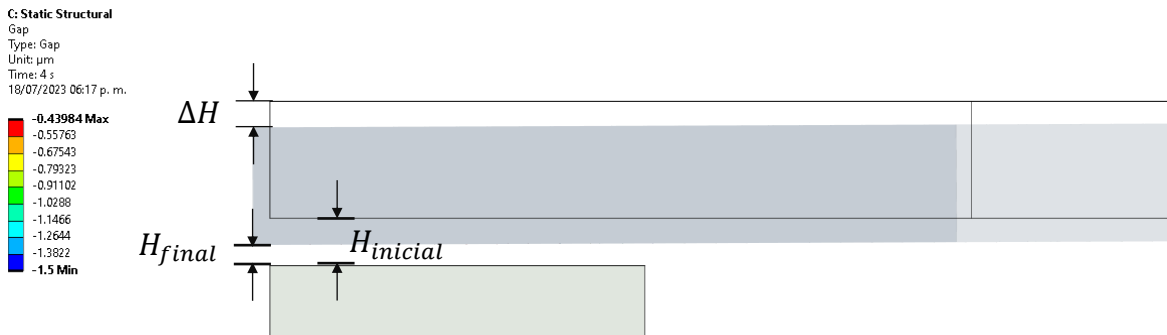


Figura 3.27 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 200 °C

Para el caso de la temperatura a 250°C (figura 3.28), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.27521 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.27521 \mu\text{m} = -0.72479 \mu\text{m}$$

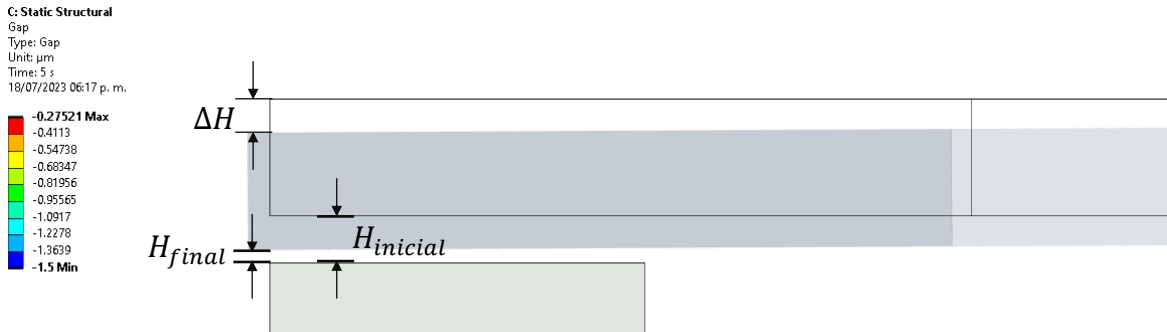


Figura 3.28 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 250 °C

Finalmente, para el caso de la temperatura a 300°C (figura 3.29), la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.11 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.11 \mu\text{m} = -0.89 \mu\text{m}$$

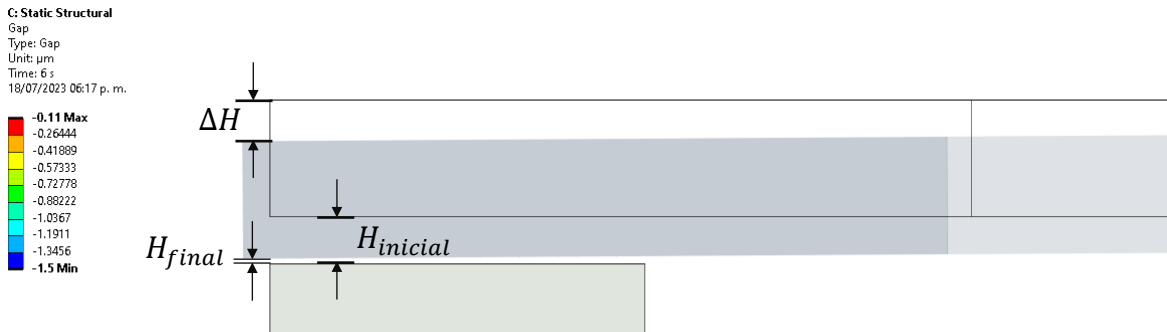


Figura 3.29 Desplazamiento del voladizo para una temperatura de 300 °C

3.2.1.1. Validación de resultados numéricos

Una vez se han obtenido los resultados, se comparan en la figura 3.30 con los datos experimentales del artículo. Se observa una tendencia similar en el desplazamiento del voladizo a distintas temperaturas, aunque se aprecia una leve discrepancia en los resultados al exponer el voladizo a 300 °C.

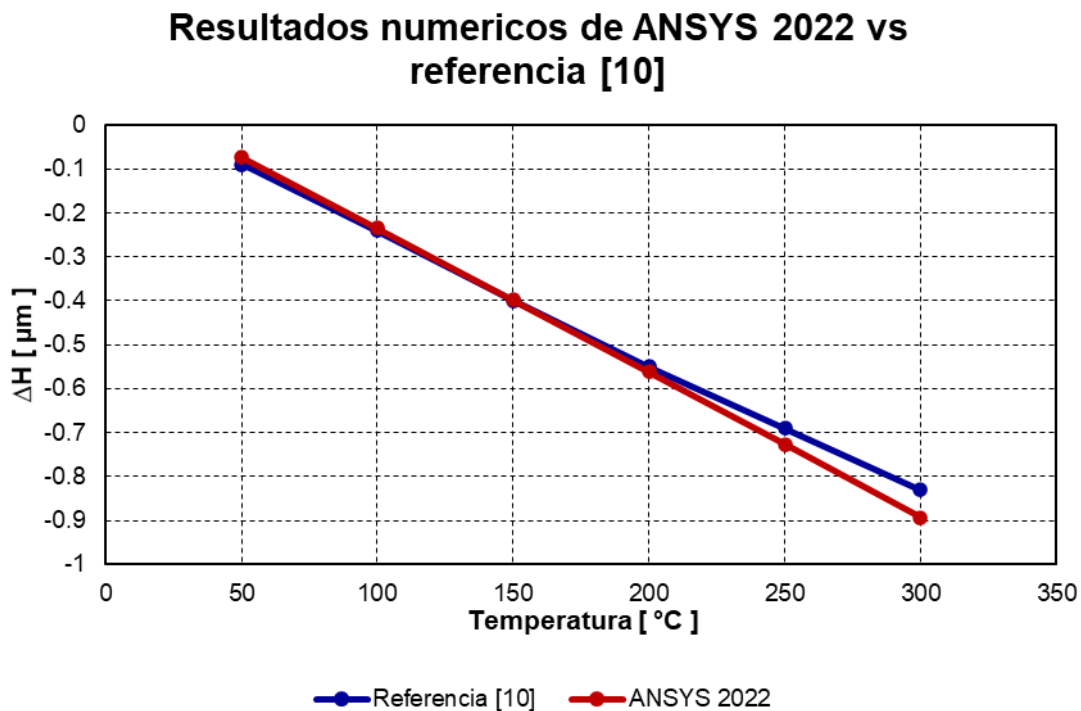


Figura 3.30 Comparativo de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, se calcula el porcentaje de error relativo entre el artículo de investigación científica y los resultados obtenidos mediante la metodología seguida utilizando ANSYS 2022 R2. Estos porcentajes se presentan en la tabla 3.4. Como se observa en la figura 3.30, el error máximo se produce a 300 °C. Sin embargo, dado que el porcentaje de error promedio es menor al 10%, se considera un valor aceptable que valida la metodología para estudios termomecánicos con temperaturas constantes en el tiempo.

Tabla 3.4 Porcentaje de error relativo entre resultados a diferentes temperaturas

% de error relativo ANSYS 2022 vs Referencia			
Temperatura	Referencia [10]	ANSYS 2022	Error
50	-0.09	-0.07319	19%
100	-0.24	-0.23366	3%
150	-0.4	-0.39634	1%
200	-0.55	-0.56016	-2%
250	-0.69	-0.72479	-5%
300	-0.83	-0.89	-7%

3.2.2. Con variación de temperatura dependiente del tiempo

Sin embargo, el propósito principal de este trabajo de investigación es observar el comportamiento del cofre de un vehículo sometido a diferentes temperaturas que varían con el tiempo. Para este fin, la segunda parte de la metodología proporciona un enfoque más orientado a comprender los pasos necesarios y las variables requeridas.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, en este caso, la temperatura varía con el tiempo, como se muestra en la figura 3.31. El tiempo total transcurrido en la prueba es de 41,160 segundos, dividido en tres etapas. La primera etapa tiene una duración de 2,160 segundos, que corresponde al tiempo que tarda el voladizo en alcanzar una temperatura de 120 °C. Posteriormente, la segunda etapa dura 36,170 segundos, que se refiere al tiempo de operación del sistema microelectromecánico; es decir, durante este período, la temperatura se mantiene en 120 °C. Finalmente, la tercera etapa tiene una duración de 2,830 segundos, la cual consiste en el enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente una vez que ha concluido el funcionamiento del sistema.

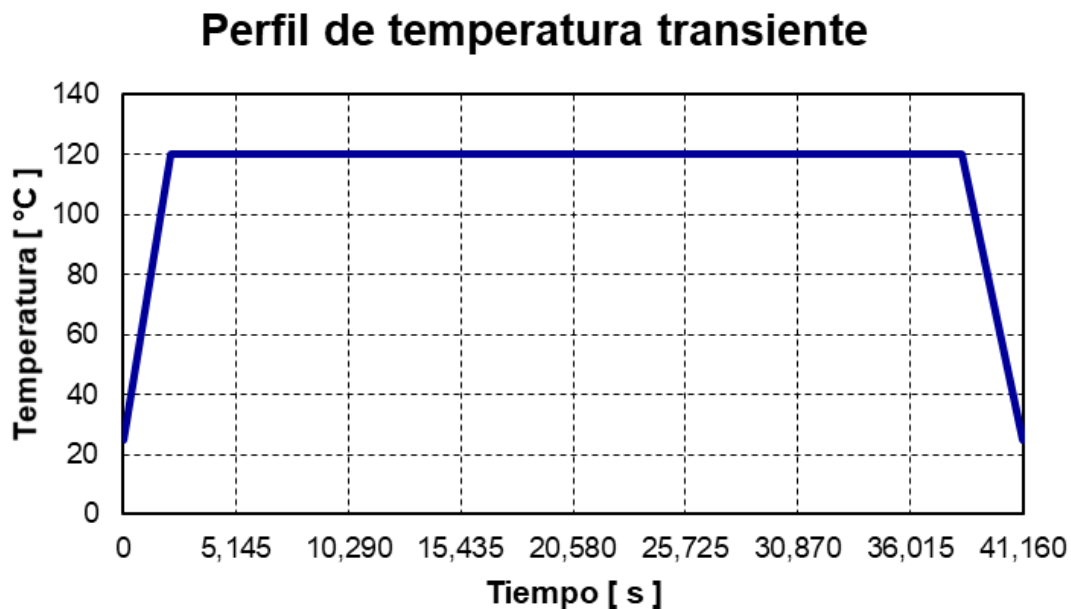


Figura 3.31 Perfil De temperatura aplicado de acuerdo a artículo de investigación científica [10]

A continuación, considerando el perfil de temperatura, se procede a simular el calor aplicado en la parte inferior del soporte del voladizo, tal como se ilustra en la figura 3.32 a continuación.

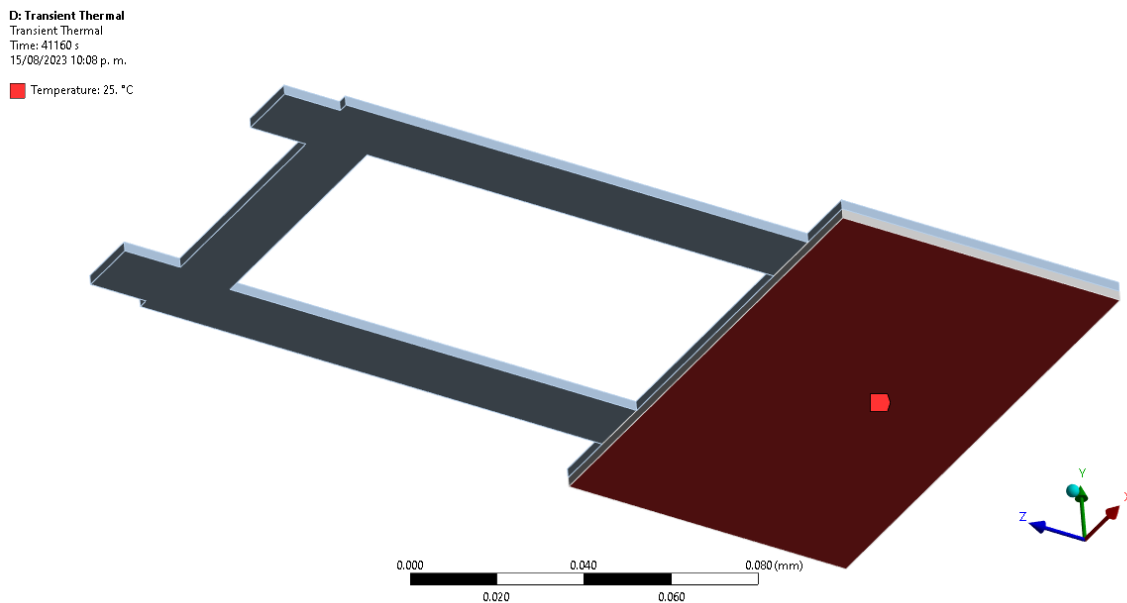


Figura 3.32 Condiciones de frontera de temperatura aplicadas

Posteriormente, una vez realizado el análisis térmico, se procede al análisis termo-mecánico en el cual se restringen todos los grados de libertad, tanto del soporte del voladizo como del capacitor, como se muestra en la figura 3.33.

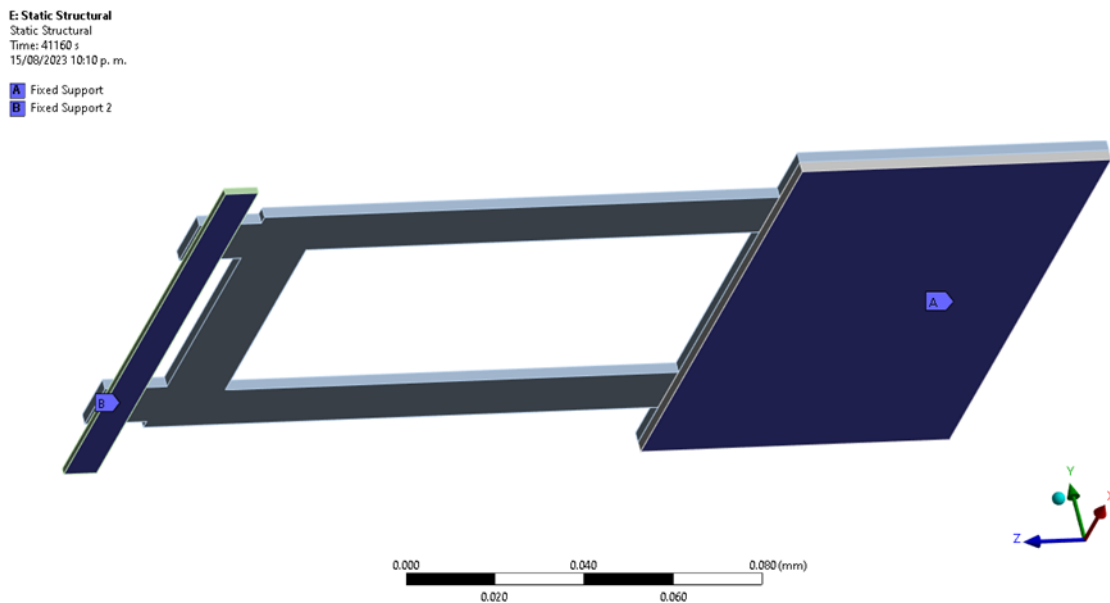


Figura 3.33 Condiciones de frontera aplicadas

Finalmente, se simula el funcionamiento del sistema siguiendo las consideraciones previamente mencionadas. En este caso, se presentan los resultados en función del tiempo, seleccionando tiempos clave de acuerdo con la distribución de temperatura mostrada en la figura 3.31. Los tiempos seleccionados son los siguientes: 1 segundo, 2,160 segundos, 20,000 segundos, 38,330 segundos y 41,160 segundos.

Con respecto al caso inicial, en el que ha transcurrido 1 segundo desde que comenzó la simulación (véase la figura 3.34), se observa la holgura entre el voladizo y el capacitor apenas se reduce a $0.99739 \mu m$, es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) fue de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu m - 0.99739 \mu m = -0.0026111 \mu m$$

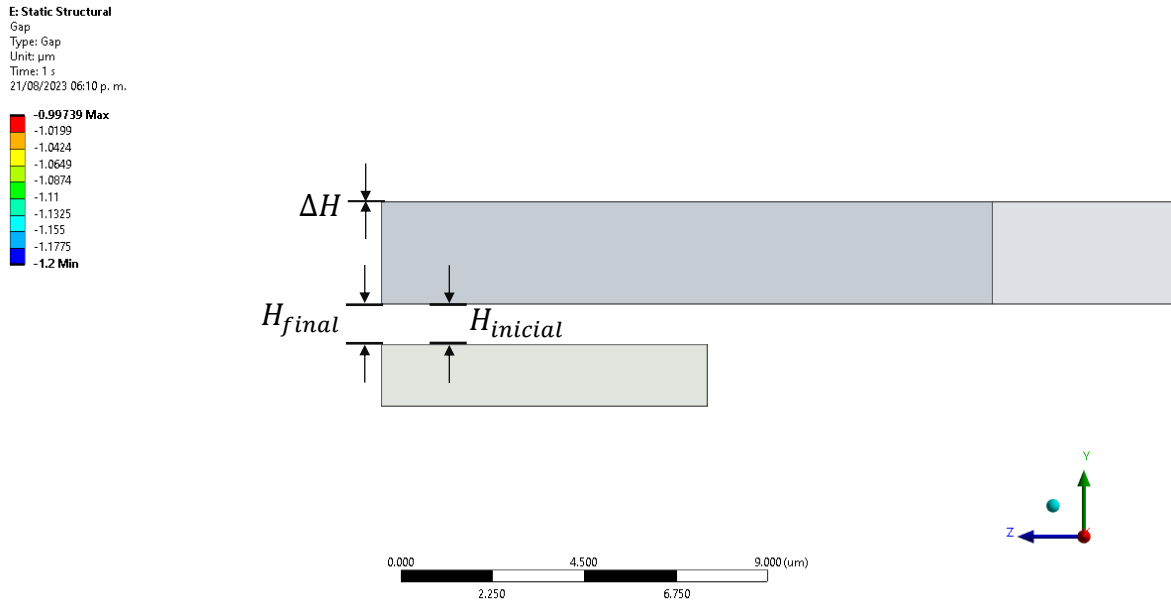


Figura 3.34 Desplazamiento del voladizo transcurridos 1 segundo

Sin embargo, en el caso en el que han transcurrido 2160 segundos de la simulación (figura 3.35), la holgura entre el voladizo y el capacitor se hace ligeramente más notable, reduciéndose a $0.79182 \mu\text{m}$, es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) es de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.79182 \mu\text{m} = -0.20818 \mu\text{m}$$

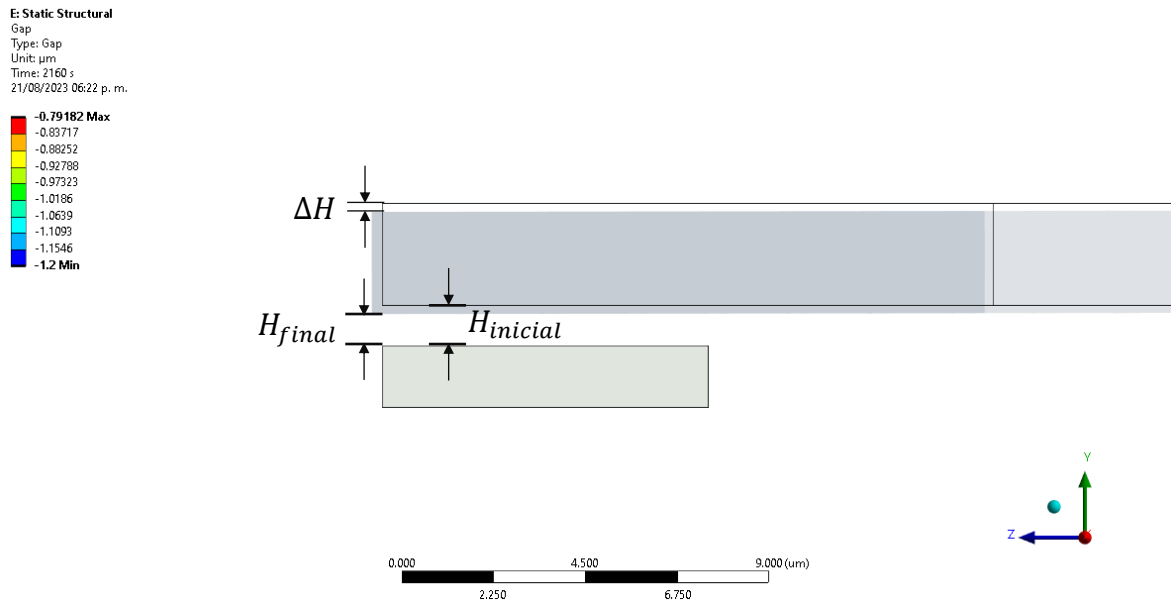


Figura 3.35 Desplazamiento del voladizo transcurridos 2160 segundos

Además, en el caso en el que han transcurrido 20,000 segundos (figura 3.36), se ha alcanzado aproximadamente la mitad del ciclo de trabajo y la holgura entre el voladizo y el capacitor se ha reducido a 0.69287 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) es de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.69287 \mu\text{m} = -0.30713 \mu\text{m}$$

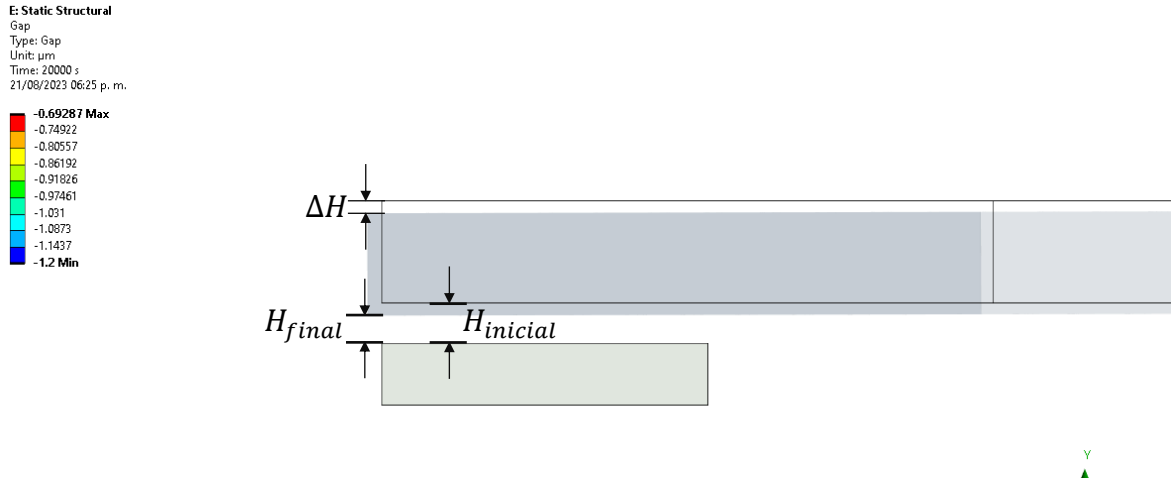


Figura 3.36 Desplazamiento del voladizo transcurridos 20000 segundos

Posteriormente, cuando han transcurrido 38,330 segundos (ver Figura 3.37), se suspende la aplicación de calor para ingresar a la zona de enfriamiento y la holgura entre el voladizo y el capacitor se reduce a 0.59121 μm , es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) es de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.59121 \mu\text{m} = -0.40879 \mu\text{m}$$

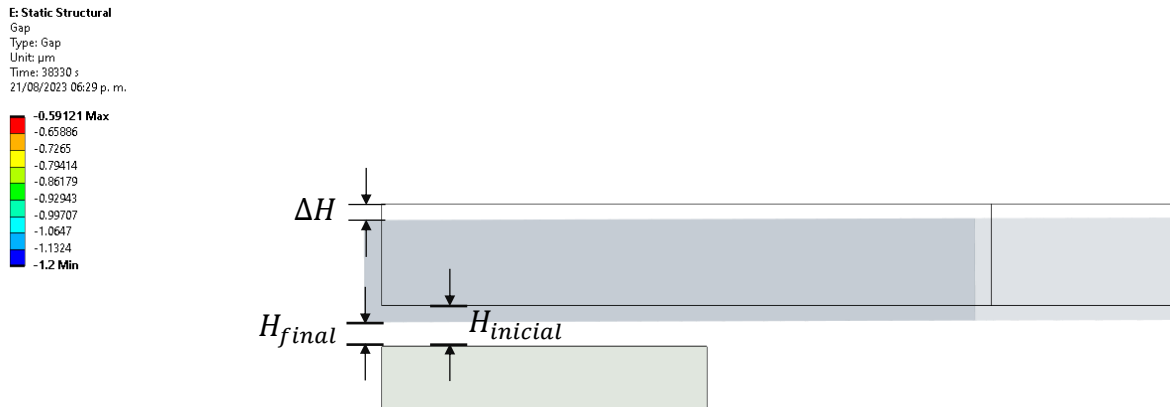


Figura 3.37 Desplazamiento del voladizo transcurridos 38330 segundos

Finalmente, para el caso en el que se completa el ciclo, han transcurrido 41,160 segundos (véase la Figura 3.38). La holgura al final de la simulación entre el voladizo y el capacitor se reduce a $0.72684 \mu\text{m}$, es decir, el desplazamiento del voladizo (ΔH) ha sido de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} = 1 \mu\text{m} - 0.72684 \mu\text{m} = -0.27316 \mu\text{m}$$

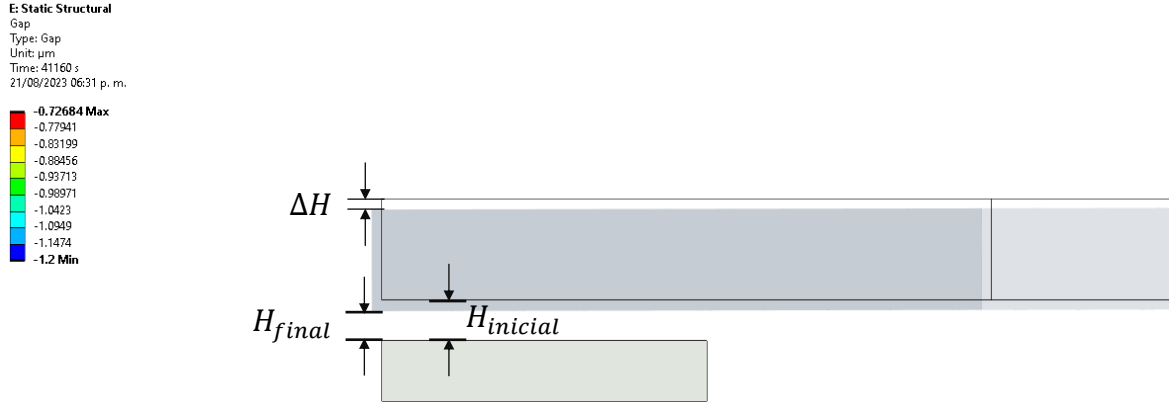


Figura 3.38 Desplazamiento del voladizo transcurridos 41160 segundos

3.2.2.1. Validación de resultados numéricos

A partir de los resultados obtenidos, se realizó la comparación con los datos experimentales del artículo [10], como se muestra en la figura 3.39. Se observa una tendencia similar en el desplazamiento del voladizo durante el tiempo que dura la simulación, notando una leve discrepancia en los resultados a partir del punto de equilibrio, es decir, cuando se ha alcanzado la temperatura de operación.

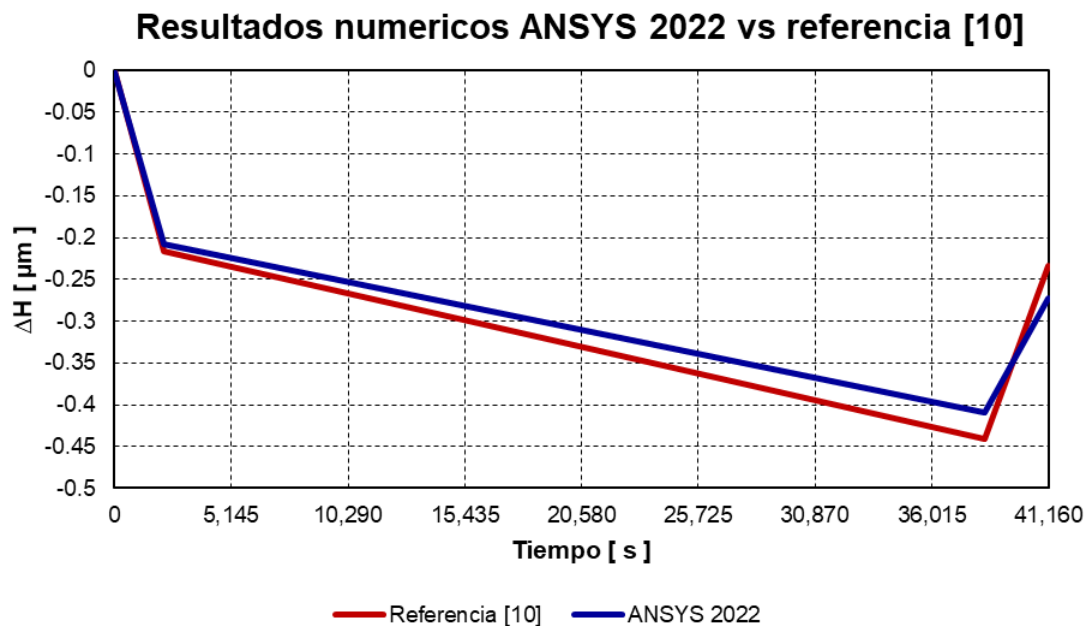


Figura 3.39 Resultados numéricos ANSYS 2022 vs referencia [10]

Conforme a los resultados obtenidos, se calcula el porcentaje de error relativo entre el artículo de investigación científica y los resultados obtenidos mediante la metodología seguida y el uso de ANSYS 2022 R2. Estos porcentajes se encuentran detallados en la tabla 3.5. Como era de esperar, según se muestra en la figura 3.30, el error máximo se presenta al finalizar la prueba. Sin embargo, dado que el porcentaje de error promedio es inferior al 10%, se considera un valor aceptable que valida la metodología para estudios termomecánicos con variaciones de temperatura a lo largo del tiempo.

Tabla 3.5 Porcentaje de error relativo entre resultados con temperatura transiente

% de error relativo ANSYS 2022 vs Referencia [10]			
Tiempo	Referencia [10]	ANSYS 2022	Error
0	0	-0.00261	0%
2160	-0.2166	-0.20818	4%
38330	-0.4416	-0.40879	7%
41160	-0.2333	-0.27316	-17%

En conclusión, al comparar los datos numéricos con los experimentales proporcionados en los artículos de investigación científica utilizados como referencia metodológica, se puede concluir que estos ofrecen una guía adecuada en el estudio de fenómenos termomecánicos y son aplicables tanto en microestructuras como en macroestructuras.

CAPITULO 4

4. PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO POR TEMPERATURA EN UN COFRE AUTOMOTRIZ

Con la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 2 acerca de cámaras climáticas y conceptos básicos de transferencia de calor, junto con la validación de las metodologías utilizadas como referencia en el capítulo 3, se pueden aplicar las metodologías en el cofre del vehículo en cuestión. Esto se hace con el propósito de observar el comportamiento de las holguras resultantes antes, durante y al finalizar la prueba en la cámara climática. En la siguiente sección se presentan las soluciones a algunos problemas técnicos que se han encontrado debido al modelo 3D durante la prueba.

4.1. Modelo CAE del cofre de un Toyota Yaris Modelo 2010

Para llevar a cabo el análisis, se requiere obtener un modelo confiable que pueda ser utilizado en la simulación. En el transcurso de la investigación, se ha optado por emplear el modelo proporcionado por el Centro de Seguridad y Análisis de Colisión (CCSA) de la Universidad George Mason [28] , el cual se muestra en la figura 4.1.

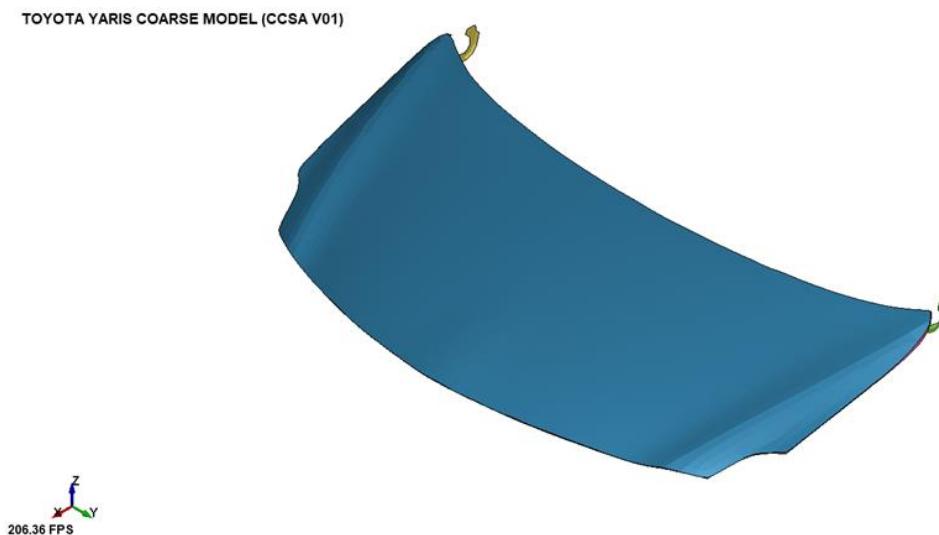


Figura 4.1 Modelo 3D de cofre de Toyota Yaris obtenido de CCSA [28]

Sin embargo, para fines de la investigación, el modelo en malla obtenido presenta dificultades para el análisis. Esto se debe a que fue desarrollado para su uso en LS-DYNA, un software orientado al cálculo y simulación de la dinámica estructural de conjuntos o componentes con grandes deformaciones y/o impactos (CRASH), así como modelos FEM complejos y diferentes condiciones de contacto [29]. Como resultado de esto, surgen problemas de convergencia al intentar llevar a cabo el análisis térmico, ya que resulta imposible definir las condiciones de contacto adecuadas. Por lo tanto, se hace necesario reparar la geometría y convertir el modelo en un objeto paramétrico.

Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza el espacio de trabajo SpaceClaim, que se encuentra dentro de la interfaz de ANSYS Academic. Este espacio incluye una sección dedicada a corregir algunos problemas en el mallado de la geometría importada directamente desde LS-DYNA. En este proceso, se solucionaron algunos errores de la geometría y, posteriormente, se convirtió el modelo en sólidos para facilitar su manipulación. Las ventajas de utilizar un modelo 3D sólido en comparación con un modelo 3D Shell se ilustran en la figura 4.2 [30].

	Elementos solidos	Elementos Shell	Elementos Shell solidos
Características geometricas	3D	2D	3D
Limitaciones geometricas	Ninguna	Sólo apto para estructuras delgadas	Sólo apto para estructuras delgadas
Grados de libertad	Tres - Translaciones endirección de X,Y y Z	Seis - Translacion y rotación en direccion de X, Y y Z	Tres - Translaciones endirección de X,Y y Z
Preprocesado de geometria	Ninguno, si la geometria es 3D	Requerido, si la geometria es 3D - Volumen debe ser convertido a superficies	Es posible que se requiera un preprocesamiento específico para poder generar una malla de barrido
Libertad de mallado	Alto	Alto	Bajo
Tiempo de mallado	Generalmente mayor que elementos shell	Generalmente menor que para elementos solidos	Generalmente mayor que elementos shell
Tiempo de solución	Mas largo	Mas corto	Generalmente entre elementos solidos y shell

Figura 4.2 Comparativa entre elementos: solid, shell y solid shell [30].

De ahí se obtiene el modelo corregido y optimizado para el análisis que se presenta en la figura 4.3.

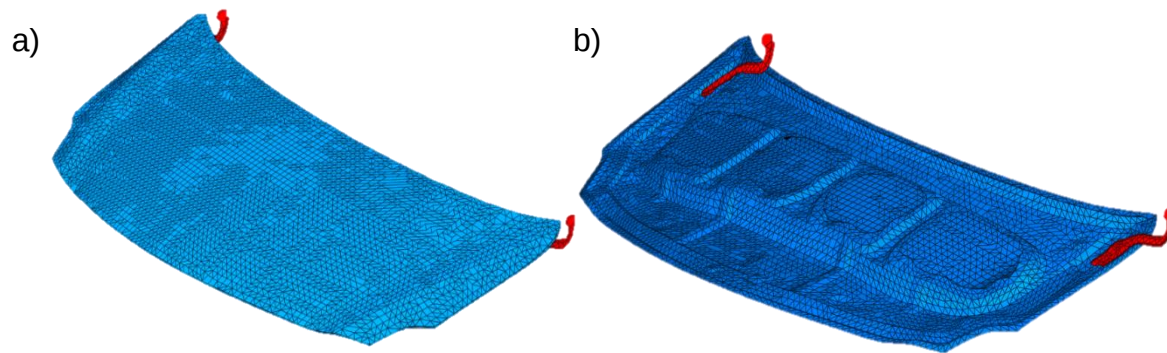


Figura 4.3 Modelo corregido y optimizado para el análisis: a) Vista superior y b) Vista inferior

Al comparar un punto de interés indicado en la figura 4.4 con los resultados obtenidos en la simulación, se observa una diferencia de 0.1793 mm, lo que representa una variación del 5 %. Esta discrepancia demuestra una precisión aceptable y, por ende, garantiza un mallado final satisfactorio.

El valor medido en la simulación es de 3.5261.

El porcentaje de error se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{(\text{Valor esperado} - \text{Valor medido})}{\text{Valor esperado}} * 100$$

$$= \frac{3.3468 - 3.5261}{3.3468} = -5.3573\%$$

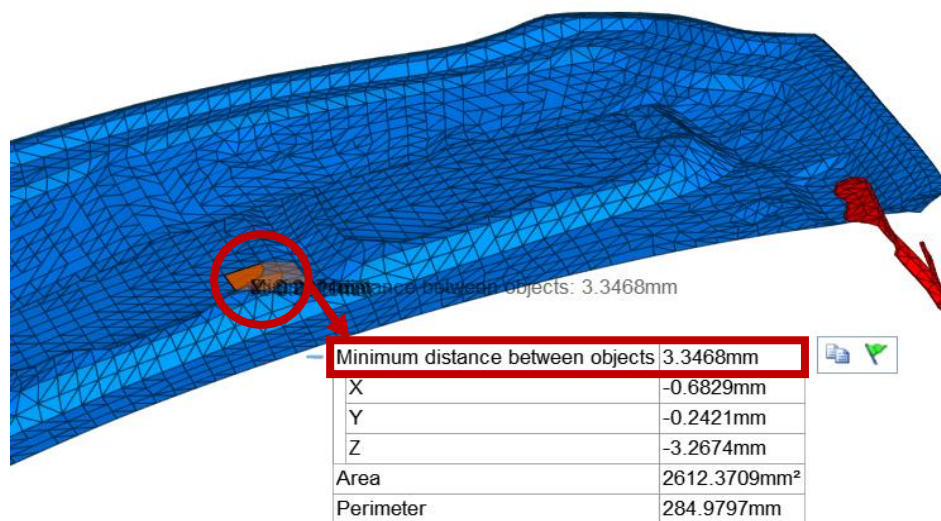


Figura 4.4 Punto de validación paramétrica del cofre corregido

4.2. Análisis térmico transitorio

Una vez obtenido el modelo optimizado para su uso en la investigación, se procede a realizar la simulación de la exposición del cofre a las condiciones específicas de la cámara de envejecimiento acelerado por temperatura, las cuales se detallan en el Capítulo 1, Tabla 1.1. Con este propósito, se lleva a cabo un análisis térmico transitorio con el objetivo de emular los tiempos reales de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado.

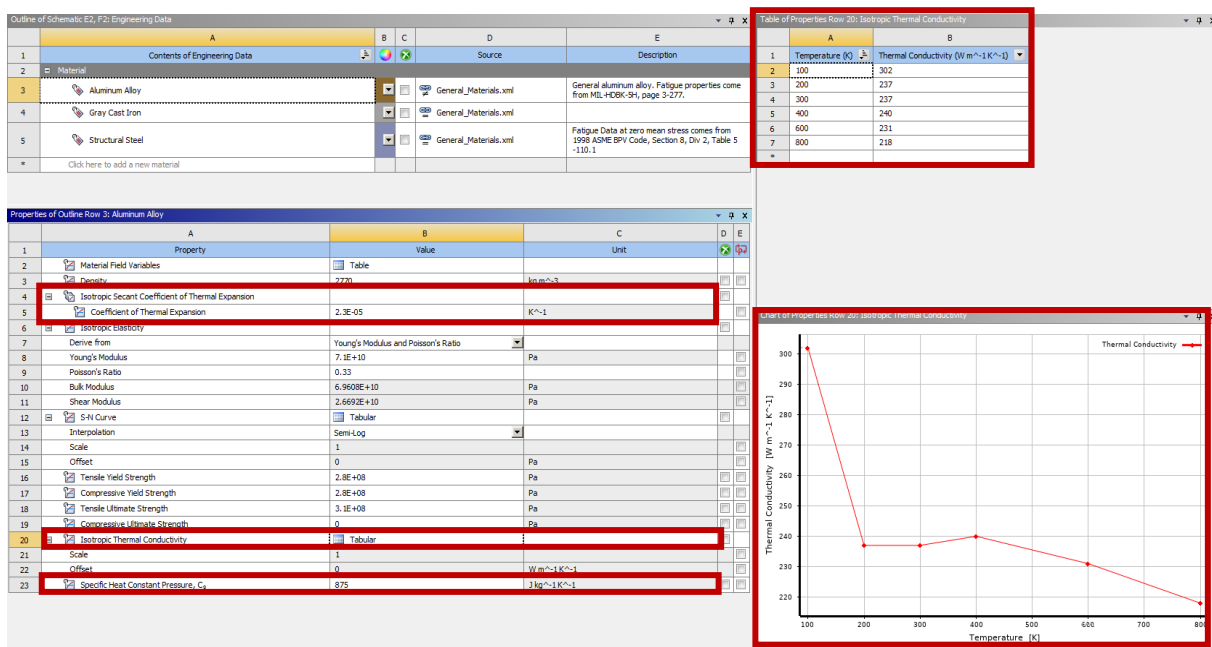
Aunque inicialmente no se dispone de información específica sobre el material original proporcionado por el proveedor del Toyota Yaris 2010, una revisión exhaustiva revela que, comúnmente, los cofres de automóviles de esta época están fabricados con acero, aluminio, fibra de vidrio o fibra de carbono [31]. No obstante, la ausencia de una especificación clara nos brinda la oportunidad de explorar y justificar la opción del aluminio como alternativa.

Se propone el “aluminio” como material de fabricación para el cofre de un Toyota Yaris 2010 en lugar de acero, fundamentado en diversas consideraciones técnicas y de rendimiento. El aluminio, por su naturaleza liviana, ofrece una significativa reducción de peso en comparación con el acero, lo que contribuye directamente a mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes [31]. Además, el aluminio presenta una excelente resistencia a la corrosión, lo que aumenta la durabilidad y longevidad del cofre, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas.

La conductividad térmica del aluminio también es un factor relevante, ya que facilita una disipación más eficiente del calor generado durante la operación del vehículo, lo que puede tener un impacto positivo en el rendimiento del motor y otros componentes. Adicionalmente, la maleabilidad del aluminio permite una mayor flexibilidad en el diseño, facilitando formas más aerodinámicas que pueden mejorar la eficiencia del vehículo.

Considerando estos aspectos, la elección del aluminio no solo se justifica desde el punto de vista técnico y de rendimiento, sino que también responde a la creciente demanda de vehículos más ligeros y eficientes en el contexto de las preocupaciones ambientales y la eficiencia energética.

Las propiedades térmicas necesarias para el análisis térmico en régimen transitorio se presentan en la Figura 4.5 para el cofre, utilizando los coeficientes de



conductividad térmica indicados en el Capítulo 2, Tabla 2.3, correspondientes al aluminio a diferentes temperaturas. Además, se considera el coeficiente de dilatación térmica proporcionado en el Capítulo 2, Tabla 2.7, para el aluminio.

Figura 4.5 Propiedades térmicas asignadas al material del cofre empleado.

Además, se están tomando en consideración las condiciones de temperatura de acuerdo con una cámara climática real para la prueba de envejecimiento [4], tal como se mostró en la revisión bibliográfica, como se presenta en la figura 4.6.

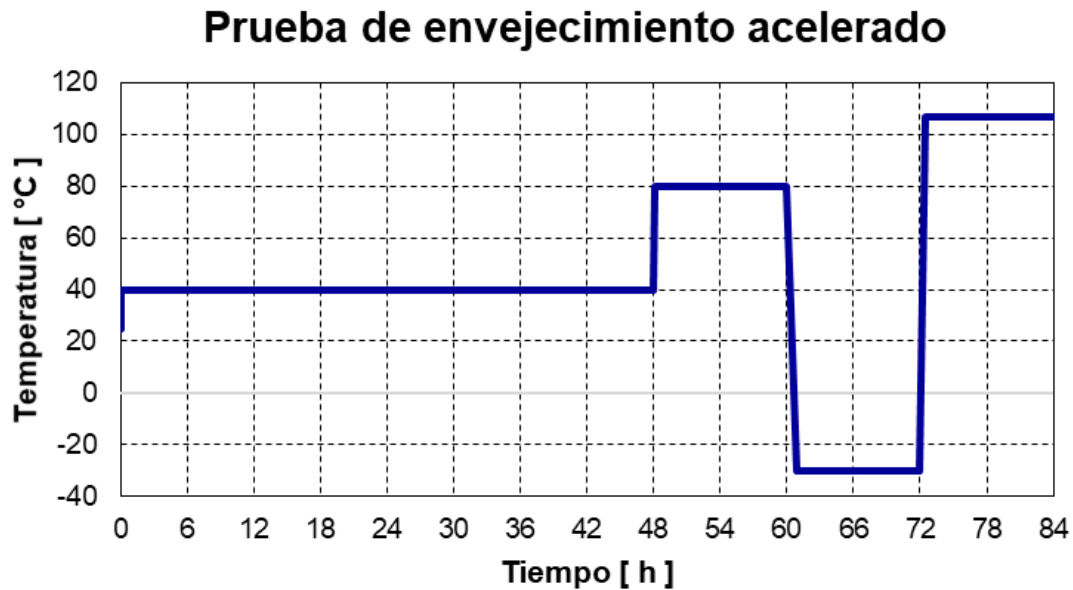


Figura 4.6 Carga térmica aplicada durante el análisis térmico transitorio

Se simula una cámara climática para la prueba de envejecimiento acelerado, la cual está compuesta por una lámpara de luz xenón. Esta lámpara tiene la capacidad de emular la exposición prolongada a la radiación solar, la cual es responsable del envejecimiento del material. La lámpara de luz xenón irradia calor en forma de radiación térmica sobre la parte superior del cofre, como se muestra en color azul en la figura 4.7.

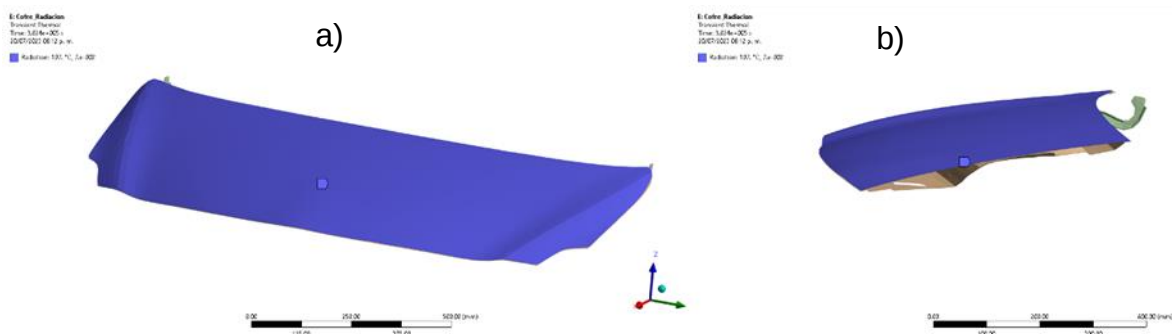


Figura 4.7 Exposición a la radiación solar: a) Vista isométrica y b) Sección transversal de vista lateral

Además, dado que el cofre está expuesto a radiación, se debe considerar un valor de emisividad para el aluminio. El valor de emisividad utilizado en la simulación es el que se presenta en la revisión bibliográfica, en la tabla 2.6, el cual es de 0.07.

La imagen 4.8 muestra el valor aplicado en la cara superior del cofre de acuerdo a las condiciones mencionadas anteriormente.

Details of "Radiation"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
ID (Beta)	358
Type	Radiation
Correlation	To Ambient
Emissivity	7.e-002 (step applied)
Ambient Temperature	Tabular Data
Suppressed	No

Figura 4.8 Factor de emisividad del cofre empleado en la investigación

A continuación, se presenta la distribución de temperaturas registrada cada 12 horas dentro de la cámara climática emulada, lo que permite observar una adecuada dispersión del calor a través de los materiales del cofre:

En relación al inicio de la prueba, tras transcurrir apenas 432 segundos o 7.2 minutos, se aprecia la distribución que se muestra en la figura 4.9. Se advierte que la mayor parte del cofre se encuentra a temperatura ambiente (25 °C); no obstante, se nota un leve aumento en la zona donde el calor incide (parte superior del cofre).

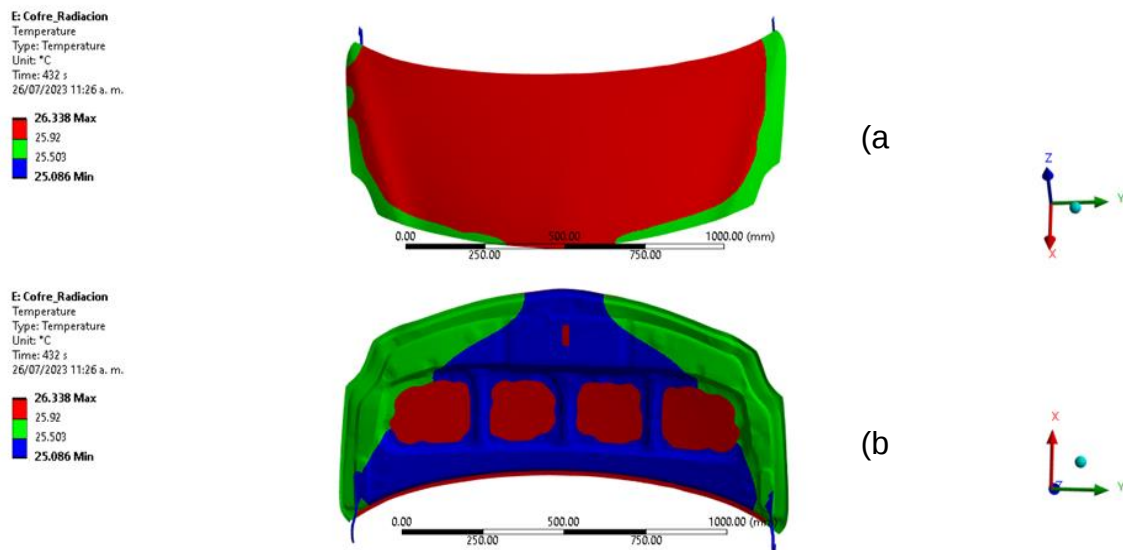


Figura 4.9 Distribución de temperatura en el cofre, después de 432 segundos: a) Vista superior y b) Vista inferior.

A continuación, después de transcurridas 12 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la distribución de la temperatura se encuentra en el intervalo de 39.876 °C como mínimo y 39.917 °C como máximo, tal como se muestra en la figura 4.10. Esto indica que la mayor parte del cofre se encuentra cercano a la temperatura de exposición durante el primer período de la prueba (40 °C).

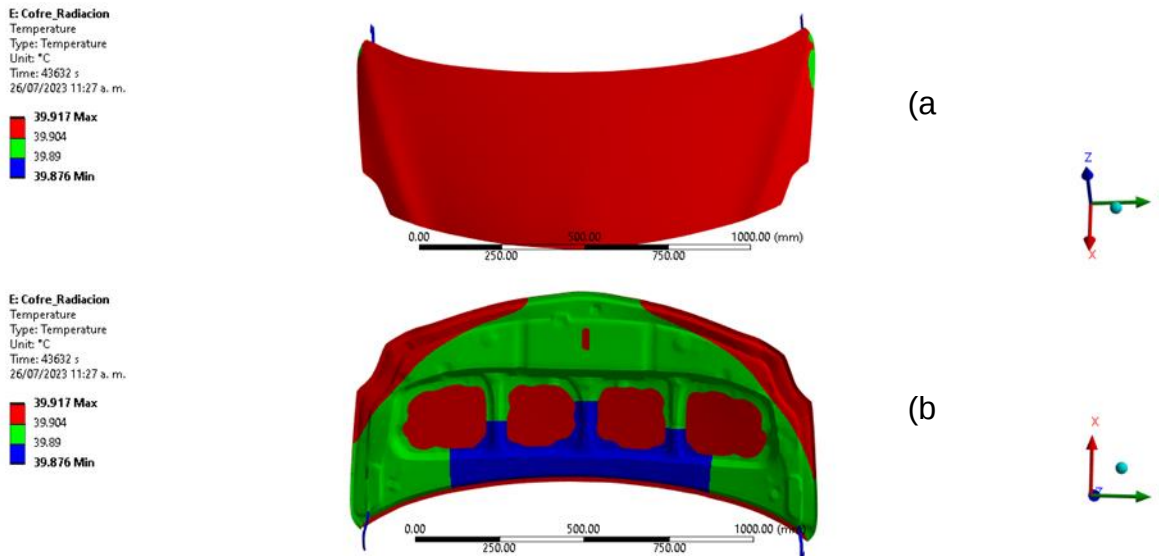


Figura 4.10 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 12 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

Posteriormente, después de transcurrir 24 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la distribución de la temperatura ha alcanzado casi los 40 °C en todo el cofre, como se muestra en la figura 4.11. Esto indica que el cofre se encuentra cerca del equilibrio de la temperatura de exposición durante el primer período de la prueba (40 °C).

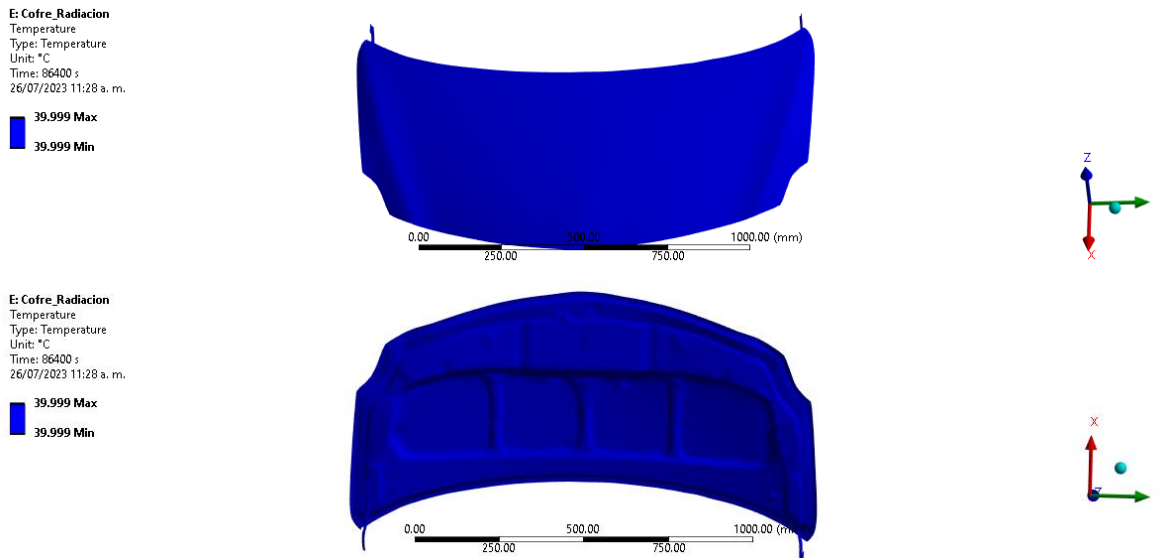


Figura 4.11 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 24 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

Posteriormente, transcurridas 36 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la distribución de la temperatura ha alcanzado los 40 °C en todo el cofre, como se muestra en la figura 4.12. Esto indica que el cofre ha alcanzado el equilibrio de temperatura de exposición durante el primer período de la prueba (40 °C).

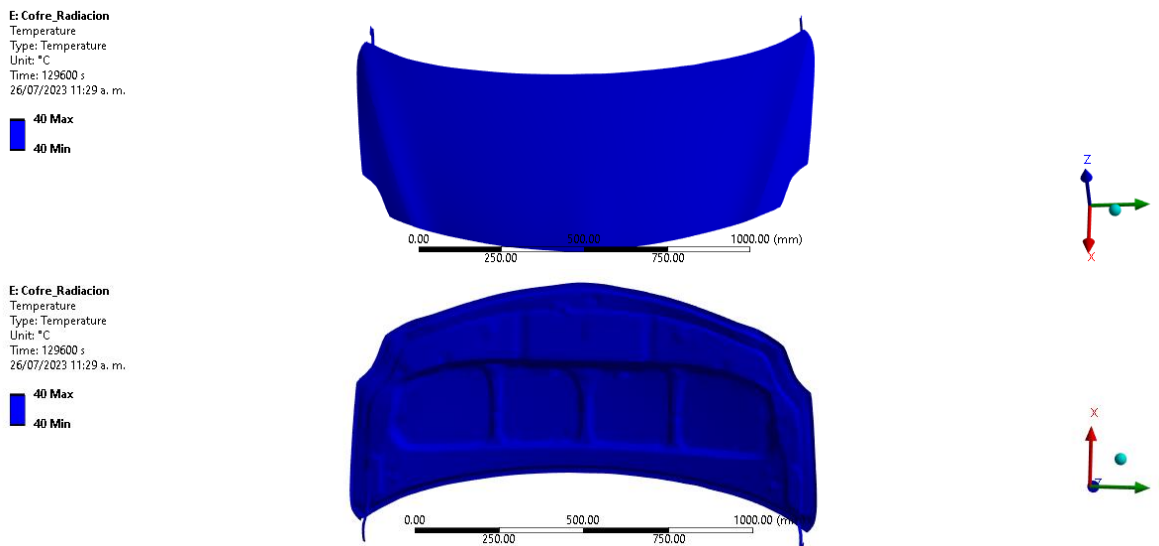


Figura 4.12 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 36 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

Como resultado, después de 48 horas desde el inicio de la prueba, se ha alcanzado el final de la primera etapa de temperatura aplicada (40 °C). Además, como se puede observar en la figura 4.12 anteriormente mencionada, la temperatura de 40 °C ha sido alcanzada. De acuerdo con lo anterior, la figura 4.13 muestra que la distribución de la temperatura se mantiene constante. De esta manera, se ha llegado al final de la primera etapa de temperatura y se ha dado inicio a la siguiente etapa.

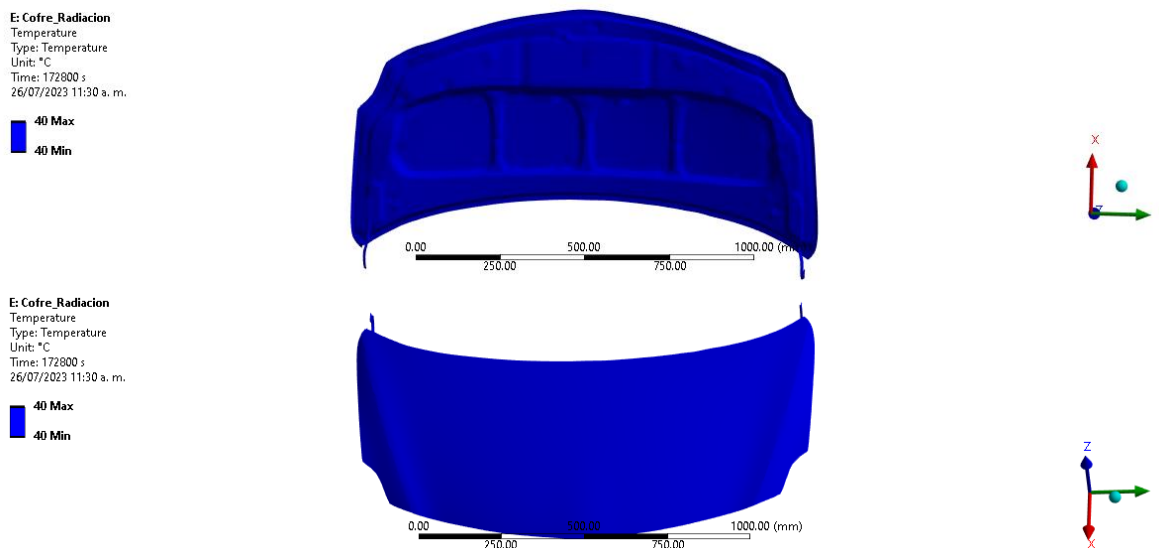


Figura 4.13 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 48 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

En este punto, a partir de las 48 horas, se aplica calor con el propósito de elevar la temperatura del cofre a 80 °C. Después de 12 horas de la segunda etapa, es decir, después de 60 horas transcurridas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.14 la distribución de temperatura en el intervalo de 79.935 °C como mínimo y 79.964 °C como máximo. Teniendo en cuenta que la temperatura objetivo era de 80 °C, se puede concluir que la distribución obtenida está muy cerca del objetivo, y que la temperatura podría afectar la holgura del cofre en esta etapa, como se requiere en la prueba. Asimismo, al finalizar este período de tiempo, se concluye la segunda etapa de temperatura, dando inicio a la tercera etapa.

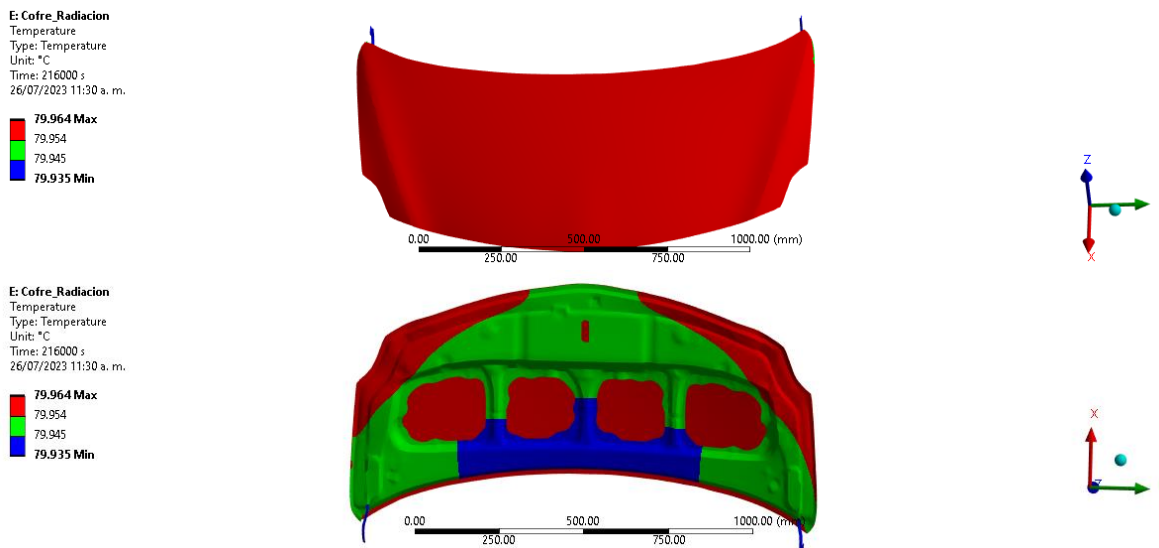


Figura 4.14 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 60 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

Ahora bien, a partir de las 60 horas, se inicia el enfriamiento de la cámara climática con el propósito de reducir la temperatura del cofre a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después de 12 horas de la tercera etapa, es decir, a las 72 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.15 la distribución de temperatura en un rango mínimo de $-23.726\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máximo de $-21.807\text{ }^{\circ}\text{C}$. Considerando que la temperatura objetivo era $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede concluir que el tiempo necesario de exposición para alcanzar esa temperatura debió ser mayor. Sin embargo, el objetivo de la prueba de envejecimiento es analizar el comportamiento del cofre ante cambios bruscos de temperatura, por lo que se establece que el cambio de temperatura es lo suficientemente brusco como para afectar la holgura final del cofre. Al finalizar este período de tiempo, se concluye la tercera etapa de temperatura, dando inicio a la cuarta y última etapa.

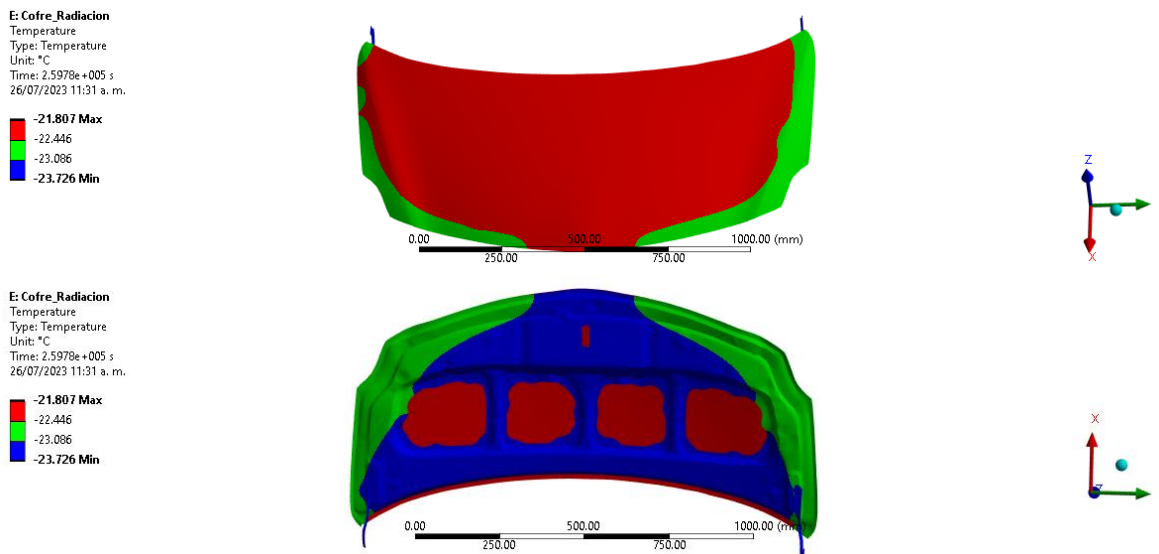


Figura 4.15 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 72 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

Para concluir, después de transcurridas 72 horas, se vuelve a aplicar calor con el propósito de elevar la temperatura del cofre a 107 °C. Tras 12 horas de la cuarta etapa, es decir, 84 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.16 la distribución de temperatura en el rango de 106.91 °C como mínimo y 106.96 °C como máximo. Considerando que la temperatura objetivo era de 107 °C, se puede concluir que la distribución obtenida está muy próxima al objetivo y que la temperatura podría afectar la holgura del cofre dentro de esta etapa, como se requiere en la prueba. De esta manera, la prueba de envejecimiento acelerado se concluye después de transcurridas 84 horas.

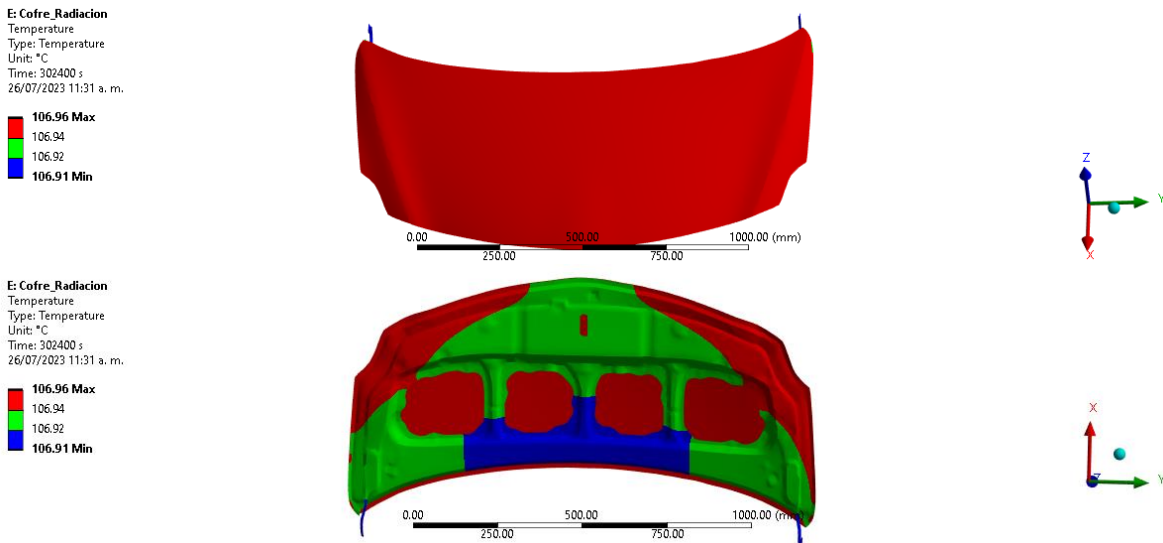


Figura 4.16 Distribución de temperatura en el cofre, después de transcurridas 84 horas: a) Vista superior y b) Vista inferior.

En lo que respecta a la distribución promedio de temperatura en el cofre durante toda la prueba, se muestra y compara con el perfil de temperatura asignado en la figura 4.17. Se observa que la tendencia es muy similar al perfil aplicado y que en su mayoría se alcanza la temperatura objetivo al final de cada etapa de temperatura.

Distribución promedio de temperatura

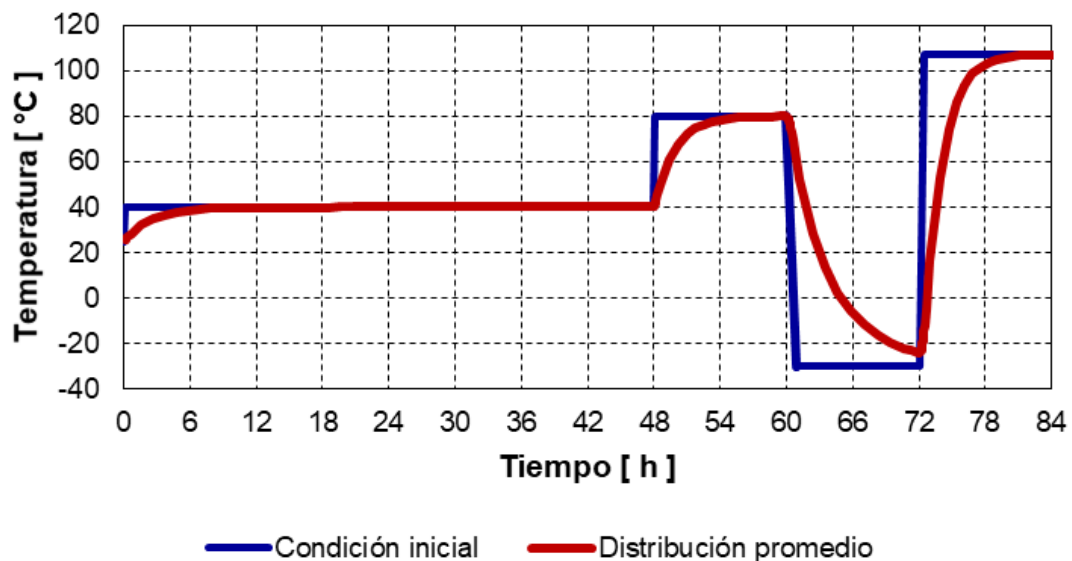


Figura 4.17 Grafico comparativo de la distribución de temperatura en el cofre.

4.3. Análisis termo-mecánico del cofre de un Toyota Yaris 2010 sometido a la prueba de envejecimiento acelerado

En cuanto al análisis termo-mecánico, posterior al análisis térmico transitorio, se procede a llevar a cabo un estudio estático estructural con el objetivo de observar la holgura resultante. En este contexto, se importan los datos obtenidos en el análisis térmico transitorio al análisis estático estructural, como se ilustra en la figura 4.18. Es importante destacar que la conexión esquemática se ha realizado de esta manera con el fin de permitir una convergencia en ambos estudios. De esta forma, se demuestra que ambos estudios comparten información relacionada con los materiales, la geometría y los resultados térmicos. Sin embargo, es necesario señalar que las condiciones de contacto aplicadas en el modelo varían entre cada uno de los estudios.

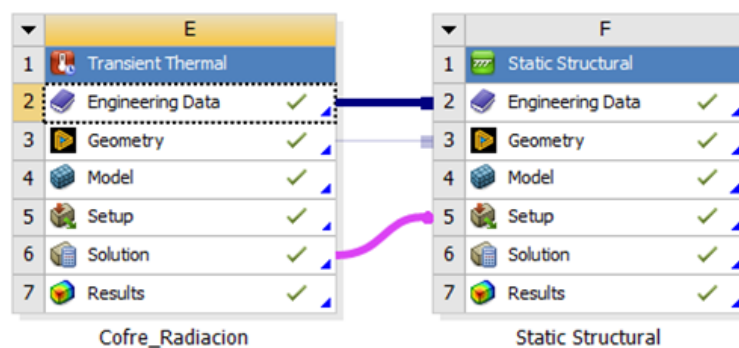


Figura 4.18 Conexión esquemática entre el estudio térmico transitorio el estudio estático estructural

Como se mencionó en el párrafo anterior, el análisis estático estructural implica consideraciones especiales en la configuración de los contactos entre los elementos del modelo. Esto se hace con el propósito de garantizar que las partes del ensamblaje no se atraviesen y permitan obtener resultados realistas. Además, como se observa en la figura 4.19, se establece un valor de 10 mm para la región de pinball con el fin de facilitar la observación de la holgura de manera práctica. Es decir, de esta manera se puede analizar la holgura en un intervalo que va desde 0 hasta 10 mm.

Details of "Frictionless - hoodinner_0.5715\Solid To"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	5328 Faces
Target	2 Faces
Contact Bodies	hoodinner_0.5715\Solid
Target Bodies	Hood_0.7747\Solid
Protected	No
Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Object ID (Beta)	126
Display	
Element Normals	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	10. mm
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
☐ Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Figura 4.19 Propiedades de contacto para observar la holgura resultante

Posteriormente, una vez que se han tenido en cuenta las condiciones especiales mencionadas, se procede a restringir las bisagras del cofre, como se muestra en la figura 4.20. De esta manera, se simula que el cofre está sostenido por las mismas y se permite una libertad de desplazamiento en las láminas del cofre.

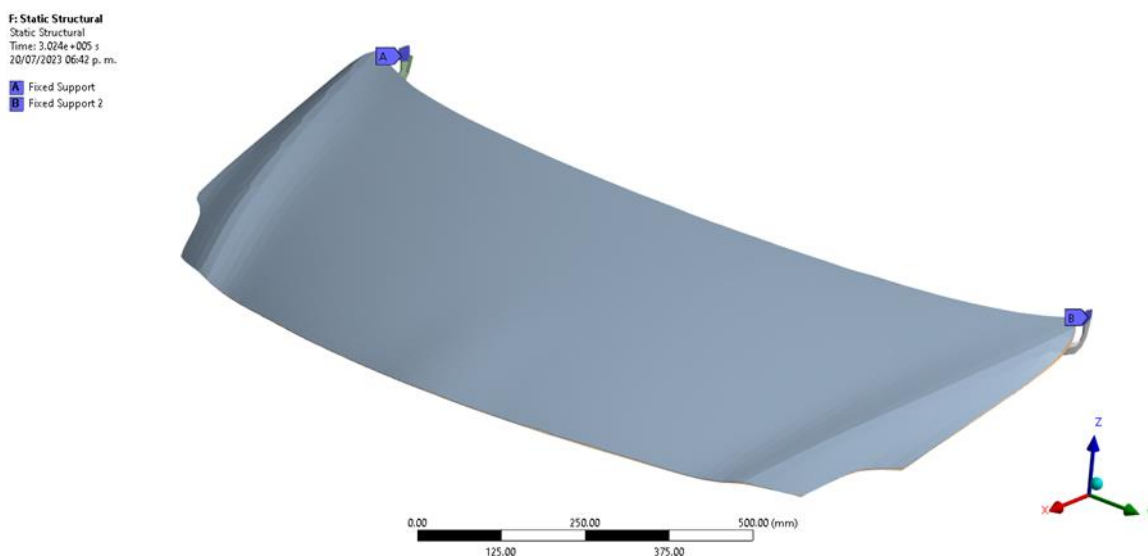


Figura 4.20 Condiciones de frontera para el análisis estático estructural

4.4. Análisis de holguras resultantes durante la prueba de envejecimiento acelerado

En cuanto a las holguras resultantes al término del análisis termo-mecánico, estas se presentan en la figura 4.21. Es posible observar que, en promedio, la holgura mínima es de 2.0292 mm en ciertas zonas entre las láminas que conforman el cofre. Debido a esto, se puede obtener una comprensión más clara de cómo afectan a la estructura del cofre, prestando mayor atención a estas zonas en particular.

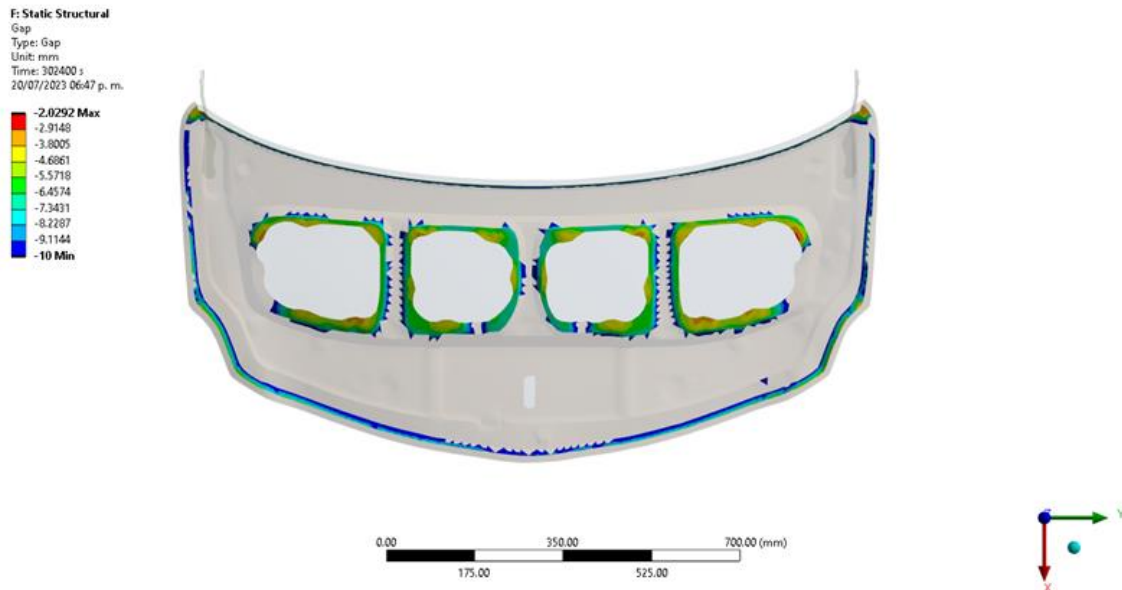


Figura 4.21 Holgura del cofre al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado

Para fines prácticos, se han seleccionado los puntos de interés como se muestra en la figura 4.22. Esta elección se basa en las zonas con menor holgura, lo que garantiza la comprensión de su efecto en la estructura del cofre.

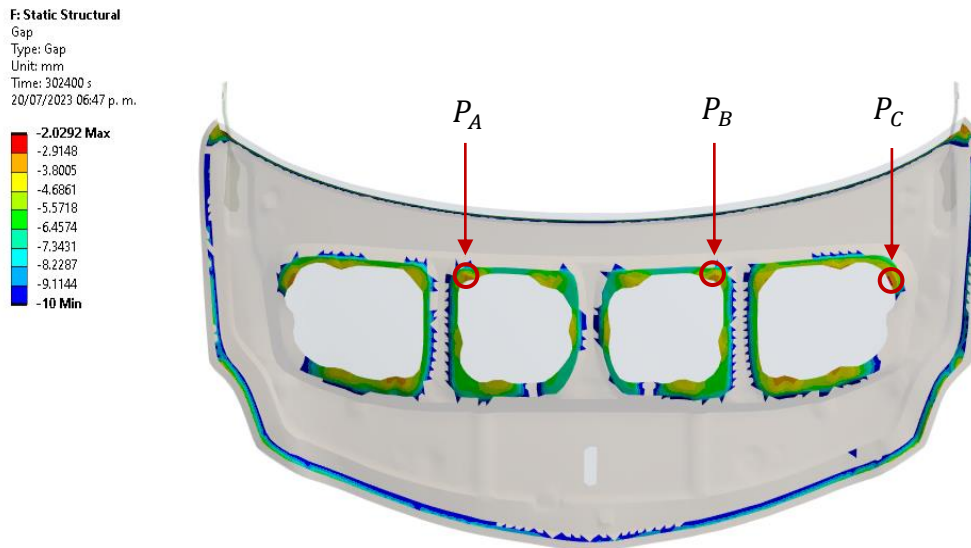


Figura 4.22 Puntos de holgura en particular analizados

A continuación, se presenta el comportamiento de cada punto de interés durante la prueba de envejecimiento acelerado, cada 12 horas transcurridas hasta la finalización de la misma. Esto permite obtener una comprensión sólida del comportamiento del cofre en las zonas críticas debido a la proximidad mencionada previamente.

En relación al punto P_A , al inicio de la prueba se registra una holgura de 3.523 mm, como se muestra en la figura 4.23. Esta holgura se considera la condición inicial del cofre con la cual se compararán los resultados finales.

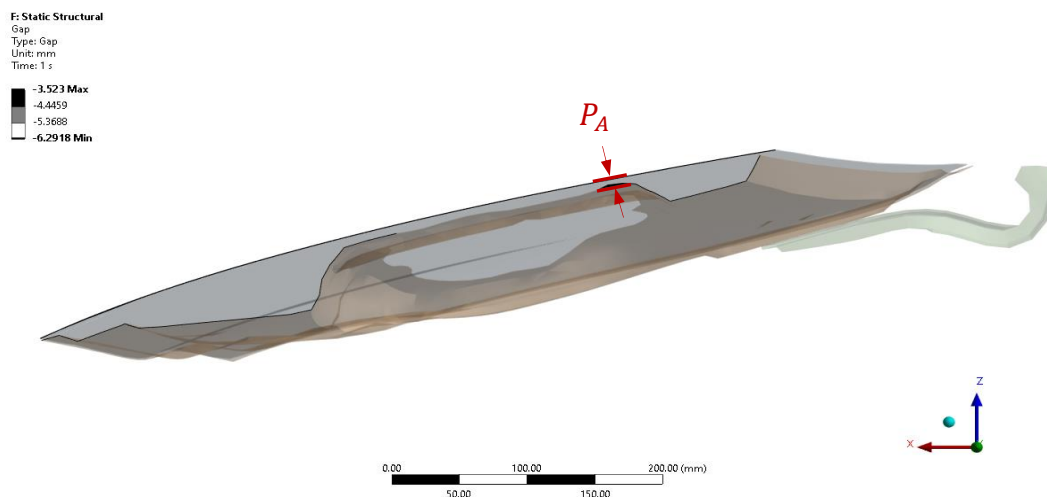


Figura 4.23 Holgura al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

A continuación, transcurridas 12 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura mínima se ha reducido a 3.4838 mm, tal como se muestra en la figura 4.24. Esto indica que, a medida que la temperatura del cofre aumenta (recordando que en este momento la temperatura de exposición es cercana a 40 °C), la holgura se reduce.

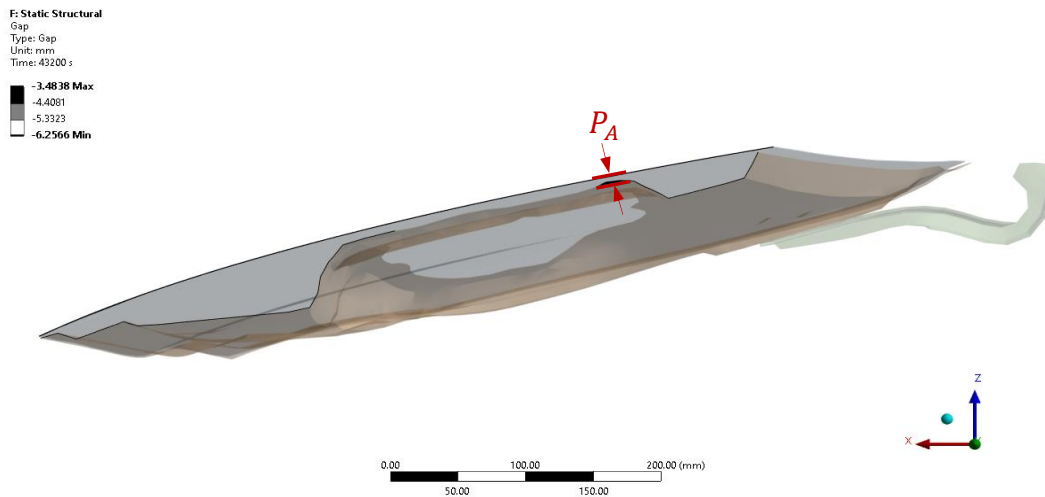


Figura 4.24 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Posteriormente, transcurridas 24 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura se ha reducido ligeramente a 3.4814 mm en comparación con las 12 horas anteriores, como se muestra en la figura 4.25. Además, es relevante señalar que en este momento la temperatura se encuentra cerca de los 40 °C.

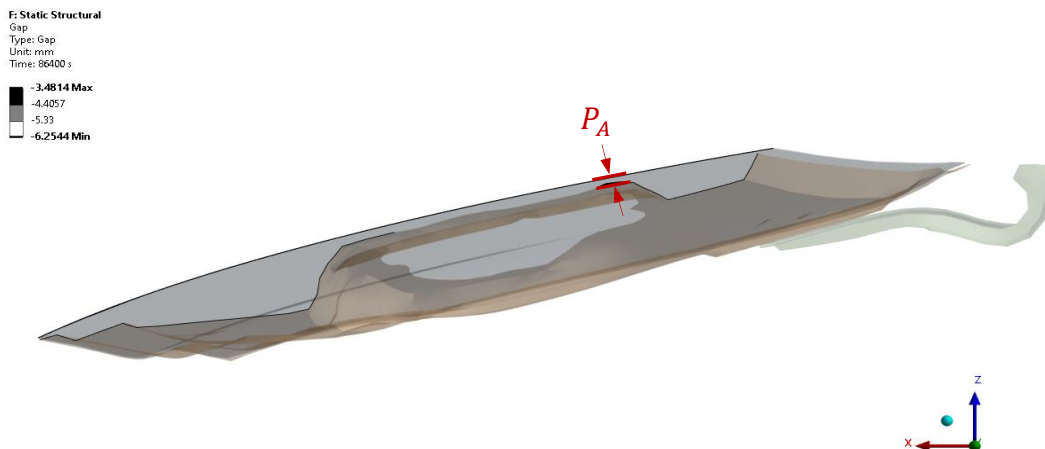


Figura 4.25 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Posteriormente, después de transcurridas 36 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura se mantiene en 3.4814 mm, como se muestra en la figura 4.26. Esto indica que el cofre ha alcanzado el equilibrio de temperatura de exposición durante el primer período a 40 °C, y, por lo tanto, la holgura permanece constante en este punto.

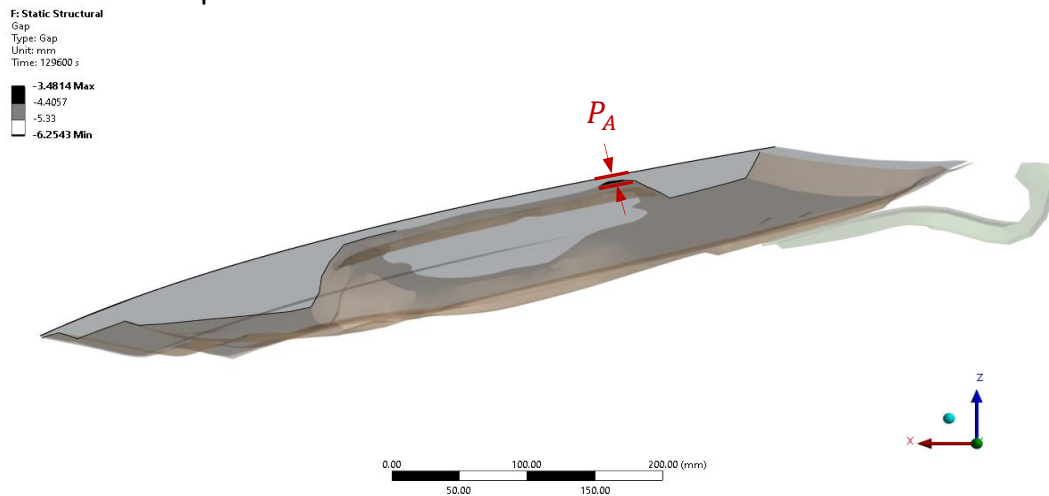


Figura 4.26 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Como resultado, después de 48 horas desde el inicio de la prueba, se ha alcanzado el final de la primera etapa. De acuerdo con lo anterior, en la figura 4.27 se observa que la holgura se ha mantenido en 3.4814 mm. Además, de esta manera, se inicia la siguiente etapa de temperatura.

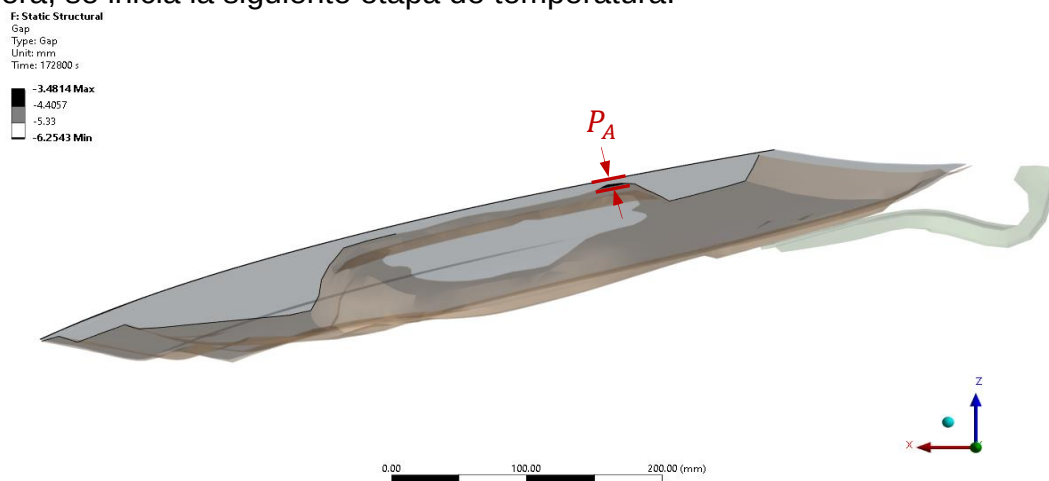


Figura 4.27 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

En este punto, después de 48 horas de transcurrido el tiempo, se procede a aplicar calor con el propósito de elevar la temperatura del cofre a 80 °C. Después de 12 horas de la segunda etapa, es decir, 60 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.28 que la holgura se reduce a 3.3724 mm. Es importante recordar que la temperatura se encontraba muy cerca de la temperatura objetivo de 80 °C en este momento. Al finalizar este período de tiempo, concluye la segunda etapa de temperatura, dando inicio a la tercera etapa, que es una etapa de enfriamiento.

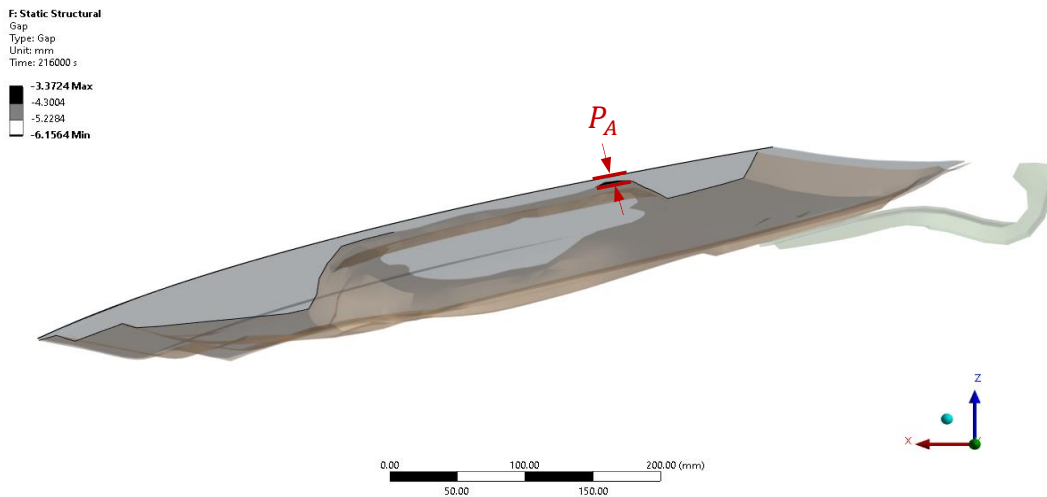


Figura 4.28 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Ahora bien, a partir de las 60 horas, se está enfriando el cofre con el objetivo de reducir su temperatura a -30 °C. Después de 12 horas desde el inicio de la tercera etapa, es decir, a las 72 horas transcurridas, se observa en la figura 4.29 que la holgura aumenta a 3.3608 mm. De esta manera, se puede concluir que, al enfriar las láminas del cofre, la holgura entre ellas aumenta. Asimismo, al finalizar este período de tiempo, se concluye la tercera etapa de temperatura, dando inicio a la cuarta y última etapa.

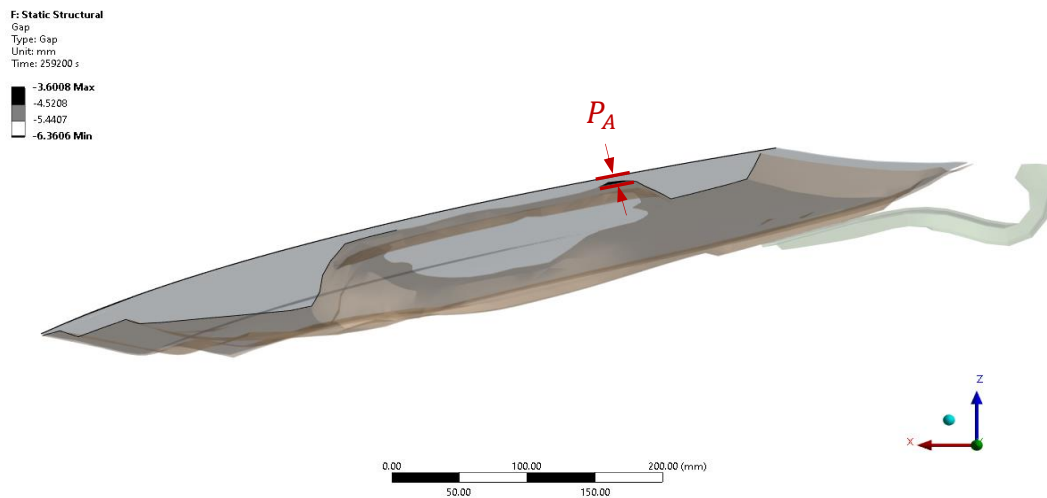


Figura 4.29 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Finalmente, después de transcurridas 72 horas, se vuelve a aplicar calor con el objetivo de elevar la temperatura del cofre a 107 °C. A las 84 horas desde el inicio de la prueba, es decir, después de 12 horas en la cuarta etapa, se observa en la figura 4.30 que la holgura se reduce a 3.2968 mm. De acuerdo con los resultados previos, este comportamiento era esperado debido al brusco incremento de calor. De esta manera, la prueba de envejecimiento acelerado se concluye después de 84 horas en el punto P_A .

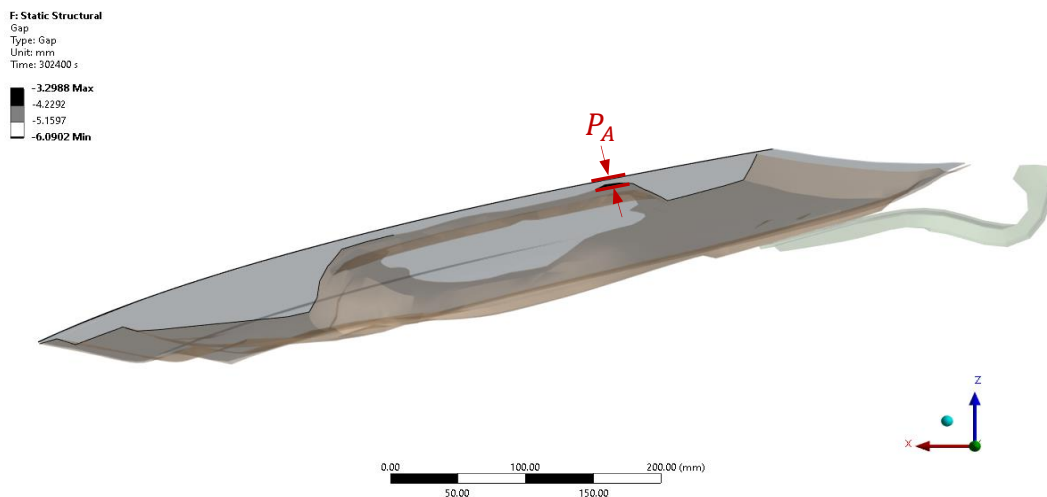


Figura 4.30 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

En cuanto a la holgura resultante en el punto P_A del cofre durante toda la prueba, se muestra en la figura 4.31. En conclusión, la simulación de la prueba de envejecimiento realizada en el cofre de un Toyota Yaris 2010 arroja resultados significativos. Se observa que el punto de estudio P_A experimenta una disminución gradual en su dimensión a lo largo de la prueba, comenzando en 3.523 mm al inicio y finalizando en 3.2988 mm al concluir el proceso. Estos resultados indican que, a pesar de las variaciones extremas de temperatura que oscilan desde 25°C hasta 106.94°C, el punto P_A muestra una relativa estabilidad en sus dimensiones.

Estos hallazgos son esenciales para comprender cómo responden los materiales en el cofre del vehículo a condiciones de envejecimiento simuladas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos resultados se limitan al punto P_A , y el comportamiento de otros puntos en el cofre puede variar. Para una evaluación completa de la resistencia al envejecimiento de todo el sistema, se requieren más pruebas y análisis en puntos adicionales. Por lo tanto, se procede a analizar la holgura en el punto P_B .

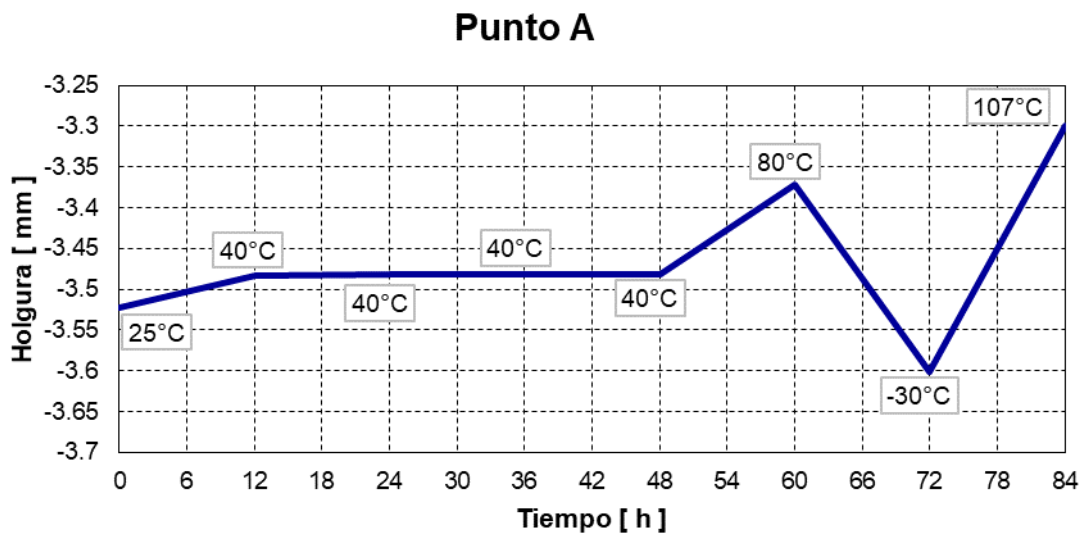


Figura 4.31 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto A

Con respecto al punto P_B , al inicio de la prueba se observa que la holgura existente es de 3.5261 mm, como se muestra en la figura 4.32. Esta holgura se considera como la condición inicial del cofre a partir de la cual se compararán los resultados finales.

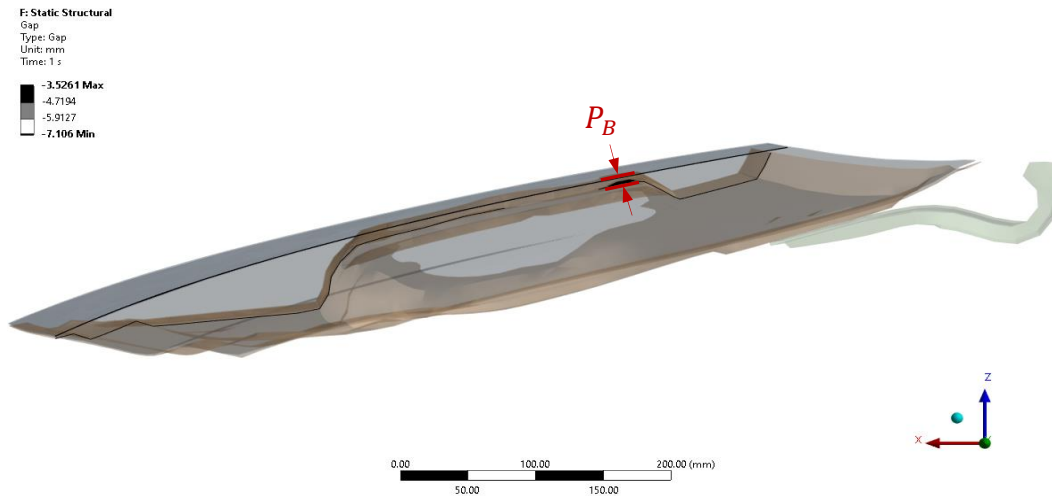


Figura 4.32 Holgura resultante al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

A continuación, después de haber transcurrido 12 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura mínima se ha reducido a 3.4849 mm, tal como se muestra en la figura 4.33. Esto indica que, al aumentar la temperatura del cofre, la holgura disminuye. Es importante recordar que, en este momento, la temperatura de exposición se encuentra cerca de los 40 °C.

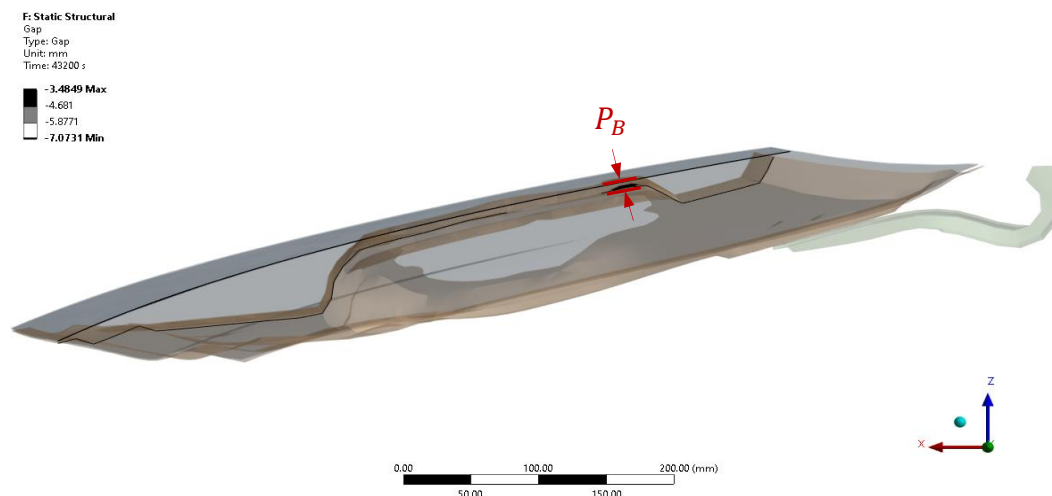


Figura 4.33 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Posteriormente, después de transcurridas 24 horas desde el inicio de la prueba, se observa una ligera reducción en la holgura, la cual se sitúa en 3.4827 mm en comparación con las 12 horas previas, tal como se muestra en la figura 4.34. Además, es importante señalar que, en este momento, la temperatura se encuentra cerca de los 40 °C.

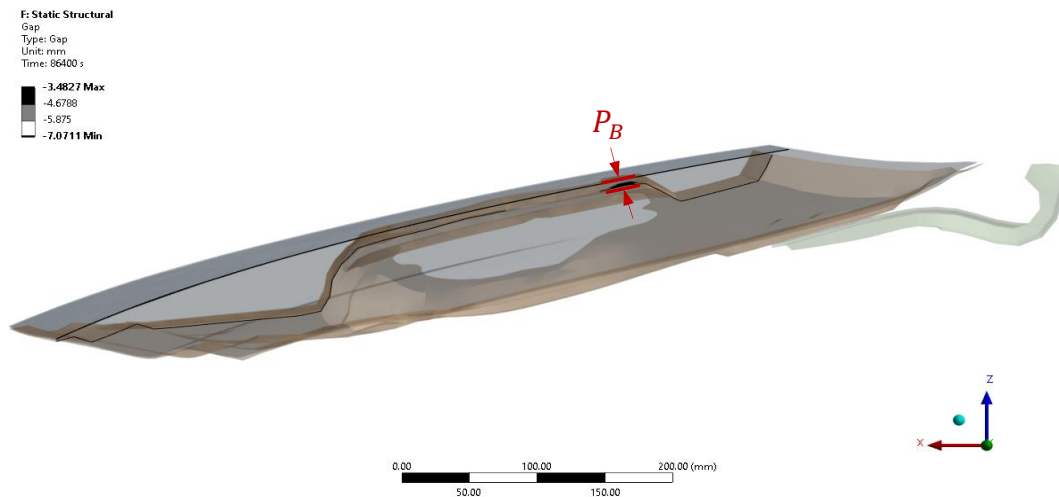


Figura 4.34 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Posteriormente, transcurridas 36 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura se mantiene en 3.4827 mm, como se muestra en la figura 4.35. Esto indica que el cofre ha alcanzado el equilibrio de temperatura durante el primer período de la prueba a 40 °C, y, por lo tanto, la holgura permanece constante en este punto.

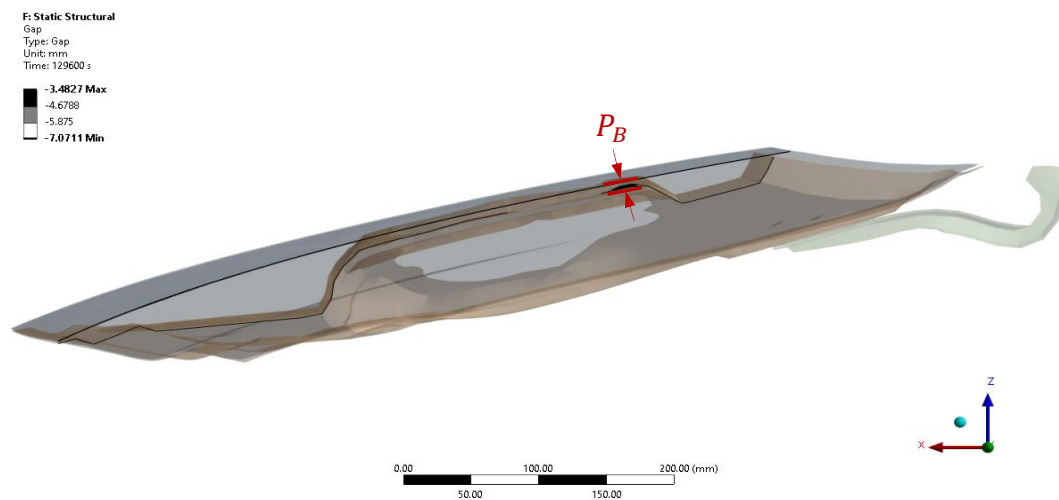


Figura 4.35 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Como resultado, después de haber transcurrido 48 horas desde el inicio de la prueba, se ha alcanzado el final de la primera etapa. De acuerdo con lo anterior, en la figura 4.36 se observa que la holgura se ha mantenido en 3.4827 mm. Además, de esta manera, se llega al final de la primera etapa de temperatura, comenzando así la siguiente etapa.

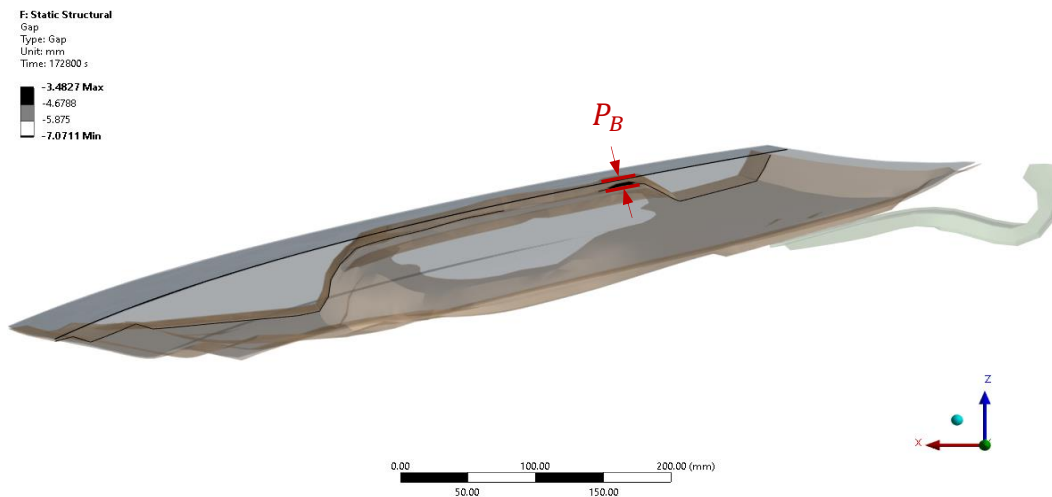


Figura 4.36 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Ahora bien, a partir de las 48 horas transcurridas, se aplica calor con el propósito de elevar la temperatura del cofre a 80 °C. Después de 12 horas de la segunda etapa, es decir, 60 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.37 que la holgura se reduce a 3.3686 mm. Es importante recordar que la temperatura se encontraba muy cerca de la temperatura objetivo de 80 °C. Asimismo, al finalizar este período de tiempo, concluye la segunda etapa de temperatura, dando comienzo a la tercera etapa, que corresponde a la fase de enfriamiento.

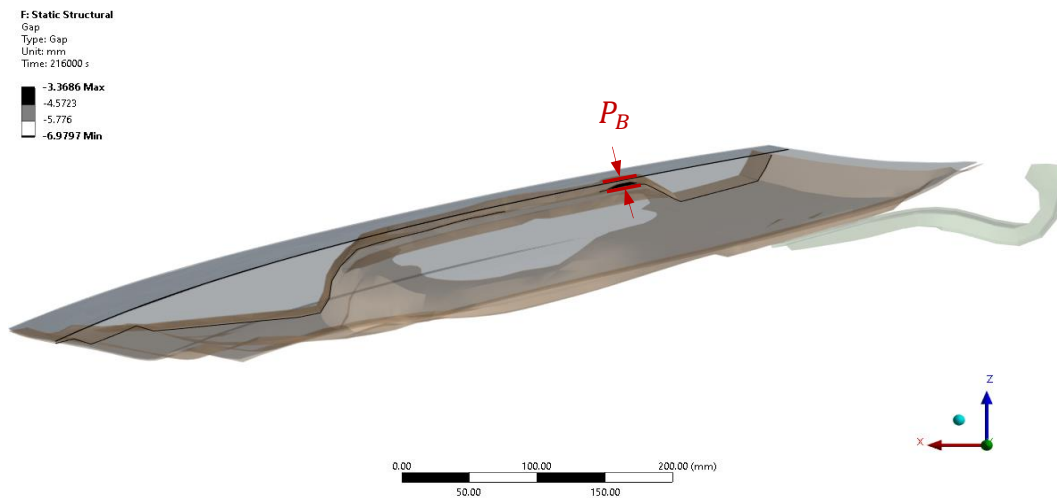


Figura 4.37 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Ahora bien, a partir de las 60 horas, se procede a enfriar el cofre con el propósito de reducir su temperatura a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después de 12 horas de la tercera etapa, es decir, a las 72 horas transcurridas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.38 que la holgura aumenta a 3.6153 mm. De este modo, se puede concluir que, al enfriar las láminas del cofre, la holgura entre ellas aumenta. Asimismo, al finalizar este período de tiempo, se da por concluida la tercera etapa de temperatura, marcando el inicio de la cuarta y última etapa.

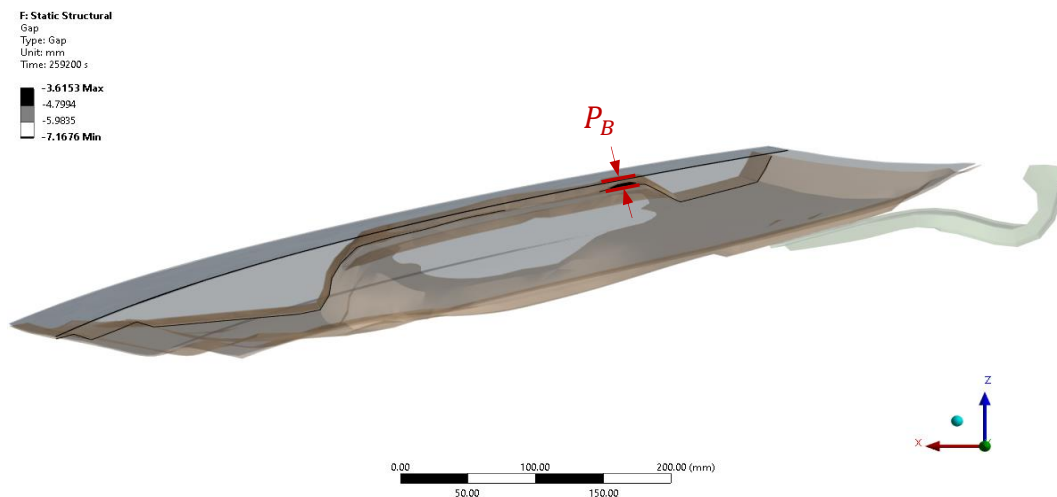


Figura 4.38 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

Finalmente, después de transcurridas 72 horas, se procede a aplicar calor nuevamente con el objetivo de elevar la temperatura del cofre a 107 °C. Tras 12 horas de la cuarta etapa, es decir, a las 84 horas transcurridas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.39 que la holgura se reduce a 3.2916 mm. Según los resultados previos, se esperaba este comportamiento debido al aumento repentino de la temperatura. De esta manera, se concluye la prueba de envejecimiento acelerado en el punto P_B después de transcurridas 84 horas.

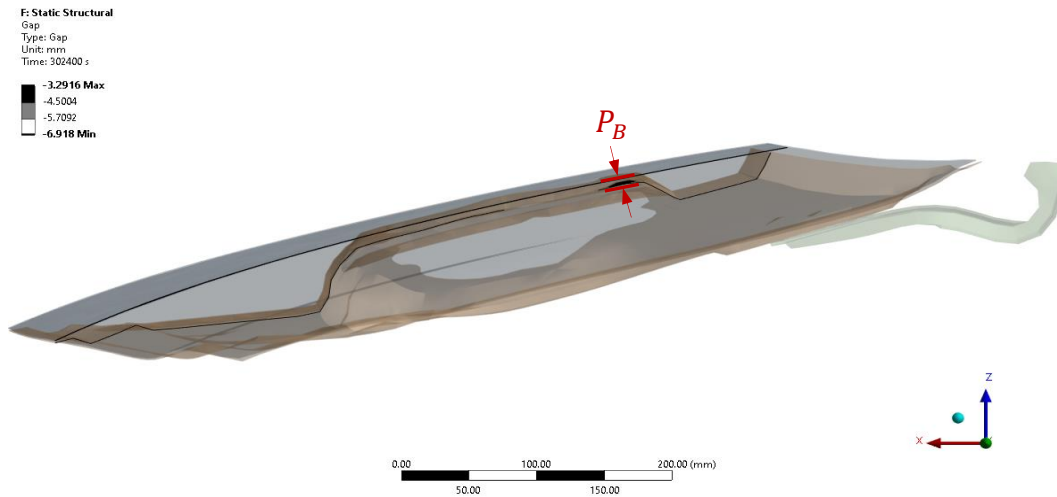


Figura 4.39 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

En cuanto a la holgura que se presenta en el punto P_B del cofre a lo largo de toda la prueba, esta se ilustra en la figura 4.40. En resumen, los resultados de la simulación de la prueba de envejecimiento aplicada en el cofre del Toyota Yaris 2010, con un enfoque específico en el punto de estudio P_B , revelan un proceso de cambio en la dimensión a lo largo del tiempo en respuesta a las variaciones extremas de temperatura.

Desde un valor inicial de 3.5261 mm, se observa una disminución gradual en la dimensión de P_B , alcanzando un valor final de 3.2916 mm. Estos cambios se producen a medida que las temperaturas oscilan desde 25°C hasta un máximo de 106.94°C, con fluctuaciones significativas en un período de 84 horas.

Los resultados sugieren que el punto P_B , ubicado en el cofre del vehículo, experimenta cierta susceptibilidad al envejecimiento en respuesta a las condiciones extremas de temperatura a las que es sometido. Estos hallazgos son valiosos para comprender cómo ciertas áreas de un automóvil pueden verse afectadas por el desgaste y la deformación bajo condiciones adversas, lo que puede orientar futuros esfuerzos de diseño y mejora para garantizar una mayor durabilidad y resistencia en tales circunstancias.

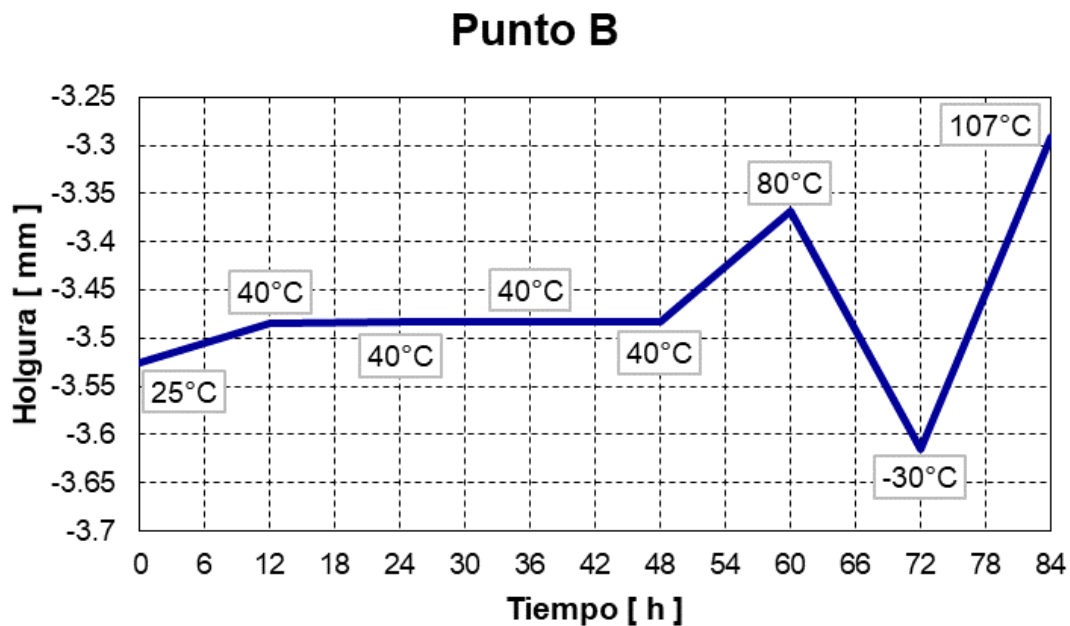


Figura 4.40 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto B

En relación con el punto P_C , al inicio de la prueba se observa una holgura de 2.815 mm, como se ilustra en la figura 4.41. Esta medida se considera como la condición inicial del cofre a partir de la cual se compararán los resultados finales.

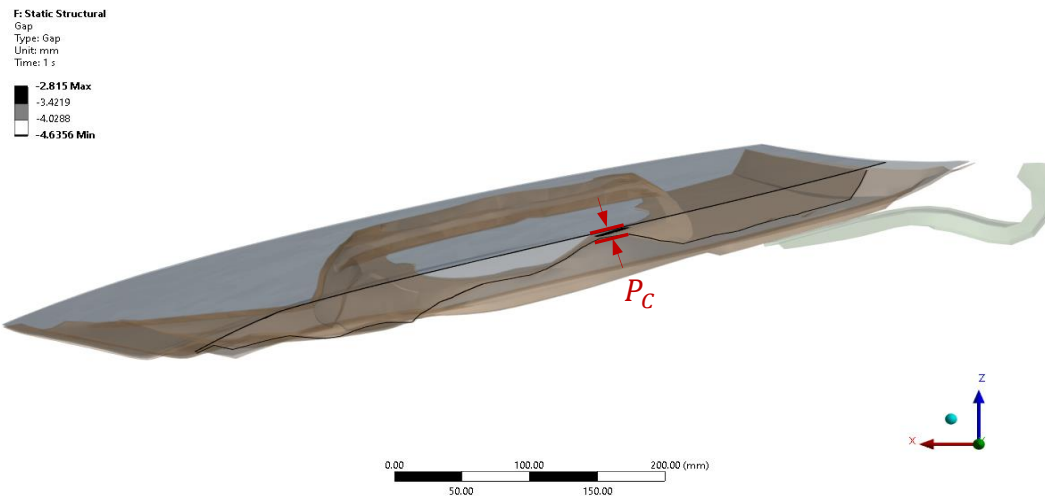


Figura 4.41 Holgura resultante al inicio de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

A continuación, después de transcurrir 12 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura mínima se ha reducido a 2.7972 mm, como se muestra en la figura 4.42. Este hallazgo indica que a medida que la temperatura del cofre aumenta, la holgura disminuye. Es importante recordar que, en este momento, la temperatura de exposición se encuentra cercana a los 40 °C.

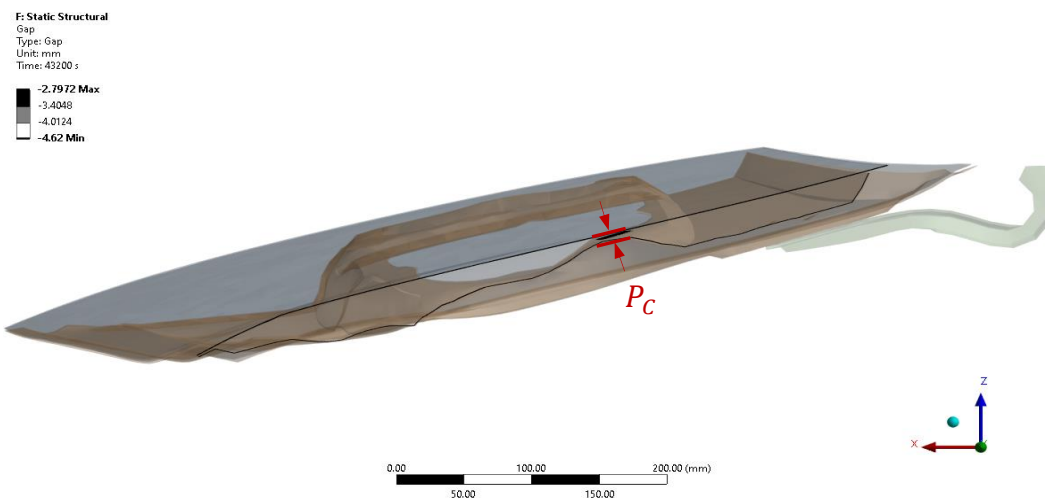


Figura 4.42 Holgura resultante transcurridas 12 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Posteriormente, transcurridas 24 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura se ha reducido ligeramente a 2.7966 mm en comparación con las 12 horas previas, tal como se muestra en la figura 4.43. Es relevante señalar que, en este momento, la temperatura se encuentra aproximadamente a 40 °C.

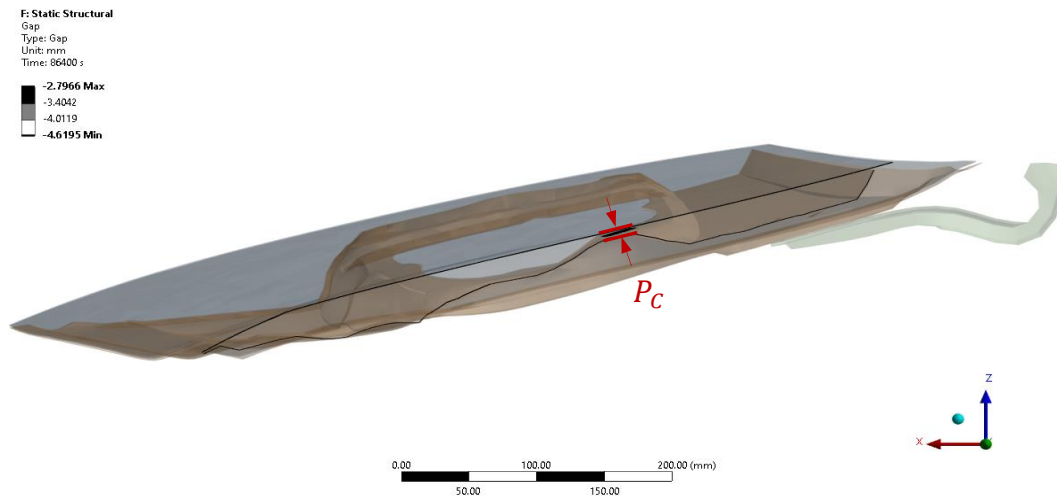


Figura 4.43 Holgura resultante transcurridas 24 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Posteriormente, después de transcurrir 36 horas desde el inicio de la prueba, se observa que la holgura se ha mantenido en 2.7966 mm, como se muestra en la Figura 4.44. Esto indica que el cofre ha alcanzado el equilibrio de temperatura de exposición durante el primer período de la prueba a 40 °C, y por esta razón, la holgura también permanece constante en este punto.

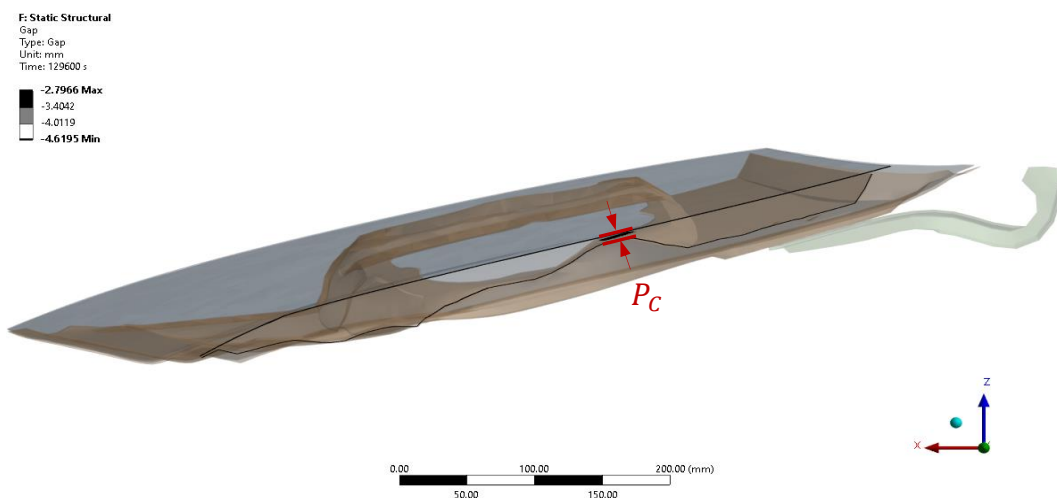


Figura 4.44 Holgura resultante transcurridas 36 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Como resultado, después de 48 horas desde el inicio de la prueba, se ha alcanzado el final de la primera etapa. De acuerdo con lo anterior, en la figura 4.45 se observa que la holgura se ha mantenido en 2.7966 mm. Además, de esta manera se ha concluido la primera etapa de temperatura, dando inicio a la siguiente fase.

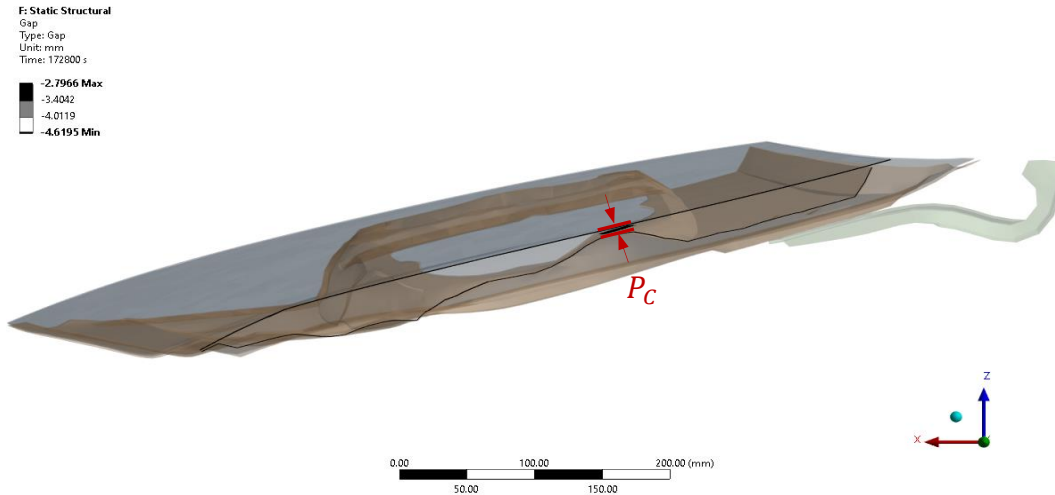


Figura 4.45 Holgura resultante transcurridas 48 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Ahora bien, a partir de las 48 horas transcurridas, se aplica calor con la finalidad de elevar la temperatura del cofre a 80 °C. Después de 12 horas de la segunda etapa, es decir, a las 60 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.46 que la holgura se reduce a 2.7478 mm. Es importante recordar que la temperatura se encontraba muy cerca de la temperatura objetivo de 80 °C. Asimismo, al finalizar este período de tiempo, se concluye la segunda etapa de temperatura, dando inicio a la tercera etapa, que consiste en un proceso de enfriamiento.

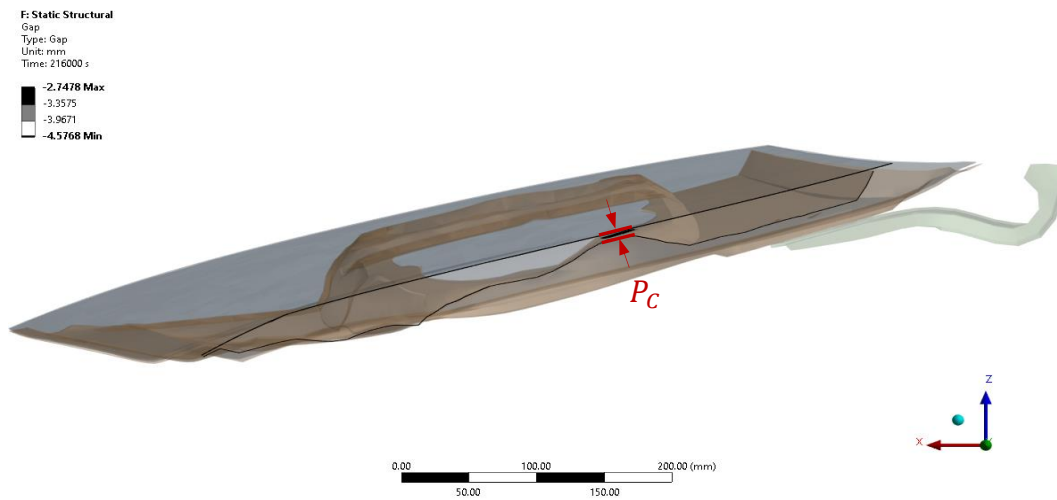


Figura 4.46 Holgura resultante transcurridas 60 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

En este punto, a partir de las 60 horas, se procede a enfriar el cofre con el objetivo de reducir su temperatura a -30°C . Después de 12 horas desde el inicio de esta tercera etapa, es decir, a las 72 horas transcurridas, se observa en la figura 4.47 que la holgura aumenta a 2.8639 mm. Se puede concluir que, al enfriar las láminas del cofre, la holgura entre ellas aumenta. Al finalizar este período de tiempo, se concluye la tercera etapa de temperatura, dando inicio a la cuarta y última etapa.

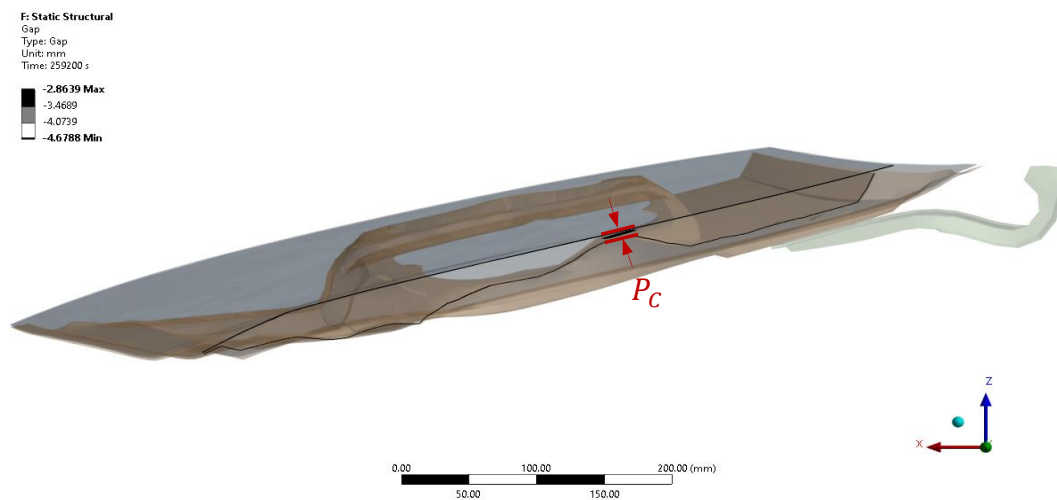


Figura 4.47 Holgura resultante transcurridas 72 horas de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Finalmente, después de transcurridas 72 horas, se vuelve a aplicar calor con el propósito de elevar la temperatura del cofre a 107 °C. Tras 12 horas de la cuarta etapa, es decir, 84 horas desde el inicio de la prueba, se observa en la figura 4.48 que la holgura se reduce a 2.7149 mm. De acuerdo a los resultados previos, este comportamiento era esperado debido al brusco aumento de calor. De este modo, la prueba de envejecimiento acelerado concluye después de transcurridas 84 horas en el punto P_C .

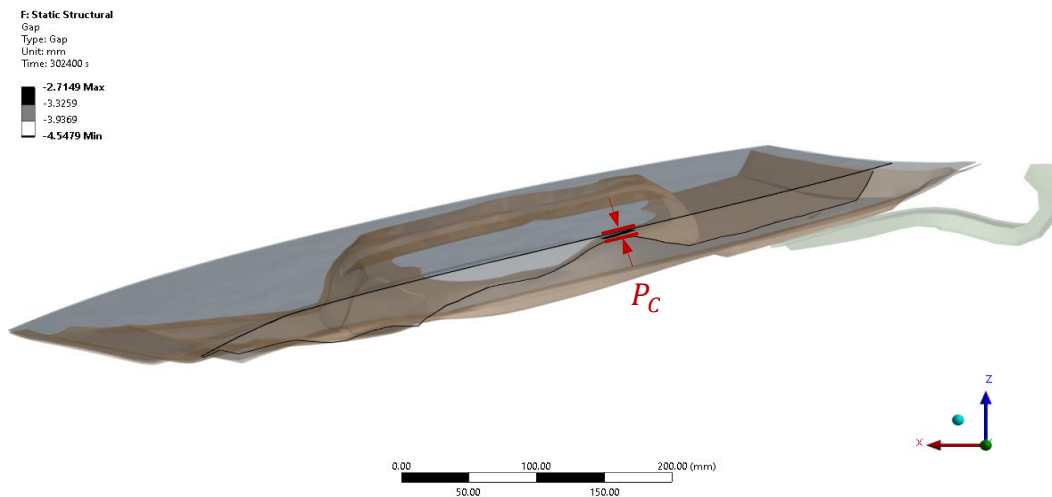


Figura 4.48 Holgura resultante al finalizar la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

En cuanto a la holgura resultante en el punto P_C del cofre durante toda la prueba, se muestra en la figura 4.49. En resumen, los resultados de la simulación de la prueba de envejecimiento realizada en el cofre de un Toyota Yaris 2010, con el enfoque en el punto P_C , indican una respuesta significativa a las variaciones de temperatura a lo largo de la prueba.

Al inicio de la prueba, el punto P_C tiene una dimensión de 2.815 mm, y a medida que transcurren las 84 horas de la prueba, la dimensión fluctúa hasta alcanzar 2.7149 mm al finalizarla. Estas mediciones reflejan una disminución en la dimensión del punto P_C , lo que sugiere que esta ubicación específica en el cofre del vehículo es más susceptible a los efectos del envejecimiento.

Los cambios observados en el punto P_C pueden tener implicaciones importantes para el diseño y la resistencia de los materiales utilizados en esta área del vehículo. Estos resultados subrayan la necesidad de considerar las condiciones extremas de temperatura en la ingeniería de componentes automotrices para garantizar la durabilidad y el rendimiento en situaciones reales de uso.

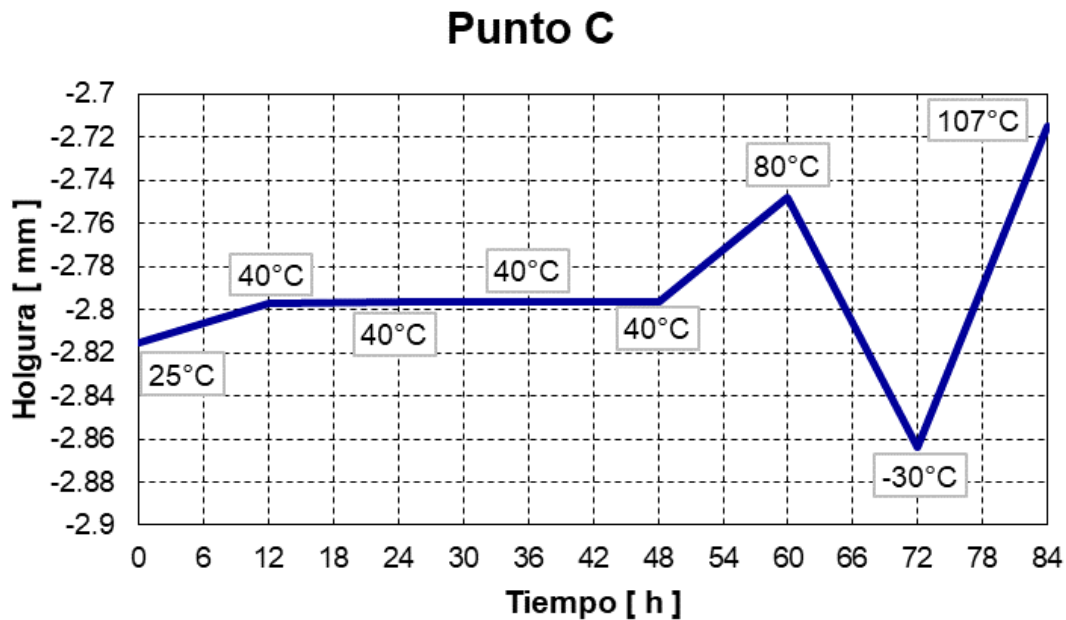


Figura 4.49 Holgura resultante de la prueba de envejecimiento acelerado en punto C

Después de llevar a cabo la simulación de la prueba de envejecimiento en el cofre de un Toyota Yaris 2010, en la que se han seleccionado tres puntos de estudio en diferentes ubicaciones del cofre (P_A , P_B y P_C), se obtienen resultados significativos. Estos resultados revelan información importante sobre la resistencia y deformación del material a lo largo del tiempo bajo condiciones extremas de temperatura.

En cuanto a la variación de la holgura, se registran los siguientes cambios:

En el punto P_A , se observa una ligera disminución en la dimensión, comenzando en 3.523 mm al inicio de la prueba y llegando a 3.2988 mm al finalizarla. A lo largo del proceso, se registran variaciones menores en la dimensión

del punto P_A , lo que indica una relativa estabilidad frente a las fluctuaciones de temperatura, que oscilan desde 25°C hasta 106.94°C.

En el punto P_B , también se observa una disminución en la dimensión, comenzando en 3.5261 mm y finalizando en 3.2916 mm. Al igual que en P_A , se mantiene una estabilidad en las mediciones a pesar de las variaciones en la temperatura, que oscilan entre 25°C y 106.94°C.

Sin embargo, en el punto P_C , se nota una disminución menos significativa en la dimensión, comenzando en 2.815 mm y finalizando en 2.7149 mm. Este punto es menos sensible a las fluctuaciones de temperatura, lo que sugiere que la variación es menor en comparación con los otros puntos de estudio, pero aun así indica una cierta deformación del material.

Los resultados anteriores se ilustran en la tabla 4.1, donde se muestra la holgura al termino de cada periodo de 12 horas y la holgura resultante, ΔH , generada por la diferencia entre la holgura medida al finalizar cada periodo y la holgura medida en el periodo anterior.

Tabla 4.1 Comparativo de holguras resultante vs tiempo para los puntos A, B y C.

Temperatura [°C]	Tiempo [h]	Punto A		Punto B		Punto C	
		Holgura [mm]	ΔH [mm]	Holgura [mm]	ΔH [mm]	Holgura [mm]	ΔH [mm]
25	0	3.523	0	3.5261	0	2.815	0
40	12	3.4838	-0.0392	3.4849	-0.0412	2.7972	-0.0178
40	24	3.4814	-0.0024	3.4827	-0.0022	2.7966	-0.0006
40	36	3.4814	0	3.4827	0	2.7966	0
40	48	3.4814	0	3.4827	0	2.7966	0
80	60	3.3724	-0.109	3.3686	-0.1141	2.7478	-0.0488
-30	72	3.6008	0.2284	3.6153	0.2467	2.8639	0.1161
107	84	3.2988	-0.302	3.2916	-0.3237	2.7149	-0.149

En conclusión, los resultados obtenidos de las holguras en el cofre del Toyota Yaris 2010 revelan variaciones de la holgura resultante notablemente pequeñas que, en última instancia, no parecen impactar significativamente en la funcionalidad del mismo tras someterlo a pruebas de envejecimiento acelerado. Aunque las holguras son pequeñas, la resistencia y durabilidad del cofre parecen mantenerse

intactas, sugiriendo que estas variaciones dimensionales no comprometen la integridad estructural ni la capacidad del cofre para resistir el desgaste a lo largo del tiempo. Este hallazgo respalda la robustez del diseño del Toyota Yaris 2010 y sugiere que, a pesar de las pequeñas variaciones, el rendimiento funcional del cofre permanece efectivo y confiable en condiciones de envejecimiento acelerado.

En última instancia, la comprensión de cómo los materiales y componentes responden a condiciones de envejecimiento es fundamental para garantizar la seguridad y la calidad en la industria automotriz, contribuyendo a la mejora continua de los vehículos y la satisfacción del cliente. En el siguiente capítulo se mencionarán las conclusiones generales de la investigación y se propondrán algunas recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

Este estudio destaca la importancia del análisis numérico en la prueba de envejecimiento acelerado del cofre del Toyota Yaris 2010. La implementación de métodos numéricos avanzados y simulaciones ha permitido comprender su comportamiento térmico y mecánico ante condiciones extremas de temperatura. Los resultados obtenidos garantizan la funcionalidad, integridad estructural y durabilidad del cofre a lo largo del tiempo. En conclusión, las pequeñas variaciones en las holguras no parecen impactar significativamente en la funcionalidad del cofre después de someterlo a pruebas de envejecimiento acelerado, respaldando la robustez del diseño del Toyota Yaris 2010. A pesar de las mínimas variaciones, la resistencia y durabilidad del cofre se mantienen, asegurando un rendimiento funcional efectivo y confiable en condiciones de envejecimiento acelerado.

La utilización de técnicas de análisis numérico ha permitido modelar con precisión la respuesta del material del cofre a los efectos del envejecimiento acelerado por temperaturas, identificando áreas de interés para la integridad estructural. Además, se ha validado la efectividad de las simulaciones al comparar los resultados numéricos con datos experimentales, lo que refuerza la confiabilidad de este enfoque en la optimización del diseño y la evaluación de la vida útil del componente.

En resumen, este estudio ha resaltado la importancia de combinar la experiencia en ingeniería con las herramientas de análisis numérico para abordar desafíos complejos en el diseño y desarrollo de componentes automotrices. El enfoque aplicado en esta investigación no solo es relevante para el caso específico del cofre del Toyota Yaris 2010, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones en el campo del análisis numérico y su aplicación en la mejora

continua de la calidad y la seguridad de los vehículos. Además, se pueden mencionar las siguientes ventajas y desventajas durante el desarrollo del análisis.

Ventajas:

1. **Proporciona una mejor comprensión de los desplazamientos (holguras) causados por la temperatura a lo largo del tiempo:** La investigación permite una comprensión más profunda de cómo los materiales en el cofre del vehículo se degradan bajo condiciones de envejecimiento acelerado, lo que puede llevar a una mejora en el diseño y la selección de materiales más resistentes.

2. **Permite el ahorro de tiempo y recursos:** La prueba de envejecimiento acelerado mediante simulaciones numéricas puede reducir el consumo de tiempo y recursos en comparación con las pruebas experimentales a largo plazo, lo que posibilita un análisis más rápido y eficiente de la vida útil de los materiales.

3. **Facilita el diseño y la optimización:** La capacidad de anticipar cómo los materiales envejecen en diferentes condiciones puede llevar a un diseño más optimizado del cofre del vehículo y sus componentes, lo que a su vez podría aumentar la durabilidad y reducir los costos de mantenimiento.

4. **Explora escenarios extremos:** A través de simulaciones numéricas, es posible explorar una amplia gama de escenarios climáticos y de envejecimiento sin limitaciones prácticas, lo que permite identificar posibles problemas y soluciones en condiciones extremas.

5. **Ofrece flexibilidad y adaptabilidad:** Los modelos numéricos pueden ser ajustados y modificados con relativa facilidad para tener en cuenta nuevos datos, avances en la tecnología de materiales y otros factores cambiantes.

Desventajas:

1. **Simplificación del modelo:** En las simulaciones numéricas, a menudo se requiere simplificar el modelo y hacer suposiciones para que sean viables, lo que

podría afectar la precisión y la aplicabilidad de los resultados en comparación con los resultados experimentales.

2. **Validación compleja:** La validación de los resultados numéricos es necesaria para asegurar la confiabilidad de la investigación. Sin embargo, puede ser un desafío debido a la falta de datos experimentales en condiciones de envejecimiento acelerado.

3. **Requerimientos de cómputo de alto rendimiento:** Las simulaciones numéricas que involucran múltiples fenómenos físicos y requieren alta precisión pueden necesitar equipos de cómputo de alto rendimiento, lo que podría aumentar los costos asociados.

4. **Dependencia de parámetros:** La precisión de los resultados numéricos depende en gran medida de la precisión de los parámetros de entrada, y definir correctamente estos parámetros puede ser un desafío.

5. **Limitaciones en escenarios impredecibles:** A pesar de su capacidad para explorar una amplia gama de situaciones, los modelos numéricos pueden no ser adecuados para escenarios completamente impredecibles o situaciones extremas no anticipadas.

En última instancia, la investigación en análisis numérico de pruebas de envejecimiento acelerado por temperatura ofrece una serie de ventajas significativas al permitir una evaluación más eficiente de la degradación de materiales en el contexto automotriz. Sin embargo, es importante reconocer y abordar las desventajas asociadas para asegurar que los resultados sean confiables y aplicables en la práctica.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

A partir del análisis presentado, se pueden considerar trabajos futuros que permitan comprender el comportamiento de otros materiales cuando se someten a pruebas de envejecimiento acelerado. A continuación, se enumeran posibles

trabajos futuros que podrían derivarse de la investigación realizada en la presente tesis:

1. **Validación experimental:** Para fortalecer la confiabilidad de los resultados numéricos, sería valioso llevar a cabo pruebas experimentales en un entorno controlado utilizando un vehículo Toyota Yaris 2010 o un modelo similar. Comparar los resultados obtenidos en la prueba de envejecimiento acelerado con los datos reales recopilados podría proporcionar una validación para el modelo numérico.

2. **Consideración de holgura final a temperatura ambiente al finalizar la prueba:** Considerar la holgura al dejar enfriar la pieza después de concluir la prueba de envejecimiento con la finalidad de poder observar cualquier deformación permanente en el caso de estudio, es decir, de la temperatura final de 107 °C a la temperatura ambiente de 25 °C.

3. **Optimización de parámetros de envejecimiento acelerado:** Investigar y definir con mayor precisión los parámetros de envejecimiento acelerado permitiría ajustar el modelo numérico para reflejar de manera más realista las condiciones de envejecimiento a largo plazo. Esto podría implicar la identificación de rangos de temperatura específicos, ciclos de calentamiento-enfriamiento y duración de la exposición.

4. **Inclusión de diferentes escenarios climáticos:** El análisis numérico podría expandirse para incluir diferentes escenarios climáticos que representen diversas regiones geográficas. Esto proporcionaría información valiosa sobre cómo el envejecimiento del material del cofre del vehículo varía en condiciones climáticas extremas y su impacto en la vida útil.

5. **Modelado Multifísico:** Considerar el acoplamiento del análisis numérico con modelos multifísicos que tengan en cuenta no solo la transferencia de calor, sino también la propagación de grietas. Esto permitiría una comprensión más profunda de cómo los cambios en la estructura interna afectan la integridad estructural del material.

6. Validación con modelos actuales de vehículos: Además del Toyota Yaris 2010, realizar análisis numéricos similares en modelos más recientes de vehículos Toyota podría proporcionar información actualizada sobre cómo los avances en diseño y materiales han influido en la resistencia al envejecimiento.

7. Estudio de estrategias de mitigación: Investigar y analizar estrategias de mitigación para reducir el impacto del envejecimiento en el cofre del vehículo podría ser una extensión útil. Esto podría incluir el diseño de materiales más resistentes al envejecimiento o el desarrollo de recubrimientos protectores.

8. Análisis económico y ambiental: Evaluar el costo económico y el impacto ambiental de la degradación del material en el cofre del vehículo a lo largo de su ciclo de vida podría proporcionar información relevante para los fabricantes y los propietarios de vehículos.

9. Análisis de fallas: Realizar un análisis detallado de las posibles fallas que podrían surgir como resultado del envejecimiento acelerado. Esto podría incluir la identificación de puntos críticos de deformación, grietas o debilitamiento del material y su impacto en la seguridad y funcionalidad del vehículo.

10. Colaboración con la industria: Establecer colaboraciones con fabricantes de vehículos y empresas relacionadas podría facilitar el acceso a datos y recursos adicionales, así como brindar oportunidades para implementar los resultados de la investigación en la práctica.

Los trabajos futuros propuestos se basan en los resultados y procedimientos realizados en la presente tesis, con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre las pruebas de envejecimiento acelerado aplicadas en la industria automotriz.

Referencias

- [1] «Autoblog,» [En línea]. Available: https://www.autoblog.com/es-us/buy/2010-Toyota-Yaris-Base__4dr_Sedan/. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [2] J. P. L. Remy, *Temperature-Fatigue Interaction*, Oxford, UK: ELSEVIER SCIENCE Ltd, 2002.
- [3] «Atria Inovation,» 17 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.atriainnovation.com/guia-de-fallos-por-envejecimiento-acelerado/#Temperatura>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [4] W. T. T. Services, «Weiss Technik,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://weiss-technik.mx/wp-content/uploads/Weiss-Auto-Brochure-June-2016.pdf>. [Último acceso: 2023 Junio 18].
- [5] «ANSYS,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/applications>. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [6] «Mercado libre,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-589902285-cofre-toyota-yaris-2007-2008-2009-2010-2011-2012-2013-_JM#is_advertising=true&position=1&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=267fd613-3a70-4527-b004-e2863964acf6&is_advertising=true&ad_domain=VQCATCO. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [7] «Autoblog,» [En línea]. Available: https://www.autoblog.com/es-us/buy/2010-Toyota-Yaris-Base__4dr_Sedan/. [Último acceso: 25 Mayo 2023].
- [8] O. Leonidivna Naidiuk y P. Bolívar Torres, «Problema 1: Difusión de calor,» de *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys*, Quito, Ecuador, Universidad Politécnica Salesiana, 2018, pp. 23-31.

-
- [9] M. Teranishi, C.-Y. Chen, T.-F. M. Chang, T. Konishi, D. Yamane, K. Machida, K. Masu y M. Sone, «Enhancement in structure stability of gold micro-cantilever by constrained fixed-end in MEMS devices,» *Microelectronic Engineering*, 2017.
 - [10] J. S. H. L. y. L. Z. Y. Zhang, «Modeling and Measurement of Thermal–Mechanical-Stress-Creep Effect for RF MEMS Switch Up to 200 °C,» *Micromachines*, vol. vol. 13 , nº 166, 2022.
 - [11] L. M. Klyatis, «The Purpose of Accelerated Testing (AT),» de *Accelerated reliability and durability testing technology*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2009, p. 1.
 - [12] L. M. Klyatis, «The Purpose of Accelerated Testing (AT),» de *Accelerated reliability and durability testing technology*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2009, p. 3.
 - [13] «Wikipedia,» 5 Junio 2022. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora. [Último acceso: 18 Junio 2023].
 - [14] «FDM Enviroment Makers,» 28 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.dellamarca.it/es/prueba-de-envejecimiento-acelerado-con-camara-climatica/>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
 - [15] «Electronic design,» Ingeniería de evaluación, 1 Mayo 2000. [En línea]. Available: <https://www.electronicdesign.com/home/article/21200480/using-accelerated-aging-to-evaluate-automobile-components>. [Último acceso: 27 Junio 2023].
 - [16] «Infinitia Industrial Consulting,» [En línea]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/envejecimiento-acelerado-de-materiales/#:~:text=Las%20pruebas%20de%20envejecimiento%20acelerad>

o%20se%20utilizan%20para%20medir%20la,las%20propiedades%20de%20las%20muestras.. [Último acceso: 28 Junio 2023].

- [17] M. Flores Baeza, «“Diseño de equipo para el desarrollo de envejecimiento acelerado en materiales metálicos”,» de *Envejecimiento de materiales*, PACHUCA, HIDALGO, MÉXICO, 2021.
- [18] «Atria Innovation,» Ingeniería Forense, 17 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.atriainnovation.com/guia-de-fallos-por-envejecimiento-acelerado/#Temperatura>. [Último acceso: 25 Junio 2023].
- [19] F. P. Incropera y D. P. de Witt, «Capítulo 1: Introducción,» de *Fundamentos de transferencia de calor*, Mexico, Prentice Hall, 1999, pp. 1-12.
- [20] J. P. Holman, «Introducción,» de *Transferencia de calor*, Ciudad de México, McGRAW HILL BOOK COMPANY, INC, 1986, pp. 17-30.
- [21] Y. A. ÇENGEL y A. J. GHAJAR, «INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS,» de *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones*, Ciudad de Mexico, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011, pp. 1-30.
- [22] J. P. Holman, «Conducción en Estado transitorio,» de *Transferencia de calor*, Ciudad de México, McGRAW HILL BOOK COMPANY, INC, 1986, pp. 129-179.
- [23] Y. A. ÇENGEL y A. J. GHAJAR, «CONDUCCIÓN DE CALOR EN RÉGIMEN TRANSITORIO,» de *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones*, Ciudad de México, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011, pp. 225-277.

-
- [24] . M. Wilches Zuñiga, L. F. Ruiz Monsalve y M. Hernández Valdivieso , «Análisis termomecánico (TMA),» de *Bioingeniería Tomo VI*, Antioquia, Universidad de Antioquia, 1985, p. 265.
- [25] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Materiales,» de *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY*, Ciudad de México, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2008, p. 39.
- [26] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Análisis de carga y esfuerzo,» de *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY*, Ciudad de México, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2008, p. 111.
- [27] F. . P. Beer, E. R. Johnston, Jr., J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, «Esfuerzo y deformación. Carga axial,» de *MECÁNICA DE MATERIALES*, Ciudad de México, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2013, pp. 64-72.
- [28] «Center for Collision Safety and Analysis,» Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.ccsa.gmu.edu/models/2010-toyota-yaris/>. [Último acceso: 3 Mayo 2023].
- [29] «LS-DYNA,» [En línea]. Available: <https://lsdyna.ansys.com/>. [Último acceso: 22 Julio 2023].
- [30] «FEA TIPS,» [En línea]. Available: <https://featips.com/2021/02/21/solid-vs-shell-vs-solid-shell-elements/>. [Último acceso: 18 Julio 2023].
- [31] J. A. ISLAS MASCAREÑAS, *Estudio de aleación de aluminio reforzada con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz*, Nuevo León: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2013.