

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Determinación experimental de
RTC en función del envejecimiento
y de la presión para distintos TIM's



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Adrián Garcíandía Rosa

Director: Antonio Rodríguez García

Codirectora: Miren Gurutze Pérez Artieda

Pamplona, noviembre de 2018

Summary

The investigation group of Thermic and Fluids Engineering of the Public University of Navarra is carrying out a research of the electric energy generation by the exploitation of the heat contained in the gases that are discharged to the atmosphere through the industrial chimneys. This electric energy is obtained thanks to thermoelectric generators. In this investigation field, an important task consists on reducing as much as possible the thermal resistance of the contact surface in order to achieve an optimal heat exchange. The so-called thermic interface materials are used with the aim of enhance the contact between surfaces. These materials are exposed to high temperatures during long time periods, suffering due to that thermic stress. As a result, as time passes by, the materials are degraded offering a worse performance. This phenomenon is known as thermal aging.

This report includes an experimental study in which some thermic interface materials are subjected to different situations which occur in the reality of the heat exploitation comparing in this way their results. Using a test workbench which permits measuring thermal resistances, a series of tests is carried out. The thermal contact resistance surface is influenced by the thermal aging of the materials as well as by the pressure applied in the contact union. These two aspects are studied through the series of tests.

Keywords

- Thermal interface materials
- Thermal contact resistance
- Thermal aging

Resumen

Una línea en la que está trabajando el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Pública de Navarra, es la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del calor de los gases expulsados a la atmósfera en chimeneas industriales utilizando generadores termoeléctricos. En este campo, el contacto entre superficies es de vital importancia para reducir en lo posible la resistencia térmica de contacto y conseguir una transmisión de calor óptima. Para mejorar el contacto entre superficies se utilizan los llamados materiales de interfaz térmica. Estos materiales sufren estrés térmico debido a que trabajan a altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, lo que provoca que al cabo del tiempo se degraden y ofrezcan peores prestaciones. Este fenómeno se conoce como envejecimiento térmico.

Este trabajo consiste en realizar un estudio experimental en el que se comparan varios materiales de interfaz térmica recreando las distintas situaciones que se dan en la aplicación real de aprovechamiento del calor residual en chimeneas industriales. Por medio de un banco de ensayos que permite medir resistencias térmicas, se realizan una serie de ensayos en los que, por un lado, se estudia la influencia del envejecimiento de los materiales en la resistencia térmica de contacto de los mismos y, por otro lado, la influencia de la presión aplicada sobre la unión en la resistencia térmica de contacto.

Palabras clave

- Material de interfaz térmica
- Resistencia térmica de contacto
- Envejecimiento térmico

Índice general

Índice general.....	i
Índice de figuras.....	iii
Índice de tablas.....	v
Nomenclatura.....	vii
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Estado del arte.....	5
3.1. Fundamentos de la generación termoeléctrica.....	5
3.1.1. Efectos Seebeck y Peltier.....	6
3.1.2. Funcionamiento del módulo termoeléctrico.....	7
3.2. Transmisión de calor por conducción a través de superficies en contacto.....	9
3.2.1. Resistencia térmica de contacto.....	9
3.2.2. Materiales de interfaz térmica (TIM's).....	13
4. Descripción del equipo utilizado.....	17
4.1. Elementos estructurales.....	17
4.2. Elementos del diseño térmico.....	18
4.3. Elementos para la obtención datos y el control del equipo.....	21
4.3.1. Obtención de datos.....	21
4.3.2. Control del equipo.....	21
5. Metodología de los ensayos.....	23
5.1. Cálculo de la resistencia térmica global de la muestra.....	23
5.1.1. Incertidumbres asociadas.....	25
5.2. Materiales de interfaz térmica a ensayar.....	30
5.3. RTC en función del envejecimiento.....	34
5.3.1. Tipos de muestras y resistencias térmicas involucradas.....	35
5.3.2. Parámetros involucrados.....	38
5.3.3. Pasos realizados en cada ensayo.....	39
5.4. RTC en función de la presión.....	42
5.4.1. Tipos de muestras y resistencias térmicas involucradas.....	42
5.4.2. Pasos realizados en cada ensayo.....	47
5.5. Tratamiento de datos.....	50
6. Resultados experimentales.....	55
6.1. Resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento.....	55

6.1.1. Envejecimiento a 180°C	57
6.1.2. Envejecimiento a 60°C	61
6.2. Resultados obtenidos en los ensayos de resistencia térmica en función de la presión aplicada	65
6.2.1. Resultados obtenidos con estructura tipo A	66
6.2.2. Resultados obtenidos con estructura tipo B.....	69
6.2.3. Ensayos para comprobar la repetibilidad del equipo utilizado.....	74
7. Conclusiones.....	77
8. Bibliografía.....	81

Índice de figuras

Figura 1.1: Chimenea módulo y disipador	2
Figura 3.1: Efecto Seebeck.....	6
Figura 3.2: Efecto Peltier.....	7
Figura 3.3: Esquema de un generador termoeléctrico	8
Figura 3.4: Esquema de la sección transversal del contacto entre dos superficies por las que pasa un flujo de calor	9
Figura 3.5: Esquema explicativo de la ley de Fourier de la conducción en forma unidimensional	10
Figura 3.6: Gráfico temperatura-posición	12
Figura 4.1: Estructura del banco de ensayos	18
Figura 4.2: Diseño en CAD del banco de ensayos	20
Figura 5.1: Esquema de las rampas de temperaturas que proporciona la situación de las sondas en las probetas	24
Figura 5.2: Imagen de pasta térmica Artic Silver 5.....	31
Figura 5.3: A la izquierda, láminas de indio en su embalaje original. A la derecha, lámina de indio	32
Figura 5.4: Etiqueta del producto	32
Figura 5.5: Lámina de grafito en formato DIN A4.....	33
Figura 5.6: Etiqueta del producto	33
Figura 5.7: Esquema ilustrativo de los dos entornos en los que se sitúan los TIM's.....	35
Figura 5.8: Esquema ilustrativo de las resistencias involucradas en los sándwiches ACERO-TIM-CERÁMICA	36
Figura 5.9: Esquema ilustrativo de las resistencias involucradas en los sándwiches CERÁMICA-TIM-ALUMINIO	37
Figura 5.10: Ejemplo de sándwich ACERO-GRAFITO-CERÁMICA.....	39
Figura 5.11: Probeta superior en posición ``home``	40
Figura 5.12: Probeta superior en contacto con la muestra sin ejercer presión	40
Figura 5.13: Esquema de la estructura de las muestras tipo A	43
Figura 5.14: Esquema de las resistencias involucradas en las muestras tipo A	44
Figura 5.15: Esquema de la estructura de las muestras tipo B	45
Figura 5.16: Esquema de las resistencias involucradas en las muestras tipo B.....	46
Figura 5.17: Ejemplo de muestra con estructura tipo A	47
Figura 5.18: Ejemplo de muestra con estructura tipo B	47
Figura 5.19: Probeta superior en posición ``home``	48
Figura 5.20: Probeta superior en contacto con la muestra sin ejercer presión	48

Figura 5.21: Esquema de las dimensiones de la probeta	51
Figura 5.22: Esquema de las dimensiones requeridas para el cálculo de R_G	52
Figura 5.23: Esquema del juego entre la sonda y el agujero de la probeta	52
Figura 6.1: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 180°C de las muestras X_AC_C	58
Figura 6.2: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 180°C de las muestras X_AL_C	60
Figura 6.3: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 60°C de las muestras X_AC_F	62
Figura 6.4: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 60°C de las muestras X_AL_F	64
Figura 6.5: Gráfica comparativa de la R_t en función de la presión aplicada de las muestras A_AC_X.....	68
Figura 6.6: Gráfica comparativa de la RTC en función de la presión aplicada de las muestras B_AC_X.....	70
Figura 6.7: Gráfica comparativa de la RTC en función de la presión aplicada de las muestras B_AL_X.....	73
Figura 6.8: Gráfica comparativa de los ensayos de repetibilidad realizados con estructura tipo A	75

Índice de tablas

Tabla 5.1: Parámetros con sus respectivos coeficientes de sensibilidad e incertidumbres	28
Tabla 5.2: Parámetros con sus respectivos coeficientes de sensibilidad e incertidumbres	29
Tabla 5.3: Incertidumbres asociadas a la medición de temperatura de las distintas sondas Pt-100	50
Tabla 5.4: Dimensiones de la probeta de acero inferior	51
Tabla 6.1: Nombre de las muestras ensayadas en los ensayos de R_t - Envejecimiento..	56
Tabla 6.2: Resultados obtenidos para la muestra G_AC_C	57
Tabla 6.3: Resultados obtenidos para la muestra I_AC_C	57
Tabla 6.4: Resultados obtenidos para la muestra P_AC_C	57
Tabla 6.5: Resultados obtenidos para la muestra G_AL_C	59
Tabla 6.6: Resultados obtenidos para la muestra I_AL_C	59
Tabla 6.7: Resultados obtenidos para la muestra P_AL_C	59
Tabla 6.8: Resultados obtenidos para la muestra G_AC_F	61
Tabla 6.9: Resultados obtenidos para la muestra I_AC_F	61
Tabla 6.10: Resultados obtenidos para la muestra P_AC_F	61
Tabla 6.11: Resultados obtenidos para la muestra G_AL_F	63
Tabla 6.12: Resultados obtenidos para la muestra I_AL_F	63
Tabla 6.13: Resultados obtenidos para la muestra P_AL_F	63
Tabla 6.14: Nomenclatura de las muestras ensayadas en los ensayos de R_t -Presión	66
Tabla 6.15: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_G	67
Tabla 6.16: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_I	67
Tabla 6.17: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_P	67
Tabla 6.18: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_G	69
Tabla 6.19: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_I	70
Tabla 6.20: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_P	70
Tabla 6.21: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_G	72
Tabla 6.22: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_I	72
Tabla 6.23: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_I	72
Tabla 6.24: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A1	74
Tabla 6.25: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A2	75
Tabla 6.26: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A3	75

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área	m ²
D	Diámetro	m
F	Fuerza	N
G	Grafito	
I	Indio	
k	Conductividad térmica	W/m·K
L	Longitud	m
M	Masa	kg
MTE	Módulo termoelectrónico	
P	Presión	Pa
P	Pasta térmica	
\dot{Q}	Potencia calorífica o flujo de calor	W
R _c	Resistencia térmica de contacto	°C/W
R _c	Resistencia térmica de contacto por unidad de área	°C·m ² /W
R _G	Resistencia térmica global	°C·m ² /W
R _h	Resistencia térmica de convección	°C/W
R _k	Resistencia térmica de conducción	°C/W
RTC	Resistencia térmica de contacto	°C/W
TIM	Material de interfaz térmica	
T	Temperatura	°C
ΔT	Diferencia de temperaturas	°C

1. Introducción

A lo largo de la historia, las culturas y sociedades que la humanidad abarca van cambiando y evolucionando. Cada vez se tiene mayor conocimiento de la naturaleza que rodea al ser humano y de la del propio ser humano, gracias al estudio científico. Además, con el paso del tiempo, las necesidades de las personas y sociedades cambian de forma significativa. Ahí entra en juego la ingeniería, cuyo papel es intentar aplicar el conocimiento científico y aprovechar los recursos naturales de la mejor manera posible para satisfacer dichas necesidades.

Un concepto muy importante en el mundo de la ingeniería en particular y en el mundo en general, es la energía. La importancia de la gestión de la energía es vital para el ser humano ya que, la tendencia histórica del consumo energético mundial es alcista en contraste con la cantidad de combustibles fósiles (principal fuente de energía en la actualidad), que es finita y cada vez es menor. Así pues, es notoria la necesidad de desarrollar alternativas en la producción de energía con la idea de llegar a un sistema más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Desde mediados del siglo XX el interés por sustituir el consumo de combustibles fósiles como medio de producción de energía está creciendo y se han ido desarrollando lo que se conoce como energías alternativas.

Una línea en la que está trabajando el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Pública de Navarra es la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del calor de los gases expulsados a la atmósfera en chimeneas industriales. La generación de energía se consigue utilizando módulos termoeléctricos, dispositivos basados en el efecto Seebeck, los cuales generan potencia eléctrica si entre sus caras existe una diferencia de temperaturas.

La idea es aprovechar la diferencia de temperaturas entre la cara exterior de la chimenea (foco caliente) y el entorno (foco frío) para generar electricidad situando módulos termoeléctricos entre ambos focos como se muestra en la Figura 1.1.

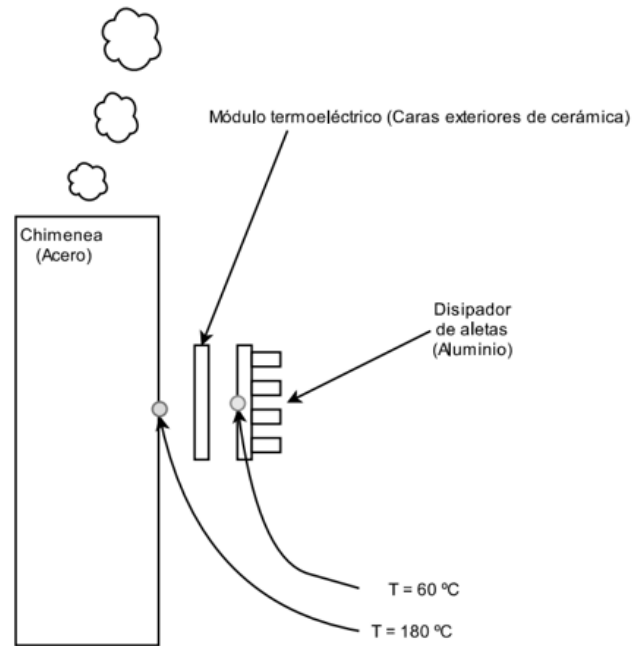


Figura 1.1: Chimenea, módulo y disipador.

Para conseguir la máxima eficiencia en los módulos termoeléctricos, las temperaturas de sus caras deben ser lo más próximas posible a las de los focos frío y caliente. Ahí entra en juego un parámetro conocido como resistencia térmica de contacto (RTC) por el cual se da un salto de temperaturas entre dos superficies en contacto por las que circula un flujo de calor. Para reducir la RTC entre las caras chimenea-módulo y módulo-disipador se interponen entre ellas lo que se conoce como TIM's o materiales de interfaz térmica. Con estos materiales se consigue mejorar la conducción de calor entre las superficies disminuyendo el salto térmico entre ellas. De esta forma las temperaturas de las caras del generador termoeléctrico son más próximas a las de los focos, mejorando la eficiencia del generador.

En este trabajo se realiza un estudio, mediante una serie de ensayos, de la resistencia térmica de contacto de diferentes materiales de interfaz térmica como son grafito, indio y pasta térmica. Se realizan dos tipos de ensayos para cada material.

Por un lado, se quiere evaluar y comparar el comportamiento de la RTC de los distintos materiales al ser sometidos a ciclos de envejecimiento. Por otro lado, se evalúa la RTC de los mismos materiales en función de la presión ejercida sobre la unión.

2. Objetivos

Este trabajo fin de grado (TFG) se realiza dentro del grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos (ITF) del departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales de la Universidad Pública de Navarra.

Los objetivos que abarca el trabajo son los siguientes:

1. Revisión bibliográfica acerca de temas relacionados con la generación termoeléctrica, la resistencia térmica de contacto y el estudio de distintos materiales de interfaz térmica y su comportamiento frente al envejecimiento.
2. Realización de un estudio de la incertidumbre de la medida que proporciona el equipo utilizado en este trabajo para la realización de los ensayos.
3. Desarrollo del diseño de las diferentes configuraciones de las muestras que se van a ensayar para simular de la mejor manera el comportamiento de los TIM's en las distintas situaciones que se dan en la aplicación real.
4. Realización de un estudio empírico que consiste en evaluar y comparar la resistencia térmica de contacto (RTC) de diferentes materiales de interfaz térmica (TIM's) en diferentes condiciones de trabajo asociadas a la generación termoeléctrica en chimeneas industriales. Para ello se realizan dos tipos de ensayos:
 - RTC en función del envejecimiento de los TIM's: Se trata someter a los materiales a periodos largos de estrés térmico a diferentes temperaturas e ir evaluando el comportamiento de estos a lo largo del tiempo.
 - RTC en función de la presión de trabajo de los TIM's: Consiste en la realización de una serie de ensayos en los que se va aumentando la presión de contacto de las uniones para ver cómo varía la resistencia térmica de contacto en función de la presión aplicada y de las diferentes configuraciones que se dan en la aplicación real.

3. Estado del arte

En el primer apartado del presente capítulo se realiza una introducción al estudio de la termoelectricidad, incluyendo una breve explicación de los fenómenos más importantes que se han descubierto y en los que se basan los generadores termoeléctricos.

El segundo apartado hace referencia a la transmisión de calor a través de superficies en contacto. Se define lo que se conoce como resistencia térmica de contacto (RTC) y cómo se puede reducir incorporando los denominados materiales de interfaz térmica (TIM's).

Finalmente, se abarca el tema de los materiales de interfaz térmica. Se habla de la importancia que tienen en la gestión térmica y se presenta una clasificación en función de su composición y características.

3.1. Fundamentos de la generación termoeléctrica

La termoelectricidad es una rama de la termodinámica que estudia los fenómenos que relacionan dos formas de energía como son el calor y la electricidad. La primera relación que se descubrió fue el efecto Joule en el siglo XIX, cuando se observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor.

Otros efectos descubiertos que relacionan calor y electricidad son los denominados Seebeck, Peltier y Thomson. Todos ellos están relacionados con la diferencia energética entre los electrones libres de materiales conductores. Cuando dos materiales conductores diferentes se ponen en contacto (mediante una soldadura) aparece una diferencia de potencial a los lados de la unión debida a que los electrones libres de uno de los materiales tienen más energía que los del otro. Al hacer pasar una corriente eléctrica por la unión se pueden dar dos casos:

- Si el sentido de la corriente se opone a la diferencia de potencial: Los electrones tienen que ganar energía y la extraen de los metales enfriando la soldadura.
- Si el sentido de la corriente es favorable a la diferencia de potencial: Los electrones pierden energía cediéndola a la soldadura, que se calienta.

3.1.1. Efectos Seebeck y Peltier

En lo que respecta al estudio de la generación termoeléctrica, el efecto de mayor interés es el denominado efecto Seebeck, observado por Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831), médico e investigador físico natural de Estonia de origen alemán del Báltico, a mediados del siglo XIX. El citado físico alemán observó que, en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con diferentes temperaturas, aparece entre ambos una diferencia de potencial (Figura 3.1.). Esta diferencia de potencial depende de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas.

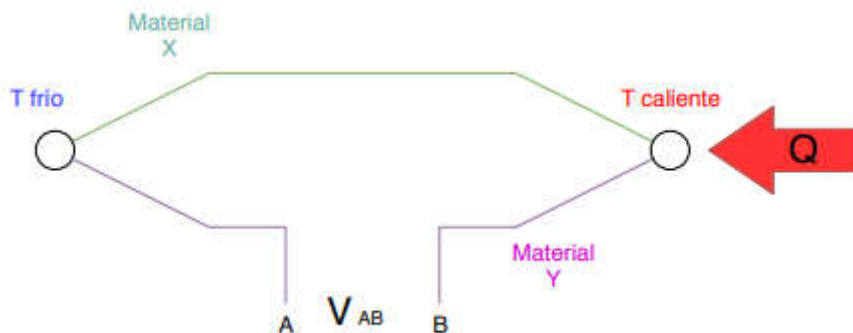


Figura 3.1: Efecto Seebeck

El efecto Peltier, descubierto por Jean C. A. Peltier (1785 – 1845) en 1834, es el contrario al efecto Seebeck y consiste en lo siguiente: Si se hace pasar corriente eléctrica a través de un circuito formado por materiales conductores diferentes cuyas uniones soldadas se encuentran a la misma temperatura, se produce un aumento de temperatura en una de las uniones y una disminución en la otra (Figura 3.2.). El enfriamiento y calentamiento de las uniones depende exclusivamente de la composición y temperatura de la unión. Este efecto es de gran utilidad en el campo de la refrigeración debido a la ausencia de partes móviles. Así se puede evitar el uso de compresores (elemento básico en los sistemas de refrigeración clásicos).

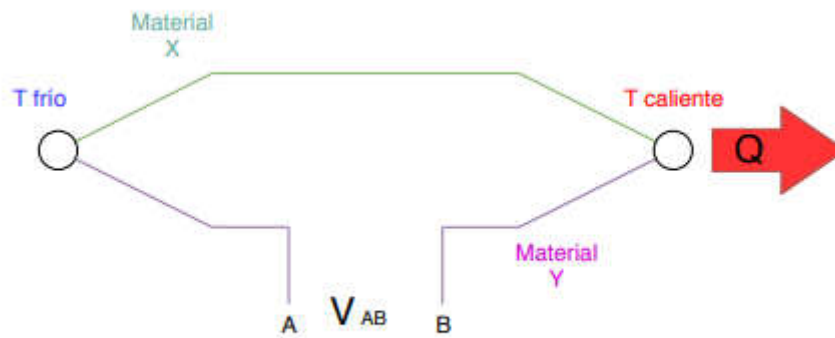


Figura 3.2: Efecto Peltier

Aunque Seebeck y Peltier observaron los fenómenos anteriormente mencionados, tuvo que transcurrir un cuarto de siglo para que William Thompson (1824-1907), físico y matemático británico (años más tarde conocido como Lord Kelvin), desarrollara explicaciones detalladas sobre los efectos Seebeck y Peltier describiendo la interrelación termodinámica entre ellos. Además, descubrió el efecto Thomson que consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo, con una distribución de temperaturas no homogénea, por el que circula una corriente.

Gracias a los fenómenos observados por Seebeck y Peltier que posteriormente Thompson relacionó termodinámicamente, hoy existen los llamados módulos termoelectricos. Las características de estos dispositivos aumentan el abanico de posibilidades tanto en el campo de la refrigeración como en el de la generación de electricidad. En el siguiente apartado se describe brevemente la estructura y el funcionamiento del módulo termoelectrico.

3.1.2. Funcionamiento del módulo termoelectrico

Un módulo termoelectrico está constituido por una serie de elementos semiconductores de tipo N (concentración de electrones libres) y P (concentración de huecos) dispuestos sobre una superficie cerámica de forma que la conexión eléctrica entre ellos sea en serie y la térmica en paralelo (Figura 3.3.) [1]. De esta forma, debido a los efectos Seebeck y Peltier, permite transformar la energía eléctrica en un flujo de calor y viceversa.

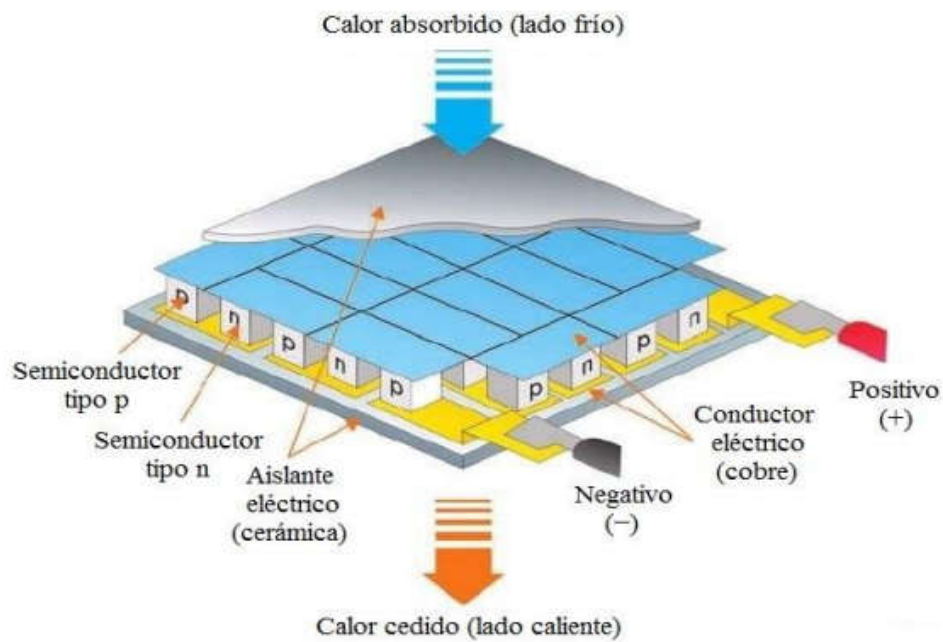


Figura 3.3: Esquema de un generador termoeléctrico

La eficiencia de estos dispositivos aumenta cuanto más cercanas sean las temperaturas de sus caras a las temperaturas de los focos frío y caliente. Ahí entran en juego los materiales de interfaz térmica que, situados entre las caras de los módulos y los focos caliente y frío, favorecen el flujo de calor y, por consiguiente, reducen el salto térmico entre las mismas.

Los materiales empleados para la fabricación de los generadores termoeléctricos son Bi_2Te_3 para los semiconductores y materiales cerámicos para las placas exteriores, ya que son buenos aislantes eléctricos y no se degradan a las temperaturas de trabajo de estos dispositivos (temperaturas menores a 250°C).

3.2. Transmisión de calor por conducción a través de superficies en contacto

Este apartado se divide en dos partes. En primer lugar, se habla del concepto de resistencia térmica de contacto, se explica la razón por la cual aparece dicho fenómeno y se exponen las expresiones matemáticas con las que se puede estudiar.

A continuación, se hace referencia a los llamados materiales de interfaz térmica, con los cuales se mejora la transmisión de calor entre superficies en contacto reduciendo la resistencia térmica de contacto entre ellas.

3.2.1. Resistencia térmica de contacto

Cuando se hace pasar un flujo de calor a través de dos superficies en contacto se observa un salto térmico en la unión. Esto se debe al fenómeno conocido como resistencia térmica de contacto que no es más que una oposición al paso de un flujo de calor. Dicha oposición se debe a la rugosidad y pequeños defectos de las dos caras involucradas en la unión, que provoca que el contacto no sea perfecto. En la figura 3.4. [2] se esquematiza de forma exagerada el paso del flujo de calor por la zona de contacto entre dos superficies en contacto.

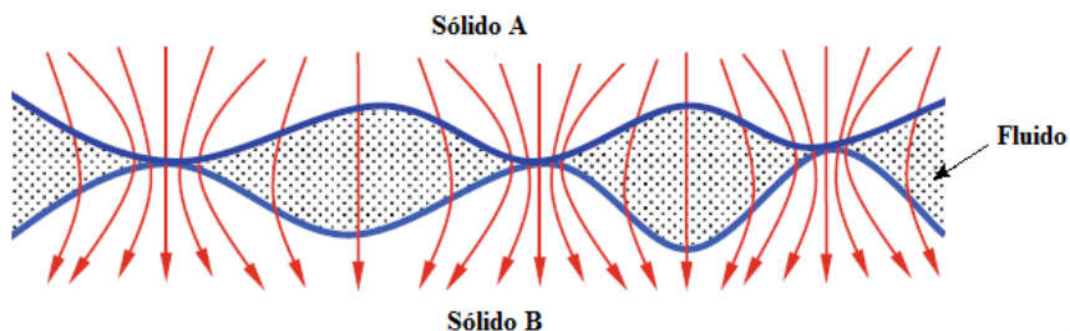


Figura 3.4: Esquema de la sección transversal del contacto entre dos superficies por las que pasa un flujo de calor

Como se puede observar, el estado superficial de las caras involucradas en la transmisión de calor provoca que aparezcan pequeños huecos en los que no hay contacto real. Por lo tanto, el área de contacto real es menor que el área de contacto aparente. En esta situación, existen tres contribuciones a la transmisión de calor:

- Conducción a través del área real de contacto

- Conducción a través de huecos: Aunque en los huecos haya un fluido (normalmente aire), no se considera convección por el reducido volumen que tienen.
- Radiación: La radiación que se intercambia entre las superficies depende de la temperatura de estas. Este fenómeno no se considera a temperaturas menores de 600°C [3].

De las tres contribuciones anteriormente mencionadas, la que más favorece la transmisión es la conducción a través del área de contacto real ya que, la conducción a través de los huecos es pésima debido al bajo coeficiente de conductividad térmica del aire.

Con los llamados materiales de interfaz térmica o TIM's lo que se busca es rellenar los huecos para mejorar el coeficiente de conductividad térmica y así mejorar la conducción en esas zonas. En el siguiente apartado se habla con más detalle de este tipo de materiales, pero antes, se exponen las expresiones matemáticas con las que se puede evaluar la resistencia térmica de contacto.

Partiendo de la Ley de Fourier de la conducción de calor en una dimensión se puede obtener una expresión de la resistencia térmica que tiene un medio al paso de un flujo de calor:

- Ley de Fourier de la conducción de calor unidimensional

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (3.1)$$

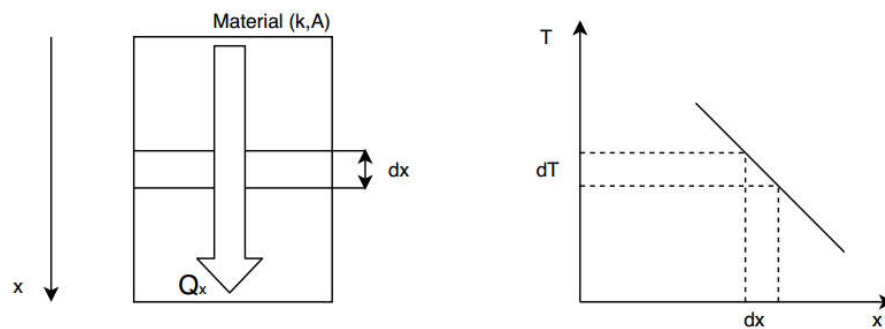


Figura 3.5: Esquema explicativo de la ley de Fourier de la conducción en forma unidimensional

donde \dot{Q}_x es el flujo de calor en la dirección x, k el coeficiente de conductividad térmica del material, A el área por la que se transmite el calor y $\frac{dT}{dx}$ el gradiente de temperaturas en un diferencial de x. Esta expresión dice que el flujo de calor por unidad de área para un material dado es proporcional al gradiente de temperaturas.

Al integrar la ecuación anterior para una longitud L se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{T_0 - T_L}{L} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$

A partir de la ecuación 3.2. se puede obtener la resistencia térmica del material teniendo que se trata de la capacidad de este para oponerse a un flujo de calor.

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{\Delta T}{L} = -\frac{\Delta T}{\frac{L}{kA}} \quad (\text{W})$$

$$R_k = \frac{L}{kA} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (3.3)$$

En el anterior desarrollo se ha obtenido la resistencia térmica conductiva. Partiendo de la expresión de la transmisión de calor por convección y realizando un desarrollo análogo se obtiene la resistencia térmica convectiva que ofrece un medio, cuya expresión es la siguiente.

$$R_h = \frac{1}{hA} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (\text{donde h es el coeficiente de convección}) \quad (3.4)$$

Como se puede observar en las expresiones anteriores, conociendo la geometría y el coeficiente de conducción se puede obtener fácilmente la resistencia térmica conductiva de un material (o conociendo la geometría y el coeficiente de convección, la resistencia convectiva de un medio).

En el caso de dos superficies en contacto no es tan fácil obtener la resistencia térmica de la unión debido a que cada superficie es diferente a todas las demás (no se sabe con exactitud la rugosidad superficial ni el tipo ni número de defectos además de otros factores que intervienen que luego se mencionan). Por ello, la obtención del valor de

la resistencia térmica de contacto entre dos superficies debe hacerse de forma experimental para cada caso.

Así pues, la resistencia térmica de contacto (R_c) se define como la variación de temperatura por unidad de flujo de calor que atraviesa la unión. Se define por unidad de área con la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{(T_1 - T_2)A}{\dot{Q}} \text{ (}^\circ\text{C m}^2 / \text{W)} \quad (3.5)$$

Donde T_1 y T_2 son las temperaturas de las caras en contacto y \dot{Q} es el flujo de calor que las atraviesa. También se puede expresar teniendo en cuenta el flujo total de calor que interviene:

$$R_c = \frac{(T_1 - T_2)}{\dot{Q}} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, según la expresión 3.6, se puede obtener experimentalmente la R_c del contacto entre dos superficies midiendo las temperaturas de cada una y conociendo el flujo de calor que las atraviesa.

Si se realiza un ensayo en el que intervienen dos piezas del mismo material en contacto registrando los valores de temperatura en la dirección del flujo de calor se observa un gráfico parecido al que aparece en la siguiente figura.

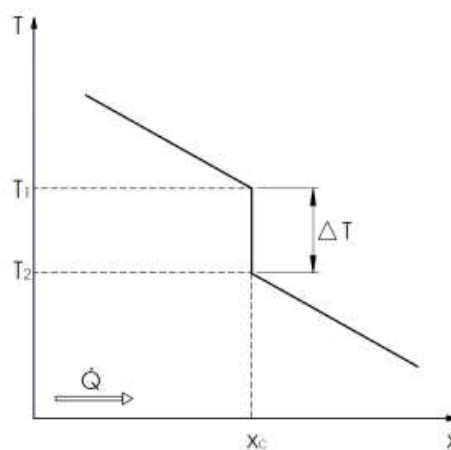


Figura 3.6: Gráfico temperatura-posición

En las zonas de material de cada pieza que conforman la unión el gradiente de temperaturas es constante (si la conductividad del mismo lo es), mientras que en la zona de la unión (x_c) existe un salto térmico. Dicho salto es provocado por la R_c de la unión.

En estudios realizados hasta el momento sobre la resistencia térmica de contacto se han recopilado una serie de factores que influyen en ella. Según "American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc" [4] los parámetros más influyentes de los que han estudiado son:

- Rugosidad superficial y planitud entre superficies
- Presión de contacto entre las superficies
- Espesor de los huecos
- Conductividad térmica de los materiales
- Dureza superficial y límite elástico
- Módulo de Young de los sólidos
- Temperatura media del contacto
- Coeficiente lineal de dilatación
- Material de interfaz térmica (TIM)

3.2.2. Materiales de interfaz térmica (TIM's)

En la actualidad, hay muchas aplicaciones en las cuales es importante que la transmisión de calor a través de dos superficies en contacto tenga la menor resistencia posible. Por ejemplo, en el campo de la microelectrónica, hoy en día la densidad de energía sigue aumentando y se espera que sobrepase $1\text{W}/\text{mm}^2$ [5]. Mucha de esta energía se transforma en calor. Esto hace que la gestión térmica se vuelva cada vez más interesante.

Un claro ejemplo de la importancia de la gestión térmica en este campo es la refrigeración de los microprocesadores para garantizar el correcto funcionamiento y alargar la vida útil de los dispositivos. Ahí entran en juego los llamados materiales de interfaz térmica o TIM's con los que se reduce la resistencia térmica entre el microprocesador y el disipador que lo acompaña. Con ellos se consigue mejorar la eficiencia de transmisión de calor entre el silicio y el disipador haciendo que la caída de temperatura entre estas dos superficies sea la mínima posible. Estos materiales se sitúan entre las superficies rellenando los huecos e imperfecciones existentes, favoreciendo de esta forma la conducción del calor.

Las propiedades que se buscan de un material para que sea un TIM ideal son baja resistencia térmica, espesor pequeño, alta conductividad térmica, buena conformabilidad a presiones medias, buenas propiedades frente a la humedad, bajo coste y ser respetuoso con el medio ambiente y la salud. Además, deben ser capaces de soportar las tensiones mecánicas provocadas por la dilatación de los materiales que les rodean, que en general tienen distintos coeficientes de dilatación, sin perder sus propiedades.

A continuación, se mencionan los tipos de TIM's utilizados en la actualidad y se describe brevemente las características más relevantes de cada uno:

- Los TIM's tradicionales son materiales basados en polímeros cargados con partículas de materiales conductores (metálicos o cerámicos). Pueden ser grasas, materiales de cambio de fase (PCM), geles y almohadillas. De los anteriormente mencionados, los más utilizados son las grasas que ofrecen resistencias térmicas de entre 0,1 y $1^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{W}$ [6]. El problema que tienen es que son sucias, difíciles de aplicar y de retirar. Además, tienden a perder propiedades debido a separaciones de fase y secado. Todo lo anteriormente mencionado hace que las grasas no sean un TIM muy eficiente ni confiable al cabo de cierto periodo de tiempo.
- Las soldaduras se pueden considerar también como otro tipo de TIM's que pueden llegar a ofrecer resistencias térmicas de hasta $0,05^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{W}$ [7]. Como contras tienen la dificultad para retirarlas, la pérdida de propiedades a altas temperaturas, la poca capacidad para soportar estrés térmico y la formación de huecos.
- Se han realizado estudios que incluyen materiales como nanotubos de carbono y grafeno (utilizados directamente o como relleno) con los que se consiguen valores de resistencia térmica en el rango de 0,01 a $0,19^{\circ}\text{Ccm}^2/\text{W}$ [8]. Este tipo de TIM's aún no se ha llegado a comercializar debido a entre otras cosas, a la complejidad de diseño y el alto costo que presentan.
- Otros estudios se centran en la posibilidad de utilizar aleaciones de bajo punto de fusión a modo de TIM. Y es que, este tipo de aleaciones tienen una alta conductividad térmica (en comparación con los TIM's tradicionales) y ofrecen una resistencia térmica extremadamente baja a pequeñas presiones de contacto y

con espesores muy pequeños. Algunas de ellas son aleaciones eutécticas de indio, bismuto, galio, y estaño. Se descartan otras basadas en mercurio, plomo y cadmio debido a su alta toxicidad y a que su uso puede conllevar problemas medioambientales.

4. Descripción del equipo utilizado

En este capítulo se realiza una descripción del banco de ensayos que se ha utilizado para el cálculo de las resistencias térmicas de contacto. Dicho banco ha sido diseñado y construido por Óscar Herrero Mola, antiguo alumno del Grado de Tecnologías Industriales de la Universidad Pública de Navarra.

El banco de ensayos se ha diseñado desde un punto de vista estructural y térmico con la idea de disponer de un equipo que proporcione cierta flexibilidad a la hora de medir resistencias térmicas de contacto y conductividades térmicas. La idea es poder medir los parámetros anteriormente mencionados de distintos materiales con distintas dimensiones.

En primer lugar, se realiza una breve descripción de los elementos que constituyen la estructura del banco. A continuación, se hace referencia a los elementos relacionados con el diseño de la parte térmica. Por último, se incluyen los elementos necesarios para la obtención de datos y el control del equipo.

4.1. Elementos estructurales

La parte estructural del banco está formada por dos planchas de acero, unidas mediante cuatro varillas roscadas, que hacen de soporte del resto de componentes. Además, consta de cuatro patas, sujetas a la plancha inferior, cuya función es apoyar la estructura en el suelo.

En la siguiente ilustración se observan los elementos anteriormente mencionados.



Figura 4.1: Estructura del banco de ensayos

4.2. Elementos del diseño térmico

Para el diseño de la parte térmica, es importante tener en cuenta el método que a posteriori se va a emplear para el cálculo de la resistencia térmica de contacto, ya que, en función de este, el diseño del banco varía. En este caso el elegido es el método de ‘steady state measurement’ ya que es el que permite tener mayor versatilidad en el diseño. El método consiste en crear una conducción de flujo de calor unidireccional y medir distintos puntos de temperatura para obtener el gradiente y de esta forma, la resistencia térmica de contacto. En el siguiente apartado se explica con mas detalle.

Así pues, la parte térmica del banco se compone principalmente de los siguientes elementos:

- Generador de calor

Situado en la parte inferior de la estructura, se trata de una pieza de acero en la que se han mecanizado cuatro orificios para insertar resistencias eléctricas. De esta forma, haciendo pasar intensidad de corriente eléctrica por las resistencias se produce una conversión de energía eléctrica a térmica por el efecto Joule

producido en las mismas. La pieza de acero se encarga de transportar esa energía térmica por conducción a los siguientes elementos.

- Probetas de referencia

Son dos piezas de acero con forma de prisma cuadrangular regular cuyas bases son cuadrados de 40 x 40 mm, mismas dimensiones que los módulos termoeléctricos. De esta forma se obtienen los mismos valores de presión en los ensayos y en la realidad.

Entre las probetas de referencia se coloca la muestra a ensayar de forma que el flujo de calor atraviese la muestra. En ambas probetas se han mecanizado tres orificios en los que se insertan sondas Pt100 para poder medir el gradiente de temperaturas.

- Túnel de viento superior

Consiste en un disipador de aletas de aluminio que está en contacto con la probeta de referencia superior y dos ventiladores que favorecen la transmisión de calor de la probeta superior al entorno mediante convección forzada.

- Actuador lineal

Actúa sobre la probeta superior. Permite tanto levantarla para colocar la muestra a ensayar, como ejercer presión sobre la muestra para obtener los mismos valores de presión en los ensayos que en la realidad. La cantidad de presión ejercida es importante en los ensayos debido a que el valor de la resistencia térmica de contacto depende de dicha variable. El actuador permite hacer ensayos variando la presión y de esta forma se puede ver como evoluciona la RTC de la muestra en función de la presión ejercida sobre la misma.

- Resistencia de compensación y túnel de viento inferior

En la parte inferior del generador se sitúa una resistencia cuyo objetivo es que todo el flujo de calor ascienda por la probeta inferior. El fundamento para ello es que no halla gradiente de temperaturas del generador hacia abajo. De esta forma el flujo de calor en esa dirección es nulo.

Con el túnel de viento se consigue controlar la temperatura de la zona de compensación.

En la siguiente ilustración se muestra el diseño del banco realizado mediante el software SolidWorks.

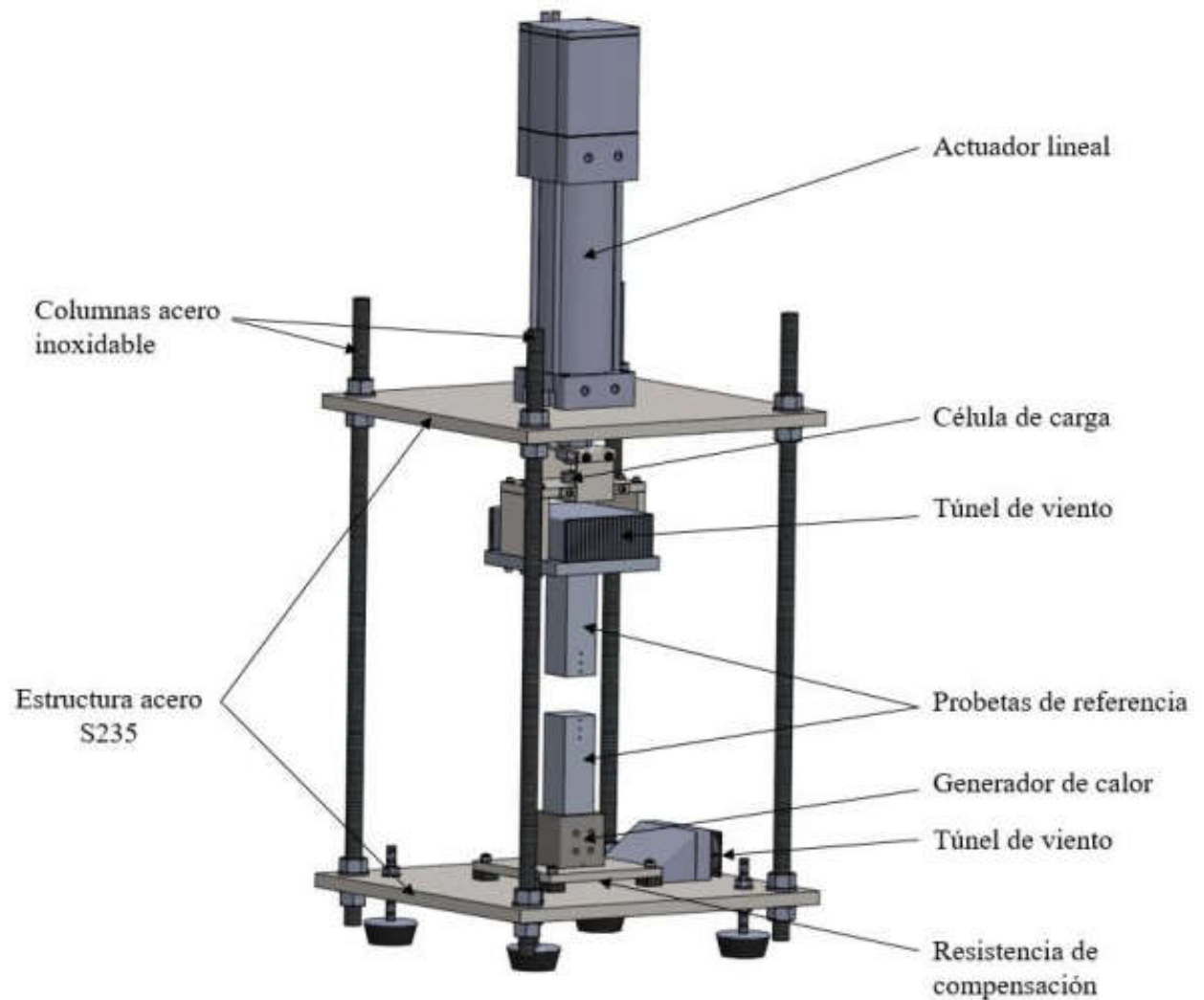


Figura 4.2: Diseño en CAD del banco de ensayos

4.3. Elementos para la obtención datos y el control del equipo

Este apartado incluye los elementos necesarios para la obtención y transformación de la información que proporciona el banco, para visualizarla y analizarla en el ordenador. Además, se mencionan los elementos necesarios para controlar las variables potencia calorífica suministrada, potencia convectiva de los ventiladores y presión ejercida.

4.3.1 Obtención de datos

La precisión de la medida de las temperaturas en los distintos puntos de las probetas de referencia es de vital importancia para reducir en la medida de lo posible la incertidumbre asociada al cálculo de la RTC. Por ello, para medir dichas temperaturas se utilizan sondas Pt100 cuya precisión es alta.

La precisión en la medida del resto de temperaturas como son la del ambiente en distintas zonas y la del generador, no es tan importante para el cálculo de la RTC. Por ello, para medir dichas temperaturas se utilizan termopares (menos precisos que las sondas Pt100 y a su vez mas económicos).

Otra variable que interesa medir es la presión ejercida sobre la muestra. Para ello en un punto situado entre el actuador y la probeta superior se coloca un sensor que mide la fuerza ejercida sobre dicha probeta, que es la misma que la ejercida sobre la muestra. Con el valor de la fuerza y el área transversal de las probetas se obtiene la presión ejercida sobre la muestra.

Todos los sensores anteriormente mencionados proporcionan información analógica que mediante una capturadora de datos se transforma en digital. El software AMR Data-Control 4.0 permite monitorizar los datos tanto gráficamente, como en una tabla para posteriormente tratarlos en un libro de Excel.

4.3.2. Control del equipo

Para controlar tanto la potencia calorífica suministrada como la potencia convectiva de los ventiladores se utilizan fuentes de tensión. Una para alimentar las resistencias del generador y otras dos para alimentar el túnel de viento superior y el túnel de viento inferior.

El software PC Interface Software for RC permite controlar tanto la posición de la probeta superior, como el porcentaje de la fuerza total del actuador ejercida sobre la misma.

5. Metodología de los ensayos

En este capítulo se aborda todo lo referente a los ensayos realizados en el trabajo. Desde la explicación de cómo se calcula la resistencia térmica en función de las mediciones realizadas, pasando por la descripción de los materiales de interfaz térmica elegidos para los ensayos hasta, finalmente, la explicación detallada de los dos tipos de ensayos que se han llevado incluyendo el tratamiento de datos realizado.

5.1. Cálculo de la resistencia térmica global de la muestra

El equipo disponible para realizar los ensayos ha sido diseñado para medir la resistencia térmica o la conductividad mediante el método 'steady state measurement'. Dicho método consiste en crear una conducción de flujo de calor unidireccional y medir la temperatura en distintos puntos para de esta forma, obtener el gradiente térmico y con ello poder calcular la resistencia térmica o conductividad. La expresión de la resistencia térmica global de la muestra situada entre las caras de la probeta superior e inferior es:

$$R_G = \frac{(T_3 - T_4)}{\dot{Q}} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (5.1)$$

De la expresión 5.1. se observa que para conocer el valor de la R_G basta con conocer el gradiente de temperaturas de un extremo a otro de la muestra y el valor del flujo de calor total que la atraviesa. Por ello, el diseño del banco incluye las probetas (en el caso de este trabajo de acero, con conductividad térmica conocida) por las que fluye unidireccionalmente el calor generado por resistencias eléctricas. Las probetas constan de tres orificios mecanizados cada una, donde se introducen las seis sondas Pt100 con las que se obtienen valores de temperatura en distintas posiciones. A continuación, se muestra un esquema de la disposición de las sondas en las probetas:

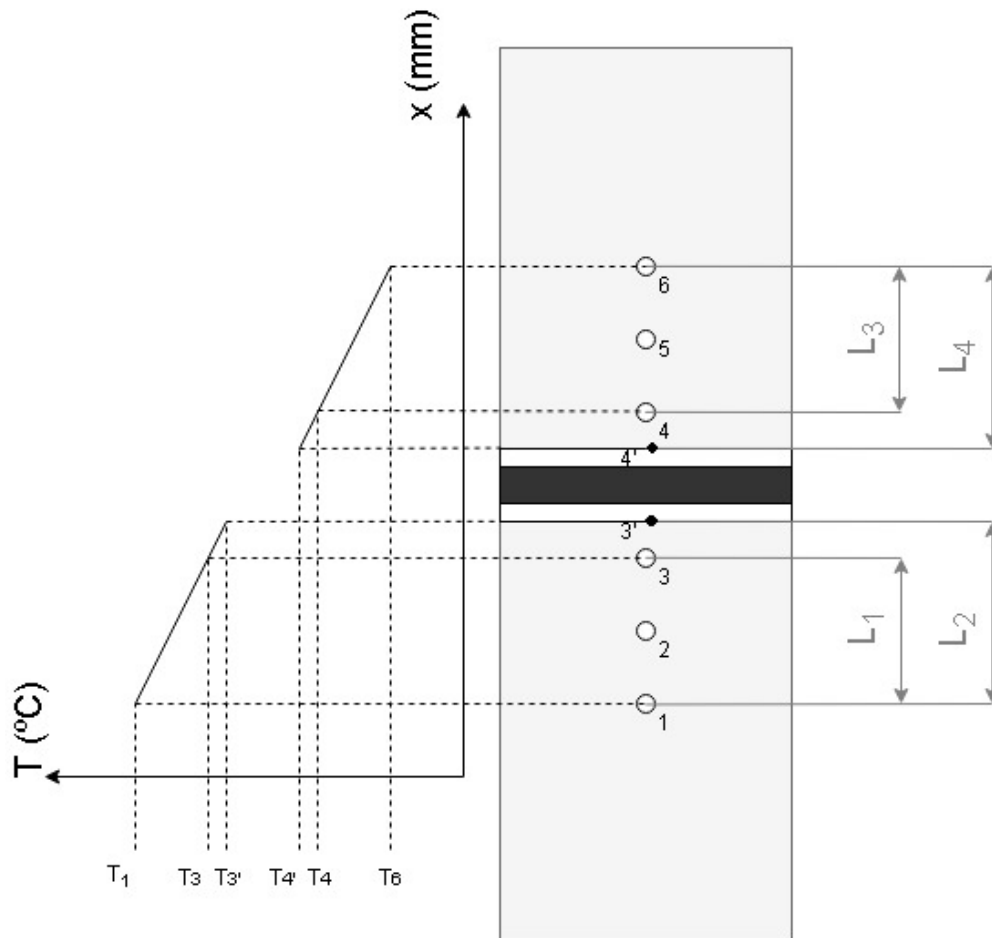


Figura 5.1: Esquema de las rampas de temperaturas que proporciona la situación de las sondas en las probetas

Para obtener la resistencia global de la muestra es necesario conocer las temperaturas de las caras de las probetas que están en contacto con la muestra ($T_{3'}$ y $T_{4'}$). En la figura 5.1. se observa que para obtener las temperaturas en dichas caras se deben realizar extrapolaciones a través de las rampas temperatura-posición obtenidas para cada probeta. Las extrapolaciones se calculan por medio de las siguientes expresiones:

$$T_{3'} = \frac{L_2}{L_1} T_3 + \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) T_1 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (5.2)$$

$$T_{4'} = \frac{L_4}{L_3} T_4 + \left(1 - \frac{L_4}{L_3}\right) T_6 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (5.3)$$

Se hace así debido a la inviabilidad de colocar sondas en las caras en contacto con la muestra ya que, de esa forma, se estaría modificando la superficie de contacto con lo que se obtendrían valores de resistencia térmica que no se asemejarían en lo absoluto a los valores reales buscados.

Queda ya explicada la obtención del gradiente de temperaturas que cae en la muestra. A continuación, se procede a explicar la forma con la que se obtiene el valor del flujo de calor que la atraviesa.

A partir de la expresión 3.2. se puede obtener el flujo de calor que atraviesa las probetas en las zonas donde están colocadas las sondas.

En este caso se calcula el flujo de calor que atraviesa la probeta inferior y el que atraviesa la probeta superior y se hace la media. Cabe decir que ambos flujos son prácticamente el mismo debido a que las pérdidas caloríficas hacia el exterior son mínimas gracias al aislamiento térmico que rodea las probetas a base de lana de roca y neopreno en la parte externa. Así pues, es fácil calcular el flujo de calor conociendo la conductividad térmica de la probeta, área de la sección transversal de la misma y la recta temperatura-posición entre los puntos 1 y 3 señalados en la figura 5.1. según la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = K_{\text{prob}} \frac{T_1 - T_3}{L_1} \quad (5.4)$$

El cálculo del flujo de calor para la probeta superior se realiza de forma análoga al anterior.

La conductividad de la probeta K_{prob} es un dato conocido cuyo valor es $16,3 \frac{W}{m K}$. Dicha conductividad ha sido obtenida previamente en ensayos realizados por el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos.

5.1.1. Incertidumbres asociadas

Una medición es una comparación entre una magnitud y un patrón de referencia. Esto implica que toda medición es una aproximación al valor real y por tanto siempre tendrá asociada una incertidumbre.

En el caso que ocupa este trabajo, la magnitud que se quiere medir (RTC) no es una medida directa sino una función de varias medidas (temperaturas, longitudes,

diámetros...) no correlacionadas entre sí. Por ello se procede a calcular la incertidumbre estándar combinada a partir de la ley de propagación de la incertidumbre.

Ley de propagación de la incertidumbre

La incertidumbre estándar de y (donde y es la estimación del mensurando Y) se obtiene al combinar adecuadamente las incertidumbres estándares de las cantidades de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . La incertidumbre estándar combinada se denota por $u_c(y)$. Para calcularla se utiliza la siguiente ecuación:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (5.5)$$

donde f es la función que relaciona la magnitud de la que se quiere saber la incertidumbre con las magnitudes que se han medido mediante medidas directas. Cada $u(x_i)$ es la incertidumbre asociada a cada medida directa. A las derivadas parciales que aparecen en la ecuación frecuentemente se les denomina coeficientes de sensibilidad y describen el peso de cada medida directa en el valor final de incertidumbre.

Cálculo de la incertidumbre

La magnitud por estimar es la resistencia térmica. La función que la relaciona con las medidas directas cuyas incertidumbres son conocidas es la siguiente:

$$R_G = \frac{T_3' - T_4'}{\dot{Q}} \quad (5.1) \quad , \quad \text{donde} \quad \begin{cases} T_3' = \frac{L_2}{L_1} T_3 + \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) T_1 & (5.2) \\ T_4' = \frac{L_4}{L_3} T_4 + \left(1 - \frac{L_4}{L_3}\right) T_6 & (5.3) \\ \dot{Q} = K_{prob} \frac{T_1 - T_3}{L_1} & (5.4) \end{cases}$$

T_3' y T_4' representan las temperaturas de la cara superior de la probeta de referencia que esté en contacto con el generador y la de la cara inferior de la probeta de referencia que está en contacto con el disipador respectivamente. Dichas temperaturas se calculan

extrapolando en las rectas que proporcionan las mediciones de las sondas Pt100 y las posiciones de estas como ya se ha explicado anteriormente.

Para realizar el cálculo de la incertidumbre de la resistencia térmica se va a desacoplar la variable de flujo de calor \dot{Q} de la fórmula de la ley de propagación de incertidumbre (5.4) tratándolo como un parámetro conocido con una incertidumbre determinada. Para ello se calcula previamente la incertidumbre de \dot{Q} aplicando la ley de propagación de incertidumbres.

La incertidumbre que se obtiene de esta manera para la resistencia térmica de contacto es sustancialmente menor.

- **Incertidumbre del flujo de calor \dot{Q}**

Partiendo de la función que relaciona el flujo de calor con las variables obtenidas de medidas directas, se hallan los coeficientes de sensibilidad de cada variable y se aplica la ley de propagación de incertidumbres (5.4).

$$\dot{Q} = K_{prob} \frac{T_1 - T_3}{L_1} \quad (5.4)$$

PARÁMETRO (x_i)	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD $\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial x_i}\right)$	INCERTIDUMBRE $u(x_i)$
K_{prob}	$\frac{T_1 - T_3}{L_1}$	$u(K_{prob})$
T_1	$\frac{K_{prob}}{L_1}$	$u(T_1)$
T_3	$-\frac{K_{prob}}{L_1}$	$u(T_3)$

Tabla 5.1: Parámetros con sus respectivos coeficientes de sensibilidad e incertidumbres

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres la incertidumbre asociada al flujo de calor \dot{Q} viene dada por la siguiente expresión.

$$u(\dot{Q}) = \sqrt{\left(\frac{T_1 - T_3}{L_1}\right)^2 u(K_{prob})^2 + \left(\frac{K_{prob}}{L_1}\right)^2 u(T_1)^2 + \left(-\frac{K_{prob}}{L_1}\right)^2 u(T_3)^2} \quad (5.6)$$

- **Incertidumbre de la R_G**

Partiendo de la función que relaciona la R_G con las variables obtenidas de medidas directas, se hallan los coeficientes de sensibilidad de cada variable y se aplica la ley de propagación de incertidumbres (5.4).

$$R_G = \frac{\frac{L_2 T_3 + (1 - \frac{L_2}{L_1}) T_1 - \frac{L_4}{L_3} T_4 - (1 - \frac{L_4}{L_3}) T_6}{L_1}}{\dot{Q}} \quad (5.7)$$

PARÁMETRO (x_i)	COEFICIENTE DE SENSIBILIDAD $\left(\frac{\partial R_G}{\partial x_i}\right)$	INCERTIDUMBRE $u(x_i)$
L_1	$-\frac{L_2 T_3}{L_1^2 \dot{Q}}$	$u(L_1)$
L_2	$\frac{T_3 - T_1}{L_1 \dot{Q}}$	$u(L_2)$
L_3	$\frac{L_4(T_4 - T_6)}{L_3^2 \dot{Q}}$	$u(L_3)$
L_4	$\frac{(T_6 - T_4)}{L_3 \dot{Q}}$	$u(L_4)$
T_1	$\frac{1}{\dot{q}}\left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right)$	$u(T_1)$
T_3	$\frac{L_2}{L_1 \dot{Q}}$	$u(T_3)$
T_4	$-\frac{L_4}{L_3 \dot{Q}}$	$u(T_4)$
T_6	$\frac{1}{\dot{q}}\left(1 - \frac{L_4}{L_3}\right)$	$u(T_6)$
\dot{Q}	$-\frac{1}{\dot{Q}^2} \left[\frac{L_2}{L_1} T_3 + \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) T_1 - \frac{L_4}{L_3} T_4 - \left(1 - \frac{L_4}{L_3}\right) T_6 \right]$	$u(\dot{q})$

Tabla 5.2: Parámetros con sus respectivos coeficientes de sensibilidad e incertidumbres

$$u(R_G) = \sqrt{\left(-\frac{L_2 T_3}{L_1^2 \dot{q}} \right)^2 u(L_1)^2 + \left(\frac{T_3 - T_1}{L_1 \dot{q}} \right)^2 u(L_2)^2 + \left(\frac{L_4 (T_4 - T_6)}{L_3^2 \dot{q}} \right)^2 u(L_3)^2 + \left(\frac{T_6 - T_4}{L_3 \dot{q}} \right)^2 u(L_4)^2 + \left[\frac{1}{\dot{q}} \left(1 - \frac{L_2}{L_1} \right) \right]^2 u(T_1)^2 + \left(\frac{L_2}{L_1 \dot{q}} \right)^2 u(T_3)^2 + \left(-\frac{L_4}{L_3 \dot{q}} \right)^2 u(T_4)^2 + \left[\frac{1}{\dot{q}} \left(1 - \frac{L_4}{L_3} \right) \right]^2 u(T_6)^2 + \left\{ -\frac{1}{\dot{q}^2} \left[\frac{L_2}{L_1} T_3 + \left(1 - \frac{L_2}{L_1} \right) T_1 - \frac{L_4}{L_3} T_4 - \left(1 - \frac{L_4}{L_3} \right) T_6 \right] \right\}^2 u(\dot{Q})^2} \quad (5.8)$$

5.2. Materiales de interfaz térmica a ensayar

Como se ha mencionado anteriormente en el capítulo 3. Estado del arte, en la actualidad existen varios tipos de TIM's como son los tradicionales basados en polímeros con partículas conductoras, las soldaduras, los basados en nanotubos de carbono y grafeno, las aleaciones de bajo punto de fusión etc.

En este trabajo se realiza una comparativa entre tres tipos de TIM's: un TIM tipo grasa, otro tipo LMA (low melt alloys) y finalmente uno en forma de lámina de grafito.

- **Pasta térmica Artic Silver 5**

Comenzando por el de tipo grasa, se trata de un compuesto térmico de plata polisintética de alta densidad denominado por el fabricante como Artic Silver 5. Dicho compuesto ha sido pensado y diseñado para líneas de enlace entre CPU y disipadores de calor de alto rendimiento o soluciones de refrigeración por agua.

Algunas características proporcionadas por el fabricante son:

- Tamaño medio de partícula: $\leq 0,49 \cdot 10^{-6}$ m
- Temperatura de trabajo: -50°C a 180°C

*Se incluye hoja de características en el anexo



Figura 5.2: Imagen de pasta térmica Arctic Silver 5

- **Indio**

El segundo TIM que se estudia en este trabajo es un producto suministrado por la empresa Indium Corporation. Se trata de una aleación de metal blando o soft metal alloy (SMA) que ofrece, según el fabricante, una resistencia térmica uniforme a presiones bajas aplicadas en la interfaz de contacto. La maleabilidad del indio minimiza la resistencia de la superficie ya que se adapta a las irregularidades llenando los huecos.

Algunas características proporcionadas por el fabricante son:

- Pureza del 99,99%
- Máxima temperatura de trabajo: 125°C
- Conductividad térmica a 85°C: 0,86 W/ cm°C

*Se incluye hoja de características en el anexo

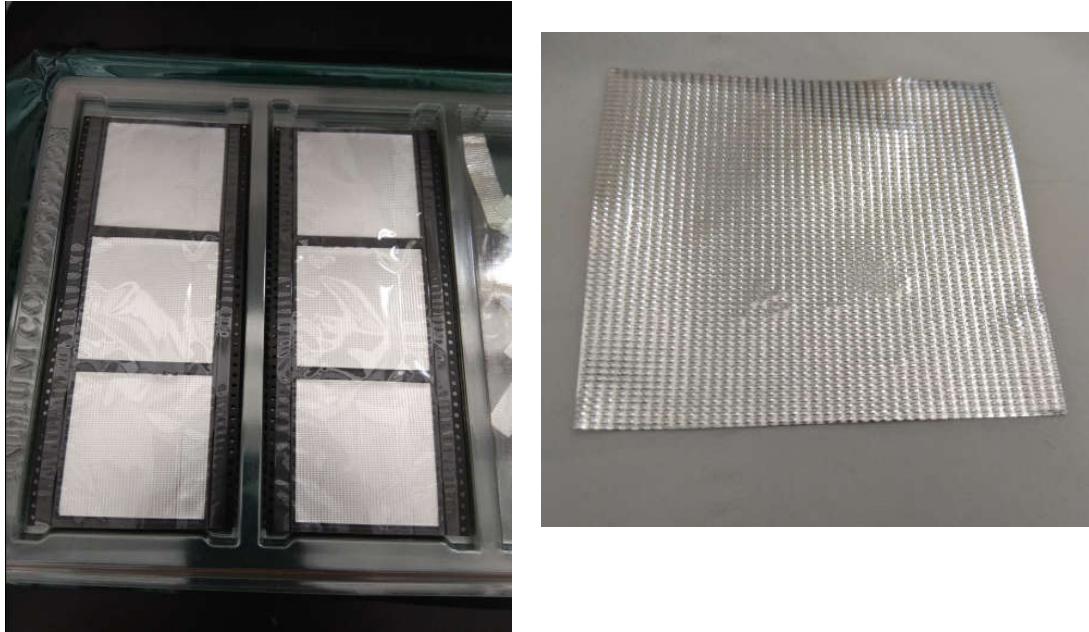


Figura 5.3: A la izquierda, láminas de indio en su embalaje original. A la derecha, lámina de indio.



Figura 5.4: Etiqueta del producto

- **Lámina de grafito**

El tercer material estudiado es a base de grafito natural con adición de polímero en formato lámina proporcionado por la empresa GrafTech International Holdings Inc. Este material está diseñado para aplicaciones que requieren baja resistencia térmica de contacto y alta conductividad térmica. Algunas características proporcionadas por el fabricante son:

- Espesor de lámina: 0,127mm
- Temperatura de trabajo: -25°C a 125°C
- Típica conductividad térmica: 16 W/mK

*Se incluye hoja de características en el anexo



Figura 5.5: Lámina de grafito en formato DIN A4.

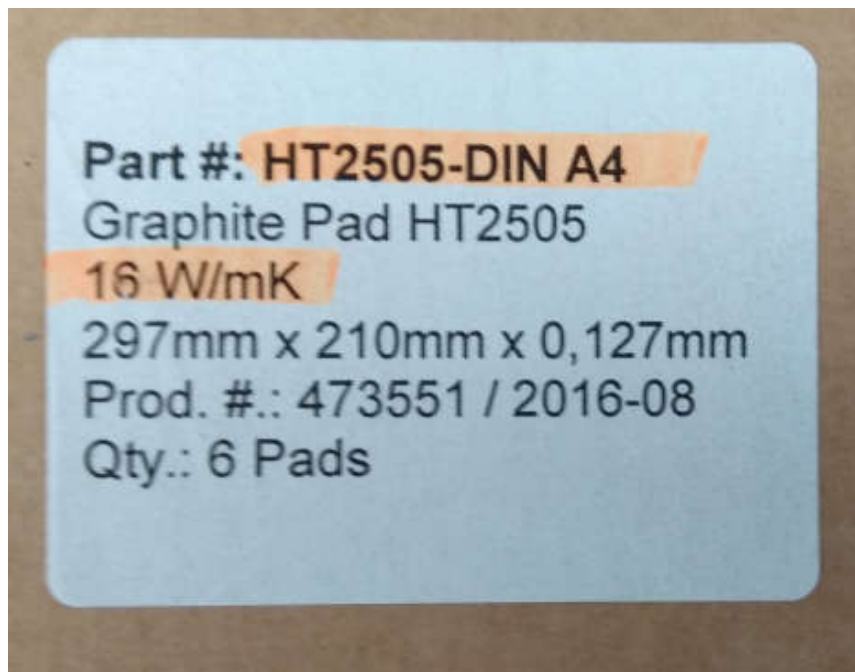


Figura 5.6: Etiqueta del producto

5.3. RTC en función del envejecimiento

En el primer tipo de ensayos que se realizan se quiere evaluar en qué medida le afecta a la RTC de los distintos TIM's el envejecimiento térmico de los mismos. El envejecimiento consiste en la pérdida de propiedades de un material cuando se expone a estrés térmico causado por temperaturas elevadas durante largos periodos de tiempo.

El envejecimiento es un aspecto muy a tener en cuenta a la hora de escoger uno u otro material para utilizarlo en cualquier aplicación en general y más si cabe, en el campo del aprovechamiento del calor residual en chimeneas industriales en el que se alcanzan temperaturas elevadas. La importancia de conocer el comportamiento del material frente a periodos largos de tiempo a altas temperaturas radica en que dicho conocimiento proporciona una idea de la vida útil que puede tener el material en la aplicación que se esté estudiando. Con esta información se puede hacer una elección mas acertada puesto que se puede evitar tener que renovar el material muy a menudo, evitando así el coste económico y de tiempo que ello conlleva.

Así pues, a la hora de escoger un TIM para una aplicación no sólo es importante conocer la RTC que proporciona dicho material recién colocado, sino también la evolución de esta a lo largo del tiempo. Por ello se han realizado una serie de ensayos enfocados en este aspecto.

Es importante mencionar que en este tipo de ensayos no se obtiene la resistencia térmica de contacto del TIM en concreto sino la resistencia global de la muestra. Posteriormente se hace una comparación de la evolución de la resistencia global de las distintas muestras.

A continuación, se procede a describir qué componentes incluyen las muestras ensayadas para después pasar a explicar qué resistencias contribuyen a la resistencia global de las mismas.

5.3.1. Tipos de muestras y resistencias térmicas involucradas

Se quiere simular el entorno de trabajo de los TIM's en la aplicación concreta que ocupa este estudio. Por ello se van a realizar dos tipos de muestras:

- Sándwich **ACERO-TIM-CERÁMICA**: Simula el entorno del TIM situado entre la chimenea (acero) y el módulo termoelectrico (caras exteriores de cerámica).
- Sándwich **CERÁMICA-TIM-ALUMINIO**: Simula el entorno del TIM situado entre el módulo termoelectrico (caras exteriores de cerámica) y el disipador de calor (aluminio).

En el siguiente esquema se observa la situación de los TIM's en la aplicación que se está estudiando:

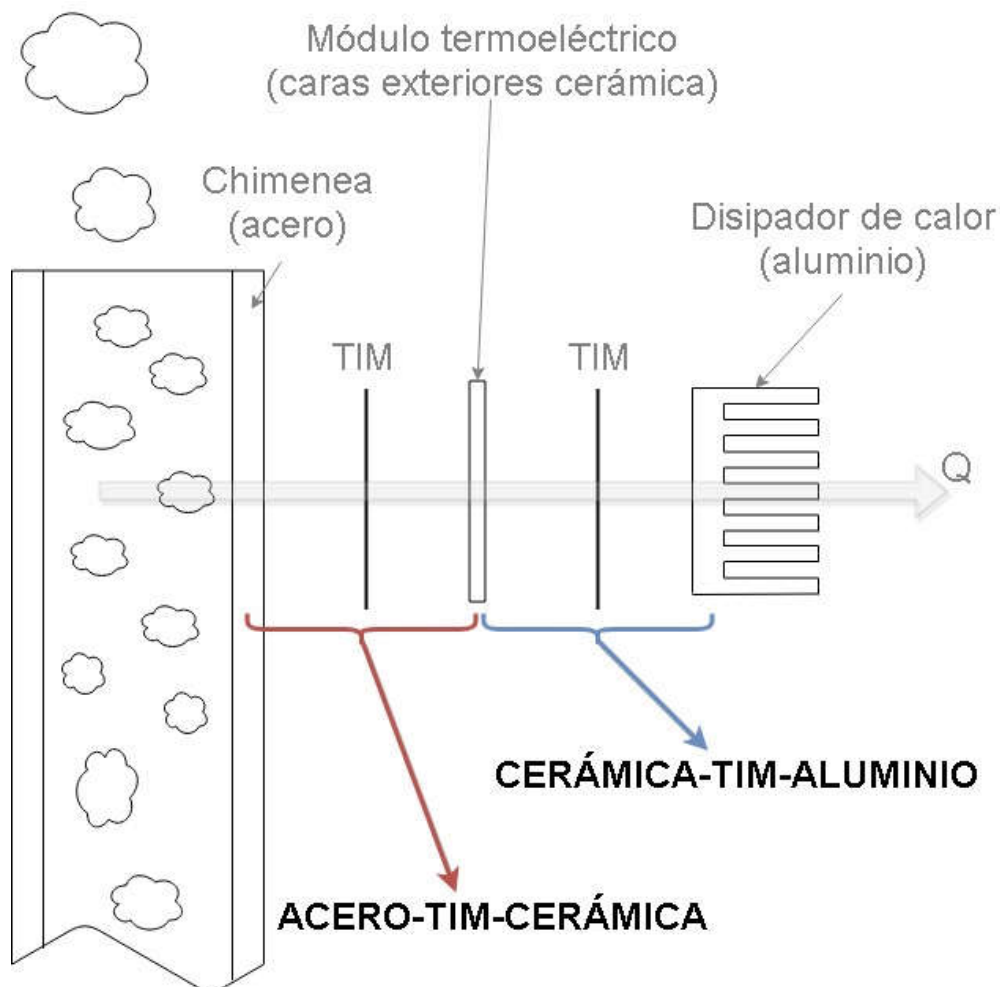


Figura 5.7: Esquema ilustrativo de los dos entornos en los que se sitúan los TIM's

Componentes de la resistencia térmica global obtenida en los ensayos

En esta sección, se incluyen dos esquemas en los que se puede observar la posición de los dos tipos de sándwich a la hora de realizar los ensayos y las resistencias térmicas existentes entre las caras de las probetas.

Sandwich ACERO-TIM-CERÁMICA

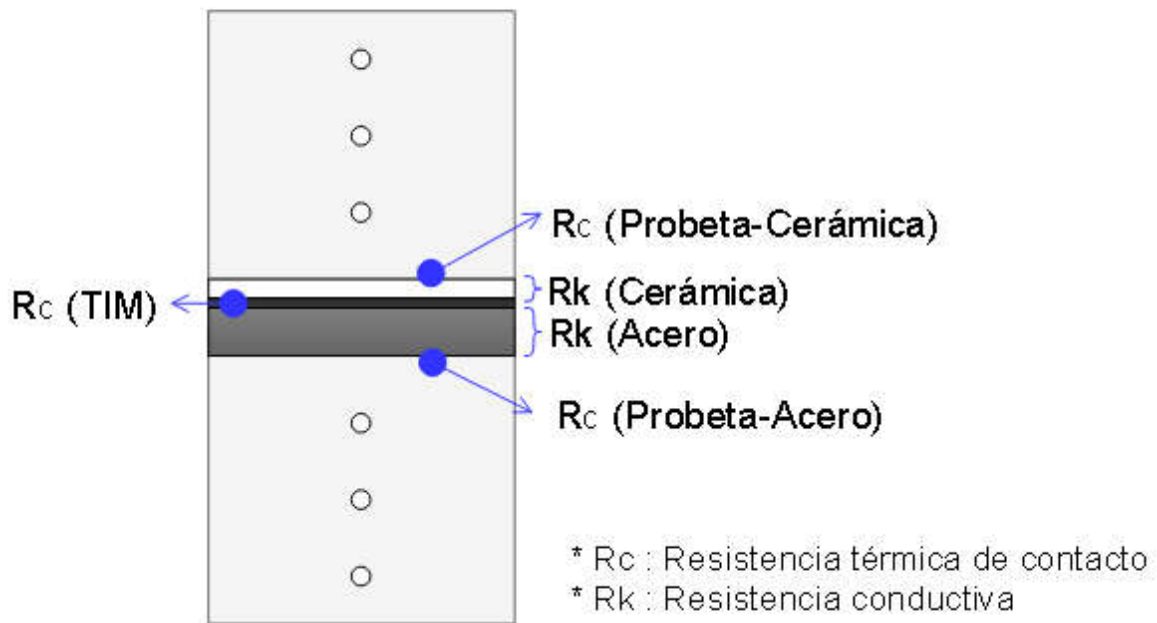


Figura 5.8: Esquema ilustrativo de las resistencias involucradas en los sándwiches ACERO-TIM-CERÁMICA

La disposición en serie de las distintas resistencias térmicas hace que la resistencia térmica global de la muestra ACERO-TIM-CERÁMICA tenga la siguiente expresión:

$$R_{G(acero-tim-cer)} = R_{c(probeta-acero)} + R_{k(acero)} + R_{c(acero-TIM-cer)} + R_{k(cer)} + R_{c(probeta-cer)} \quad (5.9)$$

Sandwich CERÁMICA-TIM-ALUMINIO

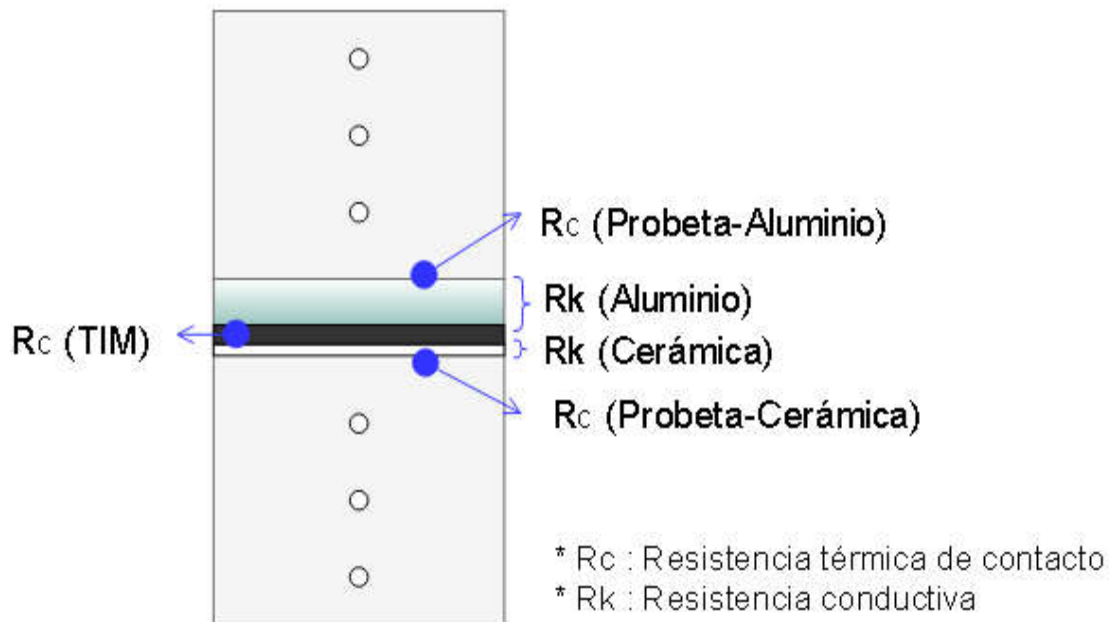


Figura 5.9: Esquema ilustrativo de las resistencias involucradas en los sandwiches CERÁMICA-TIM-ALUMINIO

La disposición en serie de las distintas resistencias térmicas hace que la resistencia térmica global de la muestra CERÁMICA-TIM-ALUMINIO tenga la siguiente expresión:

$$R_{G(cer-tim-Al)} = R_c(\text{probeta-cer}) + R_k(\text{cer}) + R_c(\text{cer-TIM-Al}) + R_k(\text{Al}) + R_c(\text{probeta-Al}) \quad (5.10)$$

En estos ensayos el objetivo es estudiar la evolución de la R_G que a su vez nos da una idea de la evolución de la RTC de los TIM's ya que podemos considerar que la variación debida al envejecimiento de las demás resistencias involucradas (R_c (Probeta-Cerámica), R_k (Cerámica), R_k (Aluminio o acero) y R_c (Probeta-Aluminio o acero)) es insignificante respecto a la variación de la RTC de los TIM's.

A continuación, se describe la metodología llevada a cabo en este tipo de ensayos empezando por los parámetros involucrados y terminando por una descripción de los pasos realizados en cada ensayo.

5.3.2. Parámetros involucrados

Los parámetros que intervienen en este tipo de ensayos son la temperatura de envejecimiento, el tiempo de envejecimiento, la temperatura de la muestra durante los ensayos y la presión aplicada a la muestra durante los ensayos.

Temperatura de envejecimiento

Como ya se ha comentado anteriormente, la idea de estos ensayos es simular las condiciones de trabajo de los TIM's en una aplicación en concreto como es el aprovechamiento del calor residual en chimeneas industriales mediante la instalación de módulos termoeléctricos. Por ello, las temperaturas a las que se van a mantener los TIM's durante el envejecimiento son las del foco frío y el foco caliente que corresponden a la temperatura del disipador (60° C) y a la de la chimenea (180° C) respectivamente.

El envejecimiento se realiza en dos hornos que mantienen la temperatura, uno a 60°C y el otro a 180°C.

Tiempo de envejecimiento

El tiempo de envejecimiento que permanecen los TIM's en los hornos es un total de 70 días (1680 horas). Dentro de ese periodo se realizan mediciones de resistencia térmica cada 20 días aproximadamente para estudiar su evolución.

Temperatura de la muestra durante los ensayos

En las mediciones que se realizan se busca que la temperatura de la muestra sea constante en todos los ensayos y tenga un valor de 100° C. Se hace de esta forma debido a que la temperatura de la muestra es un parámetro que influye directamente en el valor de la RTC y no se quiere que dicho parámetro contamine los resultados.

Presión aplicada durante los ensayos

Los generadores termoeléctricos que se utilizan en la chimenea están diseñados para trabajar a una presión de 1,4MPa (según hoja de características). En función de este dato se obtiene la fuerza que debe ejercer el actuador. La fuerza requerida se obtiene

multiplicando la presión deseada por el área de contacto de la muestra y restándole la fuerza equivalente al peso de la probeta superior y de las chapas y componentes acoplados al mismo (4,46Kg).

$$F_{actuador} = P_{deseada} * A_{contacto} - m_{probeta_sup\ y\ chapas} * g \quad (5.11)$$

Aplicando la anterior expresión el valor de $F_{actuador}$ obtenido es 2196,25N. Los datos utilizados son los siguientes:

- $P_{deseada} = 1,4MPa$
- $A_{contacto} = 0,0016m^2$
- $m_{probeta_sup\ y\ chapas} = 4,46Kg$
- $g = 9,81 \frac{N}{Kg}$

5.3.3. Pasos realizados en cada ensayo

- 1- En primer lugar, se prepara la muestra a ensayar. Dicha preparación consiste en montar el sándwich formado por una placa de acero o aluminio (según el tipo de muestra que se vaya a ensayar), el TIM que se quiere ensayar y una placa de cerámica. En la siguiente imagen se ve un ejemplo real de un sándwich utilizado para los ensayos.

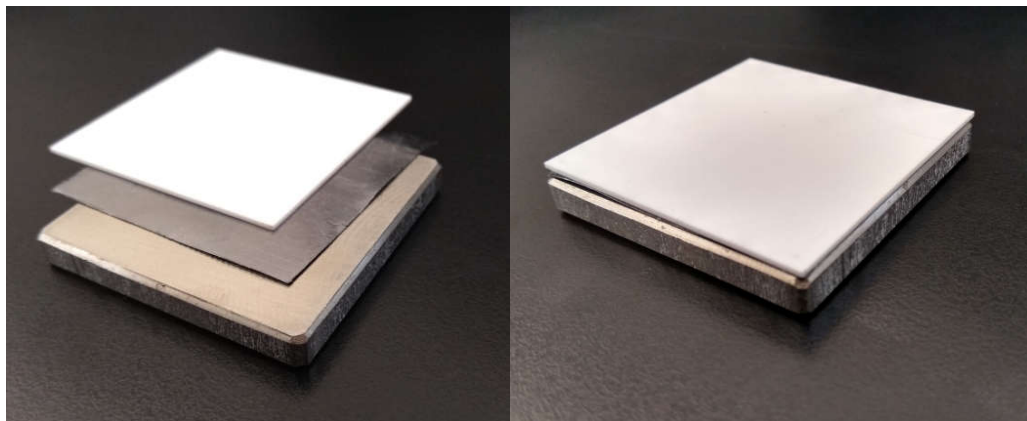


Figura 5.10: Ejemplo de sándwich ACERO-GRAFITO-CERÁMICA

- 2- El siguiente paso es colocar la muestra entre las probetas del banco de ensayos. Para ello, la posición de la probeta superior debe ser la posición "home" del actuador, en la que las dos probetas se encuentran más alejadas. La posición del actuador se controla con el programa PC Interface Software for RC.

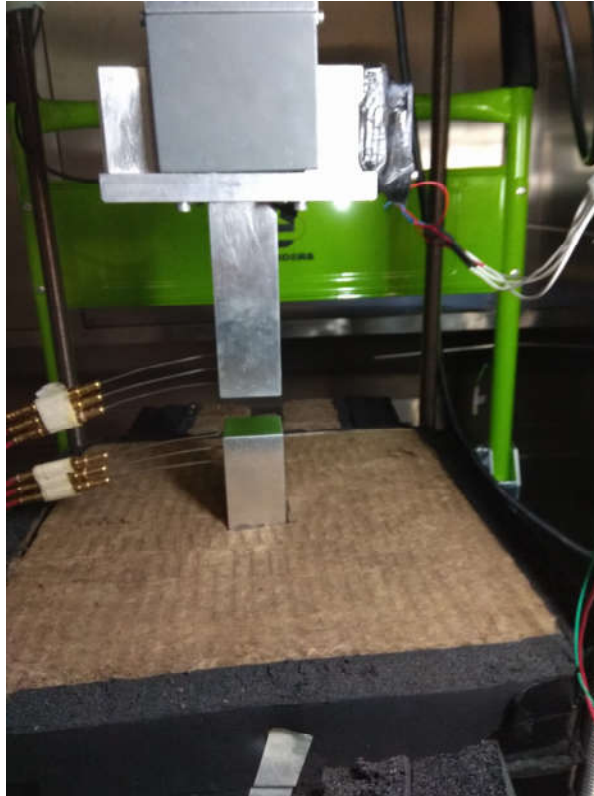


Figura 5.11: Probeta superior en posición "home"

- 3- El tercer paso es ordenar al actuador que descienda hasta la posición en la que la probeta superior entra en contacto con la muestra sin llegar a que el actuador entre en contacto con el sensor de presión. A continuación, se procede a colocar el aislante alrededor de las probetas.

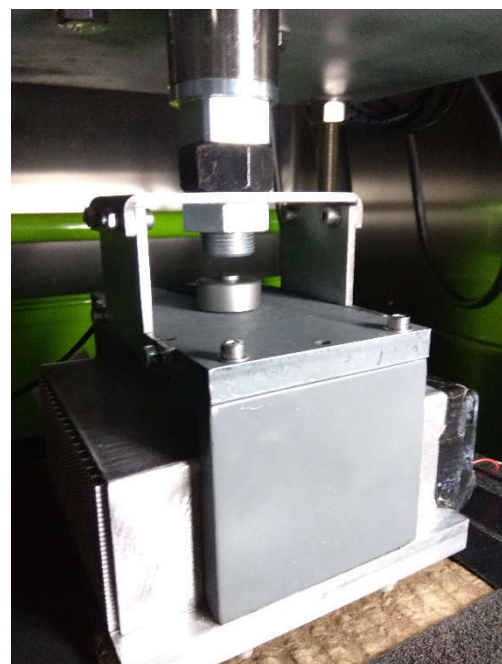
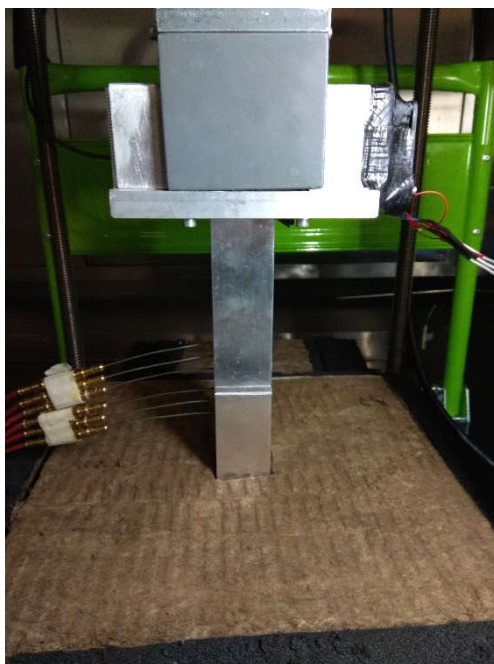


Figura 5.12: Probeta superior en contacto con la muestra sin ejercer presión

- 4- Una vez se tiene la muestra en contacto con las probetas y el aislante bien colocado, se procede a encender todas las fuentes de tensión para alimentar los distintos elementos. Los valores de tensión requeridos varían en función de las condiciones deseadas. Las distintas fuentes que se encienden son las que alimentan los siguientes elementos:
 - Generador
 - Ventiladores del túnel de viento inferior
 - Ventiladores del túnel de viento superior
- 5- El quinto paso consiste en abrir el programa AMR Data-Control de adquisición de datos en el que se monitoriza en tiempo real todos los datos proporcionados por los sensores de presión y temperatura.
- 6- Cuando se alcanza una estabilización en la temperatura de la muestra, es el momento de ordenarle al actuador que ejerza la fuerza deseada. Es importante no hacer este paso antes de que establezca la temperatura ya que las probetas de referencia no estarían totalmente dilatadas. Entonces la presión ejercida por el actuador aumentaría conforme se irían dilatando las probetas y sería complicado controlarla.
- 7- Se espera a que establezca tanto la presión ejercida sobre la muestra como las temperaturas y se guardan los datos obtenidos.
- 8- Se apagan las fuentes de tensión, se retira el aislante, se eleva la probeta superior y se retira la muestra ensayada.
- 9- Una vez la muestra ha sido ensayada, se mete al horno correspondiente para comenzar o continuar el ciclo de envejecimiento.
- 10- Una vez transcurridos 20 días, se saca la muestra del horno correspondiente y se vuelve al paso 2.

5.4. RTC en función de la presión

En este tipo de ensayos se quiere evaluar el efecto que tiene en la RTC la presión aplicada sobre la unión en la que se sitúan los TIM's. El objetivo es obtener una gráfica RTC- Presión para cada unión y ver a que niveles de presión se comportan mejor los materiales. Así como en los ensayos anteriores la presión se mantiene fija a 1,4MPa, en estos otros se realiza un barrido de presiones aumentando progresivamente la fuerza realizada por el actuador.

Mas tarde se explica el procedimiento. Antes de eso se van a describir los tipos de muestras a ensayar.

5.4.1. Tipos de muestras y resistencias térmicas involucradas

Se realizan dos tipos de muestras cuya diferencia reside en su estructura. A continuación, se hace una descripción de cada tipo.

Estructura tipo A

La estructura tipo A se compone de un sándwich cerámica-TIM-cerámica en cuyas caras exteriores se colocan láminas de grafito para mejorar el contacto entre el sándwich y las probetas. Con esta estructura se busca estudiar el comportamiento de los distintos TIM's en la aplicación de módulos de generación termoeléctrica dispuestos en cascada (con los módulos en dispuestos en cascada existen uniones cerámica-cerámica ya que sus caras exteriores son de este material).

A continuación, se muestra un esquema de la estructura de las muestras tipo A.

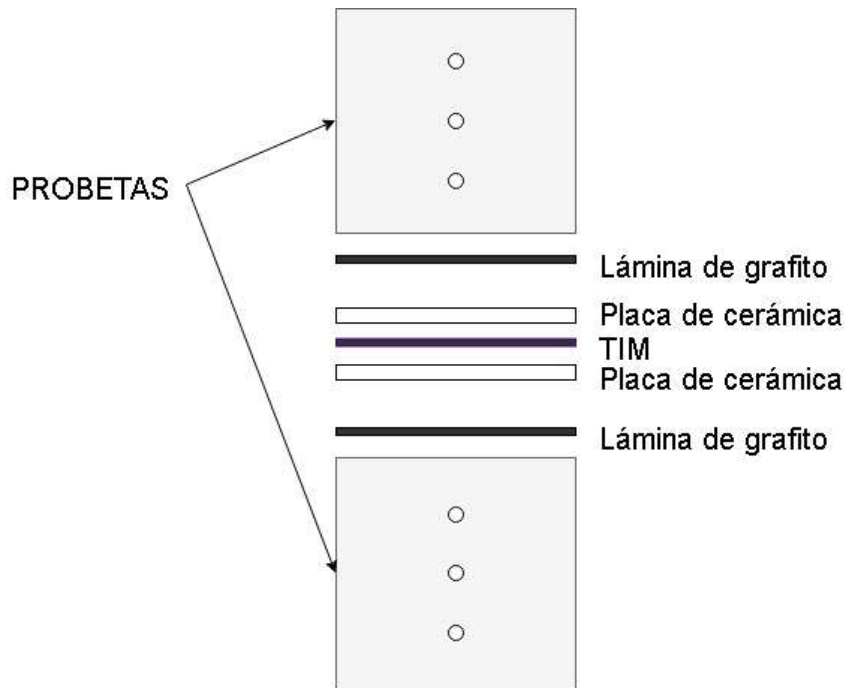


Figura 5.13: Esquema de la estructura de las muestras tipo A

Se realizan tres ensayos (uno para cada TIM) con estructura tipo A con probetas de acero.

Configuraciones ensayadas para la estructura tipo A:

Probetas de acero:

- A_AC_G: cerámica-grafito-cerámica
- A_AC_I: cerámica-indio-cerámica
- A_AC_P: cerámica-pasta-cerámica

Como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo, el equipo utilizado proporciona la resistencia global de la muestra que en el caso de la estructura tipo A tiene las siguientes componentes:

$$R_{G(A)} = R_{c_{gra(probete-cerámica)}} + R_{k_{cer}} + R_{c_{TIM(cerámica-cerámica)}} + R_{k_{cer}} + R_{c_{gra(probete-cerámica)}} \quad (5.12)$$

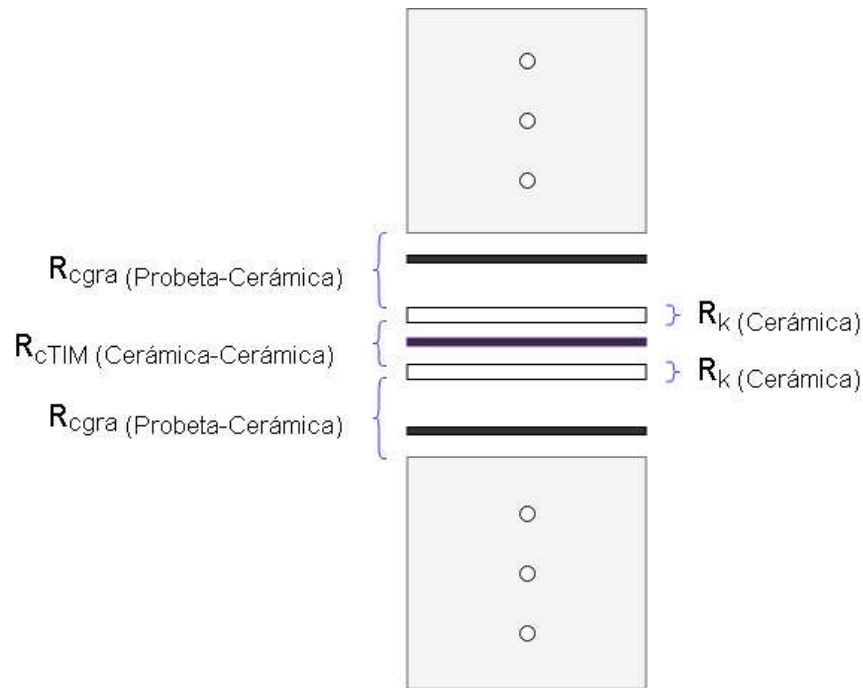


Figura 5.14: Esquema de las resistencias involucradas en las muestras tipo A

Agrupando términos iguales la expresión de la $R_{G(A)}$ queda de la siguiente manera:

$$R_{G(A)} = 2R_{cgra(probetea-cerámica)} + 2R_{kcer} + R_{cTIM(cerámica-cerámica)} \quad (5.13)$$

*El subíndice "c" se refiere a resistencia de contacto y el subíndice "k" a resistencia conductiva. En las resistencias de contacto se incluye entre paréntesis los elementos involucrados en el contacto.

Estructura tipo B

La estructura tipo B se compone de un sándwich TIM-cerámica-TIM situado entre las probetas. Con esta estructura se busca estudiar el comportamiento de los TIM's en las situaciones de las uniones chimenea-módulo (acero-cerámica) y disipador-módulo (aluminio-cerámica). Por ello en este caso se realizan los ensayos tanto con probetas de acero como con probetas de aluminio.

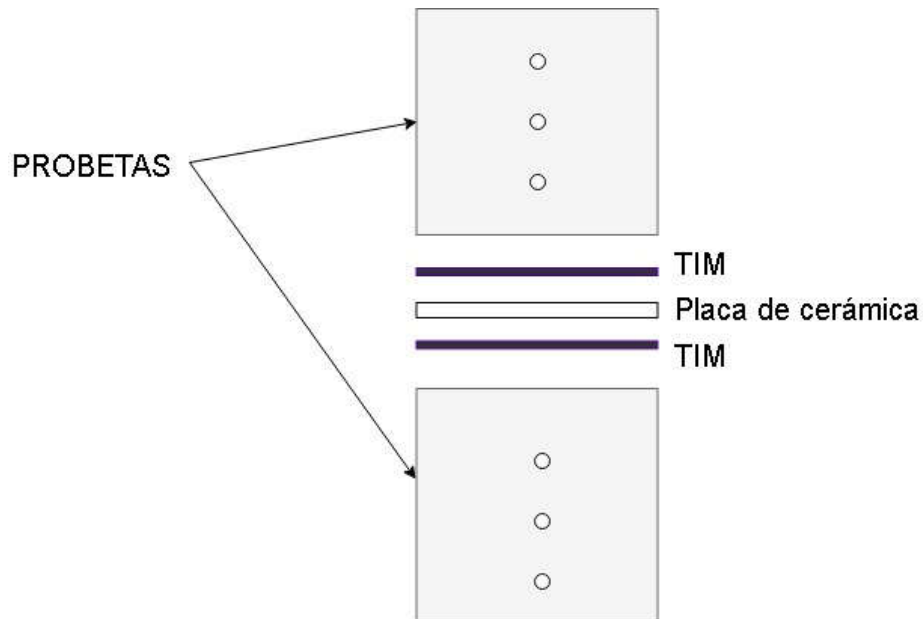


Figura 5.15: Esquema de la estructura de las muestras tipo B

Se realizan tres ensayos (uno para cada TIM) con estructura tipo B con probetas de acero y otros tres ensayos con estructura tipo B con probetas de aluminio:

Configuraciones ensayadas para la estructura tipo B:

Probetas de acero:

- B_AC_G: grafito-cerámica-grafito
- B_AC_I: indio-cerámica-indio
- B_AC_P: pasta-cerámica-pasta

Probetas de aluminio:

- B_AL_G: grafito-cerámica-grafito
- B_AL_I: indio-cerámica-indio
- B_AL_P: pasta-cerámica-pasta

En los ensayos se mide la resistencia global de la muestra que en el caso de la estructura tipo B tiene las siguientes componentes:

$$R_{G(B)} = R_{CTIM(\text{probeta-cerámica})} + R_{k_{cer}} + R_{CTIM(\text{probeta-cerámica})} \quad (5.14)$$

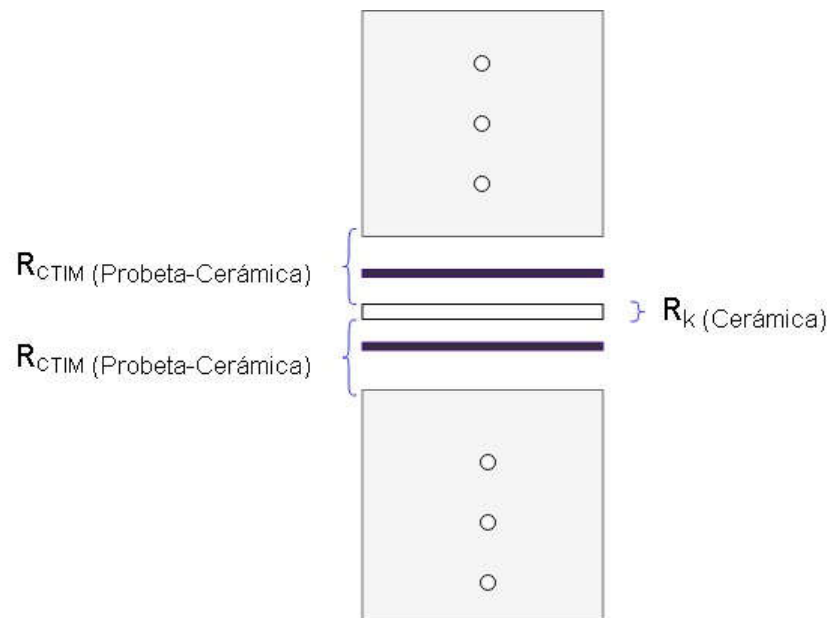


Figura 5.16: Esquema de las resistencias involucradas en las muestras tipo B

Agrupando términos iguales queda de la siguiente manera:

$$R_{G(B)} = 2R_{CTIM(\text{probeta-cerámica})} + R_{k_{cer}} \quad (5.15)$$

*El subíndice "c" se refiere a resistencia de contacto y el subíndice "k" a resistencia conductiva. En las resistencias de contacto se incluye entre paréntesis los elementos involucrados en el contacto.

Como el objetivo de estos ensayos no es estudiar la R_G de las muestras sino la RTC para cada TIM en cada situación (entre cerámica-acero y entre cerámica-aluminio) se va a realizar una estimación de esta.

Despejando la $R_{CTIM(\text{probeta-cerámica})}$ de la expresión de $R_{G(B)}$ se obtiene lo siguiente:

$$R_{CTIM(\text{probeta-cerámica})} = \frac{R_{G(B)} - R_{k_{cer}}}{2} \quad (5.16)$$

donde el valor de la resistencia global de la muestra ($R_{G(B)}$) es el obtenido mediante el banco de ensayos y el valor de la resistencia conductiva de la placa de cerámica por unidad de área ($R_{k_{cer}}$) se puede calcular considerando una conductividad térmica de la cerámica de $35 \frac{W}{mK}$ y un espesor de placa de 0,75mm (datos obtenidos de la Tesis Doctoral Estudio y desarrollo de sistemas termoeléctricos para el aprovechamiento del calor residual en la generación de energía eléctrica realizada por Álvaro Martínez Echeverri) mediante la siguiente expresión:

$$R_{k_{cer}} = \frac{\text{espesor}}{k_{cerámica}} \quad (5.17)$$

Aplicando la anterior expresión se obtiene un valor de $R_{k_{cer}} = 2,14 * 10^{-5} \frac{Km^2}{W}$.

5.4.2. Pasos realizados en cada ensayo

- 1- En primer lugar, se prepara la muestra a ensayar. Dicha preparación consiste en montar la estructura deseada, tipo A o tipo B, ambas descritas en el apartado anterior.

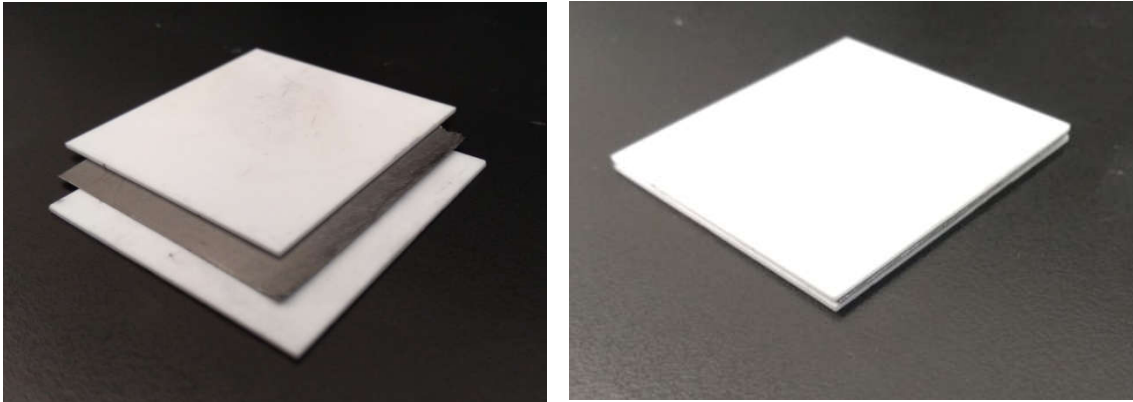


Figura 5.17: Ejemplo de muestra con estructura tipo A

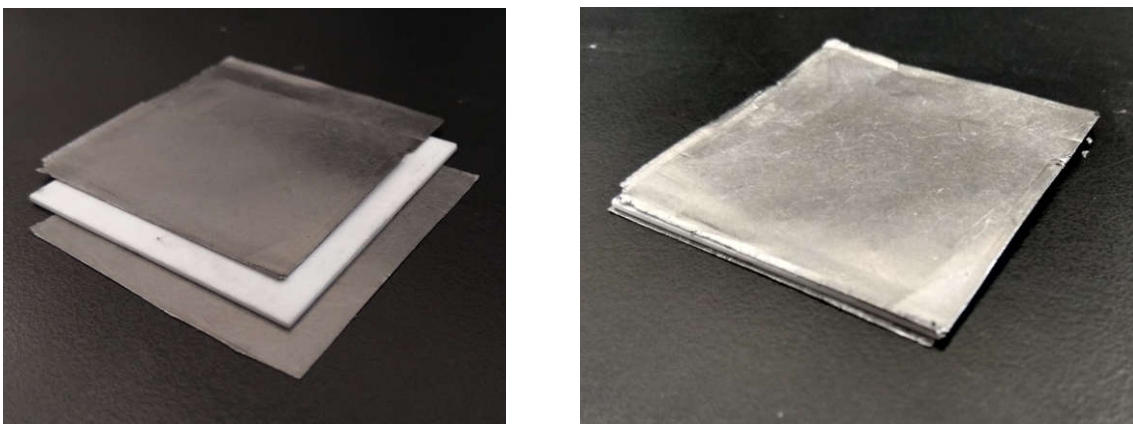


Figura 5.18: Ejemplo de muestra con estructura tipo B

- 2- El siguiente paso es colocar la muestra entre las probetas del banco de ensayos. Para ello, la posición de la probeta superior debe ser la posición "home" del actuador, en la que las dos probetas se encuentran más alejadas. La posición del actuador se controla con el programa PC Interface Software for RC.



Figura 5.19: Probeta superior en posición "home"

- 3- El tercer paso es ordenar al actuador que descienda hasta la posición en la que la probeta superior entra en contacto con la muestra sin llegar a que el actuador entre en contacto con el sensor de presión. A continuación, se procede a colocar el aislante alrededor de las probetas.

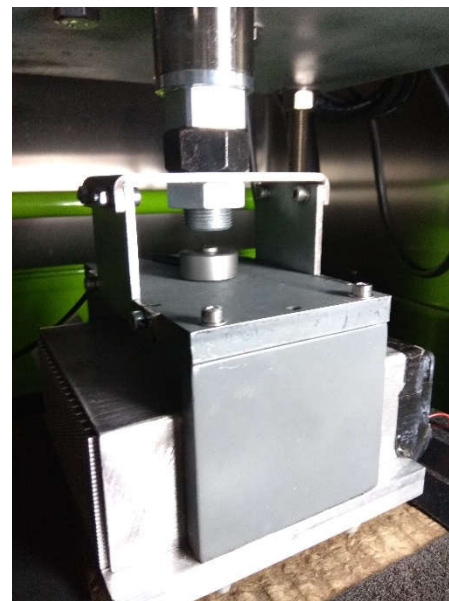
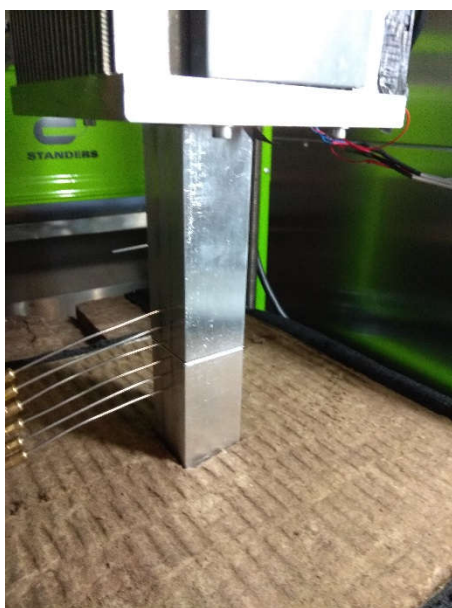


Figura 5.20: Probeta superior en contacto con la muestra sin ejercer presión

- 4- Una vez se tiene la muestra en contacto con las probetas y el aislante bien colocado, se procede a encender todas las fuentes de tensión para alimentar los distintos elementos. Los valores de tensión requeridos varían en función de las condiciones deseadas. Las distintas fuentes que se encienden son las que alimentan los siguientes elementos:
 - Generador
 - Ventiladores del túnel de viento inferior
 - Ventiladores del túnel de viento superior
- 5- El quinto paso consiste en abrir el programa AMR Data-Control de adquisición de datos en el que se monitoriza en tiempo real todos los datos proporcionados por los sensores de presión y temperatura.
- 6- Cuando se alcanza una estabilización en la temperatura de la muestra, es el momento de ordenarle al actuador que ejerza la fuerza deseada para el primer punto de presión (Es importante no hacer este paso antes de que estabilice la temperatura ya que las probetas de referencia no estarían totalmente dilatadas. Entonces la presión ejercida por el actuador aumentaría conforme se irían dilatando las probetas y sería complicado controlarla).

Una vez aplicado el primer punto de presión se espera a que se estabilicen las temperaturas y la presión. Cuando se alcanza dicha estabilización es el momento de aplicar el segundo punto de presión. Cuando se alcanza la estabilización en el segundo punto de presión se aplica el tercer punto de presión y así sucesivamente hasta conseguir cinco puntos. Los porcentajes de fuerza del actuador aplicados en los sucesivos puntos son: 12%, 24%, 36%, 48% y 60%.
- 7- Al cabo de la última estabilización se guardan los datos obtenidos.
- 8- Finalmente se apagan las fuentes de tensión, se retira el aislante, se eleva la probeta superior y se retira la muestra ensayada.

5.5. Tratamiento de datos

En este apartado se aborda el proceso realizado con los datos obtenidos mediante el banco de ensayos, cuyo objetivo es obtener los valores de la resistencia global de las muestras.

Como ya se ha explicado en el apartado 5.1. los datos necesarios para realizar el cálculo de la resistencia térmica global de la muestra son los siguientes:

Temperaturas

Se puede observar en las expresiones 5.2. y 5.3. que las temperaturas involucradas en el cálculo de la resistencia global son T_1 , T_3 , T_4 , T_6 . Estas temperaturas son obtenidas mediante las sondas Pt-100 las cuales llevan asociadas sus correspondientes incertidumbres y correcciones.

La incertidumbre y corrección asociada a cada sonda, se ha medido en el laboratorio de metrología AC6 Metrología S.L para distintos rangos de temperatura.

Pt100-1			Pt100-3		
$T_{\text{patrón}}$ (°C)	Corrección (°C)	$u(T_1)$	$T_{\text{patrón}}$ (°C)	Corrección (°C)	$u(T_3)$
0	0,135	0,084	0	0,123	0,089
20,004	0,024	0,084	20,004	0,054	0,090
50,007	-0,053	0,085	50,007	-0,013	0,090
80,010	-0,120	0,085	80,01	-0,080	0,090
100,006	-0,154	0,085	100,006	-0,104	0,091
120,02	-0,160	0,085	120,02	-0,110	0,091
150,007	-0,158	0,085	150,007	-0,083	0,091
180,007	-0,043	0,085	180,007	0,002	0,092
200	0,034	0,085	200	0,270	0,095

Pt100-4			Pt100-6		
$T_{\text{patrón}}$ (°C)	Corrección (°C)	$u(T_4)$	$T_{\text{patrón}}$ (°C)	Corrección (°C)	$u(T_6)$
0	0,110	0,087	0	0,253	0,087
20,004	0,034	0,088	25,025	0,265	0,088
50,007	-0,003	0,088	50,041	0,261	0,088
80,01	-0,030	0,088	80,008	0,293	0,088
100,006	-0,024	0,088	100,013	0,338	0,088
120,02	0,000	0,088	120,074	0,394	0,088
150,007	0,037	0,088	140,013	0,458	0,088
180,007	0,167	0,089	179,899	0,754	0,089
200	0,576	0,092	200	1,686	0,092

Tabla 5.3: Incertidumbres asociadas a la medición de temperatura de las distintas sondas Pt-100

Como en los ensayos las temperaturas de las sondas no coinciden exactamente con los valores que aparecen en sus respectivas tablas, para obtener las incertidumbres y correcciones se realizan interpolaciones. Una vez se tienen las incertidumbres de las temperaturas T_1 , T_3 , T_4 y T_6 se incluyen en la expresión 5.8. para obtener la incertidumbre de la resistencia térmica global.

Posición de los puntos donde se miden las temperaturas en las probetas

En las expresiones 5.2., 5.3., y 5.4. utilizadas para calcular la resistencia global de la muestra, aparecen las longitudes L_1 , L_2 , L_3 , y L_4 . Estas longitudes representan la distancia entre los puntos de las probetas donde se miden las temperaturas.

Para conocer las incertidumbres asociadas, es necesario realizar una serie de cálculos ya que los datos proporcionados por el laboratorio de metrología encargado de medir las probetas no incluyen las longitudes anteriormente mencionadas ya que por motivos de facilidad de medida y precisión es preferible medir otras longitudes.

A continuación, se detallan las medidas proporcionadas por el laboratorio de metrología con sus correspondientes incertidumbres y cómo a partir de estas, se calculan las medidas e incertidumbres de las longitudes requeridas para el cálculo de la resistencia global de la muestra y su incertidumbre (se explica el proceso para las medidas de la probeta inferior L_1 y L_2 . Las de la probeta superior se calculan de forma análoga)

- **Medidas proporcionadas por el laboratorio de metrología:**

Probeta Acero inferior		
	Medida (mm)	Incertidumbre (mm)
a	5,0488	0,0043
b	15,041	0,012
c	25,0425	0,0039
Da	1,517	0,006
Db	1,5235	0,0099
Dc	1,524	0,012

Tabla 5.4: Dimensiones de la probeta de acero inferior

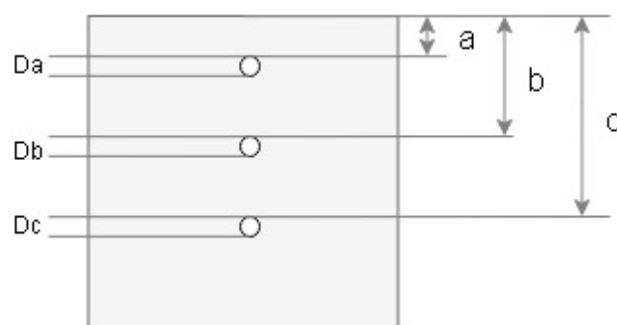


Figura 5.21: Esquema de las dimensiones de la probeta

- **Medidas necesarias para el cálculo de la resistencia térmica global**

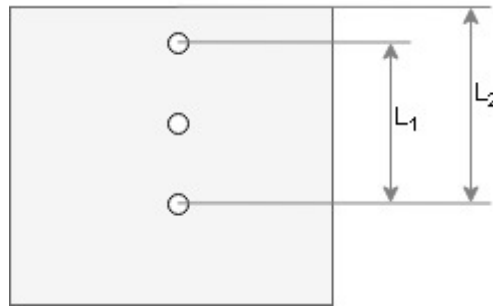


Figura 5.22: Esquema de las dimensiones requeridas para el cálculo de R_G

- **Cálculo de L_1 y L_2 en función de los datos disponibles**

Las longitudes L_1 y L_2 se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$L_1 = c - a \quad (5.18)$$

$$L_2 = c \quad (5.19)$$

- **Cálculo de $u(L_1)$ y $u(L_2)$ en función de los datos disponibles**

En el cálculo de las incertidumbres $u(L_1)$ y $u(L_2)$, hay que tener en cuenta el juego existente entre las sondas y los agujeros ya que el punto exacto de medida de temperatura no es la pared interior de los agujeros sino la superficie exterior de las sondas. En la siguiente figura se representa un esquema del juego entre sonda y agujero:

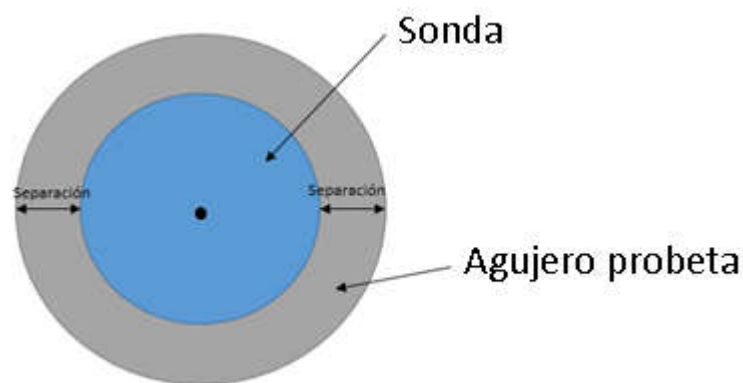


Figura 5.23: Esquema del juego entre la sonda y el agujero de la probeta

El juego y la separación se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$Juego_i = D_i - D_{sonda} \quad (5.20)$$

$$Separación_i = \frac{Juego}{2} \quad (5.21)$$

*El diámetro de las sondas es 1,5mm.

Una vez calculadas las separaciones entre agujeros y sondas se puede realizar el cálculo de las incertidumbres de las medidas L_1 y L_2 :

$$u(L_1) = u(a) + u(c) + Separación_1 + Separación_3 + u(D_a) + u(D_c) \quad (5.22)$$

$$u(L_2) = u(c) + u(D_c) + Separación_3 \quad (5.23)$$

Queda ya explicado el cálculo de incertidumbres según los datos obtenidos por el banco.

A través del AMR Data (software de obtención de datos) se recogen las temperaturas proporcionadas por las sondas cada 60 segundos. Para calcular la resistencia térmica global de cada estabilización los valores de temperatura utilizados son un promedio de los últimos 15 valores registrados por el software.

6. Resultados experimentales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos referentes a todos los ensayos realizados. El capítulo se divide en dos partes. En primer lugar, se abordan los resultados obtenidos en el estudio del envejecimiento de los distintos materiales de interfaz térmica continuando con los resultados referentes a los ensayos de la resistencia térmica de contacto en función de la presión aplicada sobre la unión.

6.1. Resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento

El envejecimiento de los materiales de interfaz térmica debido al estrés térmico que soportan es un aspecto muy a tener en cuenta a la hora de escoger uno u otro material para su utilización en la aplicación a la que esté destinado. La exposición de este tipo de materiales a altas temperaturas durante periodos largos de tiempo conlleva un deterioro del material, que provoca un aumento en la resistencia térmica de contacto de la unión y por consiguiente una peor conducción del flujo de calor.

La mayoría de este tipo de materiales están enfocados a aplicaciones relacionadas con la disipación del calor producido por dispositivos electrónicos cuyas temperaturas máximas raramente sobrepasan los 100°C. En cambio, en la aplicación en la que se enfoca este trabajo, se alcanzan temperaturas superiores ya que la temperatura de la superficie exterior de las chimeneas industriales se mueve entorno a los 180°C. Por ello surge la necesidad de estudiar el comportamiento de los materiales de interfaz térmica expuestos a estas temperaturas.

Con el objetivo de simular tanto el entorno del contacto con la chimenea como el del contacto con el disipador se han realizado dos tipos de envejecimiento. En el primer caso la temperatura de envejecimiento utilizada es de 180°C (contacto con la chimenea) y en el segundo caso de 60°C (contacto con el disipador). Se han ensayado un total de 12 muestras. A continuación, se exponen las 12 muestras explicando antes la nomenclatura utilizada para distinguirlas.

Nomenclatura utilizada para distinguir las muestras

El nombre de cada muestra tiene la siguiente configuración: K_L_M

La posición ``K`` hace referencia al TIM:

- G: Grafito
- I: Indio
- P: Pasta térmica

La posición ``L`` hace referencia al material empleado para el sándwich:

- AC: Acero-TIM-Cerámica
- AL: Cerámica-TIM-Aluminio

La posición ``M`` hace referencia a la temperatura de envejecimiento:

- C: Horno caliente (180°C)
- F: Horno frío (60°C)

La siguiente tabla incluye las 12 muestras estudiadas nombradas en base a la nomenclatura anteriormente explicada:

Horno a 180°C		Horno a 60°C	
Sándwich acero	Sándwich aluminio	Sándwich acero	Sándwich aluminio
G_AC_C	G_AL_C	G_AC_F	G_AL_F
I_AC_C	I_AL_C	I_AC_F	I_AL_F
P_AC_C	P_AL_C	P_AC_F	P_AL_F

Tabla 6.1: Nombre de las muestras ensayadas en los ensayos de R_t - Envejecimiento

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación de ambos entornos.

6.1.1. Envejecimiento a 180°C

En este apartado se exponen las tablas de los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento a 180°C. Dichas tablas contienen los valores de resistencia térmica obtenidos para cada muestra en función de los días que han permanecido en el horno a 180°C. También incluyen la presión y temperatura de la muestra en el momento en el que se mide la resistencia térmica, así como la incertidumbre asociada al valor obtenido.

Además, se incluyen gráficas comparativas de la evolución de la resistencia térmica de las distintas muestras frente a los días de exposición en el horno.

Finalmente se realizan comentarios de los resultados obtenidos.

Muestras tipo ACERO-TIM-CERÁMICA

G_AC_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm²/W)	u (%)	u (°Cm²/ W)
1457,46	107,42	0	4,61E-04	20,38%	9,40E-05
1488,91	103,97	21	5,27E-04	20,38	1,07E-04
1490,57	94,62	49	5,41E-04	20,48	1,11E-04
1506,73	107,08	70	5,23E-04	20,36	1,07E-04

Tabla 6.2: Resultados obtenidos para la muestra G_AC_C

I_AC_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm²/W)	u (%)	u (°Cm²/ W)
1451,17	102,44	0	4,74E-04	20,4	9,68E-05
1513,77	104,08	21	5,12E-04	20,39	1,04E-04
1439,19	92,6	49	5,16E-04	20,52	1,06E-04
1520,82	99,65	70	5,95E-04	20,35	1,21E-04

Tabla 6.3: Resultados obtenidos para la muestra I_AC_C

P_AC_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm²/W)	u (%)	u (°Cm²/ W)
1346,01	101,87	0	4,29E-04	20,45%	8,76E-05
1476,48	103,47	21	1,28E-03	20,17	2,59E-04
1447,89	91,97	49	1,59E-03	20,23	3,21E-04
1411,85	105,03	70	1,72E-03	20,16	3,46E-04

Tabla 6.4: Resultados obtenidos para la muestra P_AC_C

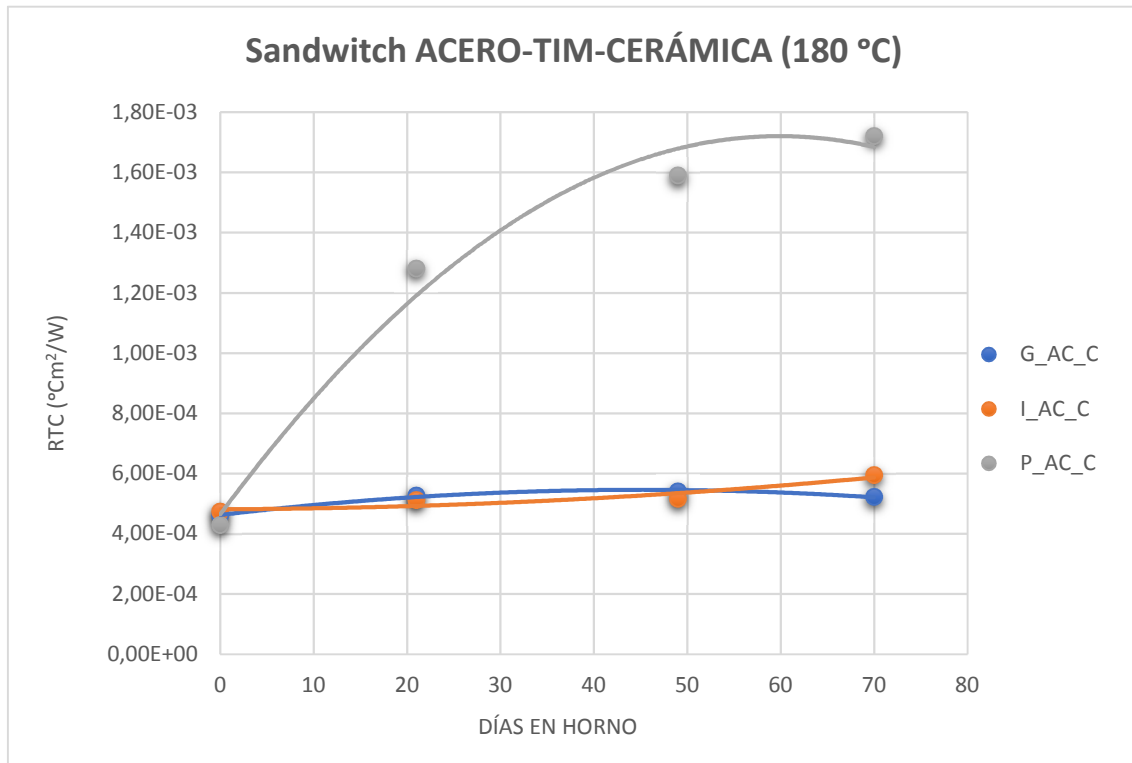


Figura 6.1: Gráfica comparativa de la Rt en función de días en horno a 180°C de las muestras X_AC_C

En los valores de resistencia térmica obtenidos para las muestras ACERO-TIM-CERÁMICA se puede observar lo siguiente:

- La resistencia térmica de la muestra P_AC_C, realizada con pasta térmica tiene una clara tendencia ascendente. Ya en los primeros 20 días de exposición a 180°C, el valor de resistencia térmica sufre un aumento de casi un 200% de su valor inicial. En los siguientes periodos el aumento porcentual se va reduciendo, aunque el valor de resistencia sigue aumentando considerablemente. El aumento total en los 70 días de exposición es de un 300%.
- En el caso de la muestra I_AC_C, realizada con indio, se observa una tendencia ascendente mucho menos acusada que en el caso anterior. El valor de la resistencia térmica de la muestra sufre un aumento total del 25,5% en los 70 días de exposición. Su comportamiento es notablemente mejor que el de la muestra realizada con pasta térmica.

- La muestra G_AC_C, realizada con grafito, es la que mejor se comporta a la vista de los resultados anteriores. En los primeros 20 días tiene un comportamiento muy parecido al de la muestra realizada con indio sufriendo un aumento en el valor de resistencia térmica. A partir de ahí el valor se mantiene constante, cosa que no ocurre en la muestra realizada con indio. El aumento total de resistencia de la muestra en 70 días de exposición es de un 8,48% (la muestra con indio sufre un aumento total del 25,5%). Por todo ello, podría decirse que para periodos largos de más de 70 días de exposición a 180° C el material que mejor se comporta es el grafito.

Muestras tipo CERÁMICA-TIM-ALUMINIO

G_AL_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1379,45	105,74	0	2,24E-04	21,29	4,78E-05
1526,2	101,53	21	2,46E-04	21,28	5,23E-05
1500,93	90,51	49	2,40E-04	21,89	5,26E-05
1507,14	101,07	70	2,43E-04	21,38	5,21E-05

Tabla 6.5: Resultados obtenidos para la muestra G_AL_C

I_AL_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1394,53	102,71	0	2,38E-04	21,21	5,04E-05
1501,34	98,28	21	2,47E-04	21,26	5,24E-05
1468,61	90,5	49	3,14E-04	21,1	6,63E-05
1444,58	101,49	70	3,65E-04	20,67	7,55E-05

Tabla 6.6: Resultados obtenidos para la muestra I_AL_C

P_AL_C					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1410,77	99,27	0	1,85E-04	21,98	4,06E-05
1507,14	99,64	21	4,95E-04	20,42	1,01E-04
1517,5	91,49	49	4,43E-04	20,65	9,14E-05
1494,71	103,5	70	5,24E-04	20,4	1,07E-04

Tabla 6.7: Resultados obtenidos para la muestra P_AL_C

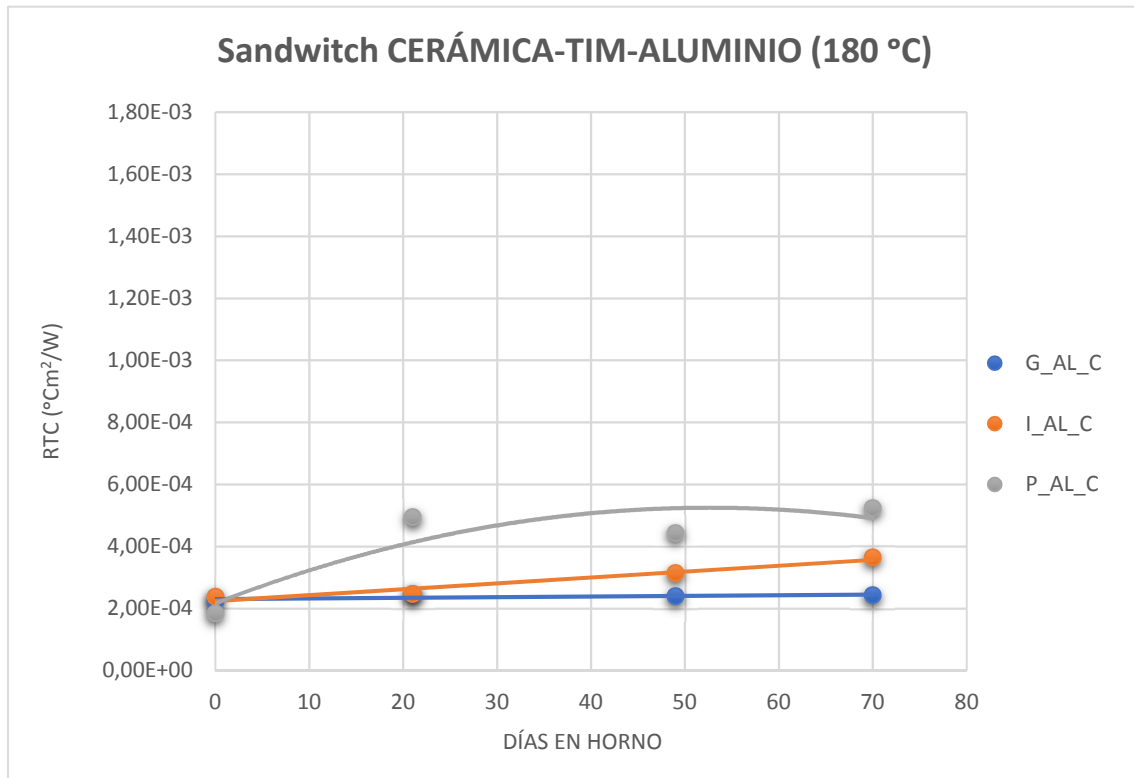


Figura 6.2: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 180°C de las muestras X_{AL_C}

En los valores de resistencia térmica obtenidos para las muestras CERÁMICA-TIM-ALUMINIO se puede observar lo siguiente:

- La resistencia térmica de la muestra P_AL_C, realizada con pasta térmica tiene una clara tendencia ascendente en los primeros 20 días de exposición. En este periodo su valor sufre un aumento del 167%. Después de este periodo se observa un cambio en la tendencia ya que el valor de resistencia pasa de ir en aumento a mantenerse más o menos constante (Cosa que no ocurre en los ensayos realizados para la muestra P_AC_C. Este hecho podría deberse a la cantidad de pasta utilizada para una y otra muestra ya que esta variable no se ha tenido en cuenta a la hora de prepararlas). El aumento porcentual total es 183%.
- La resistencia térmica de la muestra I_AL_C, realizada con indio, tiene una tendencia ascendente clara, aunque mucho menos acusada que la tendencia de la muestra P_AL_C. El aumento porcentual de esta muestra al cabo de 70 días de exposición es de un 53,4%.

- Nuevamente, como en el caso de las muestras realizadas con acero, la muestra G_AL_C, realizada con grafito, es la que mejor comportamiento presenta ante periodos largos de exposición a 180°C. El valor de resistencia sufre un aumento del 8,5% al cabo de 70 días de exposición.

6.1.2. Envejecimiento a 60°C

A continuación, se exponen las tablas de los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento a 60°C. Dichas tablas contienen los valores de resistencia térmica obtenidos para cada muestra en función de los días que han permanecido en el horno a 60°C. También incluyen la presión y temperatura de la muestra en el momento en el que se mide la resistencia térmica, así como la incertidumbre asociada al valor obtenido.

Además, se incluyen gráficas comparativas de la evolución de la resistencia térmica de las distintas muestras frente a los días de exposición en el horno.

Finalmente se realizan comentarios de los resultados obtenidos.

Muestras tipo ACERO-TIM-CERÁMICA

G_AC_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1400,45	99,23	0	5,32E-04	20,35	1,08E-04
1476,48	100,61	21	5,33E-04	20,38	1,09E-04
1476,07	113,28	49	5,74E-04	20,27	1,16E-04
1420,55	98,16	70	5,11E-04	20,44	1,04E-04

Tabla 6.8: Resultados obtenidos para la muestra G_AC_F

I_AC_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1405,88	100,66	0	5,20E-04	20,38	1,06E-04
1519,99	101,6	21	5,06E-04	20,4	1,03E-04
1551,06	112,45	49	5,13E-04	20,32	1,04E-04
1482,7	98,15	70	4,81E-04	20,45	9,38E-05

Tabla 6.9: Resultados obtenidos para la muestra I_AC_F

P_AC_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm²/W)	u (%)	u (°Cm²/ W)
1400,95	103,88	0	5,00E-04	20,40%	1,02E-04
1519,99	102,35	21	5,07E-04	20,4	1,03E-04
1504,24	113,32	49	4,94E-04	20,33	1,00E-04
1426,76	101,06	70	5,03E-04	20,42	1,03E-04

Tabla 6.10: Resultados obtenidos para la muestra P_AC_F

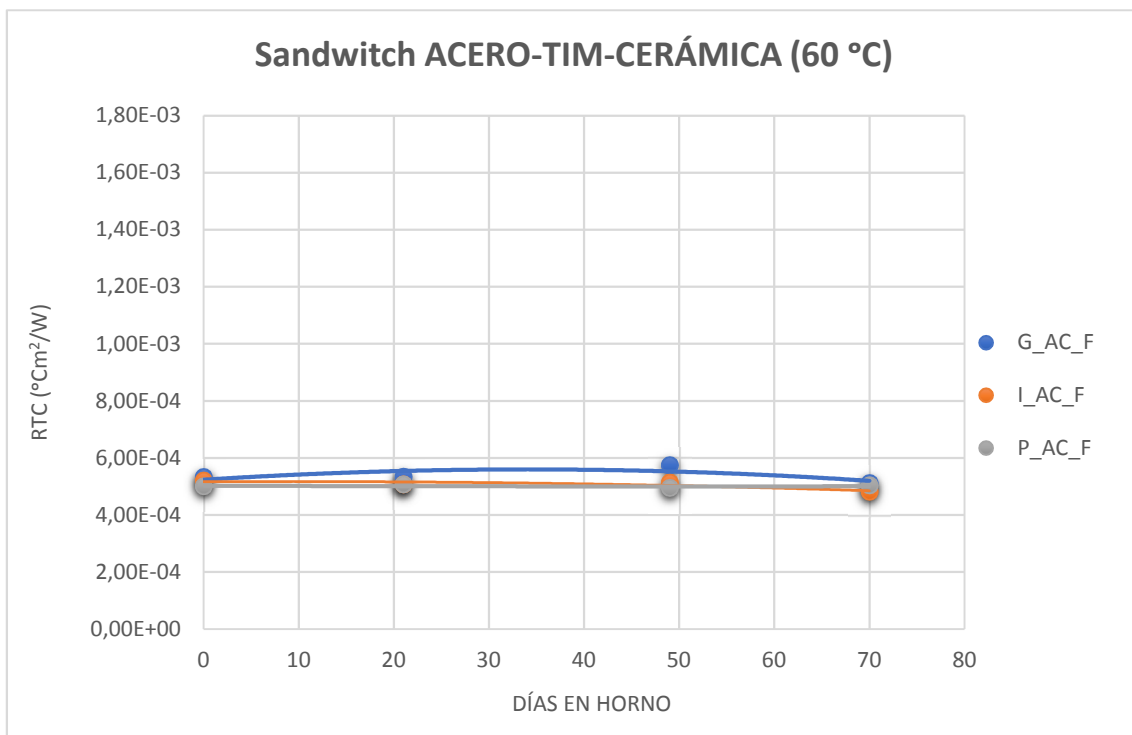


Figura 6.3: Gráfica comparativa de la Rt en función de días en horno a 60°C de las muestras X_AC_F

En los valores de resistencia térmica obtenidos para las muestras ACERO-TIM-CERÁMICA se puede observar lo siguiente: La variación de la resistencia térmica en general de las muestras ACERO-TIM-CERÁMICA expuestas a periodos largos de tiempo a 60°C de temperatura es muy pequeña como para poder sacar conclusiones al respecto.

Teniendo en cuenta que las incertidumbres asociadas a los valores obtenidos son de mayor magnitud que la propia variación de la resistencia térmica en todas las muestras, se puede concluir que en ningún caso se producen cambios significativos en la resistencia térmica de las muestras al ser expuestas a una temperatura de 60°C durante un periodo de 70 días.

Muestras tipo CERÁMICA-TIM-ALUMINIO

G_AL_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1396,31	103,38	0	2,32E-04	21,38	4,95E-05
1480,21	105,25	21	2,19E-04	21,52	4,71E-05
1532,42	110,81	49	2,08E-04	21,47	4,47E-05
1488,5	101,57	70	2,06E-04	21,83	4,51E-05

Tabla 6.11: Resultados obtenidos para la muestra G_AL_F

I_AL_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1376,71	102,64	0	2,26E-04	21,48	4,48E-05
1495,13	104,01	21	2,40E-04	21,29	5,12E-05
1501,34	104,77	49	2,38E-04	21,27	5,05E-05
1484,35	98	70	1,89E-04	22,19	4,20E-05

Tabla 6.12: Resultados obtenidos para la muestra I_AL_F

P_AL_F					
PRESIÓN (kPa)	Tª (°C)	DÍAS HORNO	Rt (°Cm ² /W)	u (%)	u (°Cm ² / W)
1443,96	101,21	0	2,05E-04	21,78	4,46E-05
1638,07	106,34	21	2,46E-04	21,23	5,22E-05
1582,14	106,8	49	1,87E-04	21,9	4,09E-05
1482,7	98,54	70	2,04E-04	21,91	4,47E-05

Tabla 6.13: Resultados obtenidos para la muestra P_AL_F

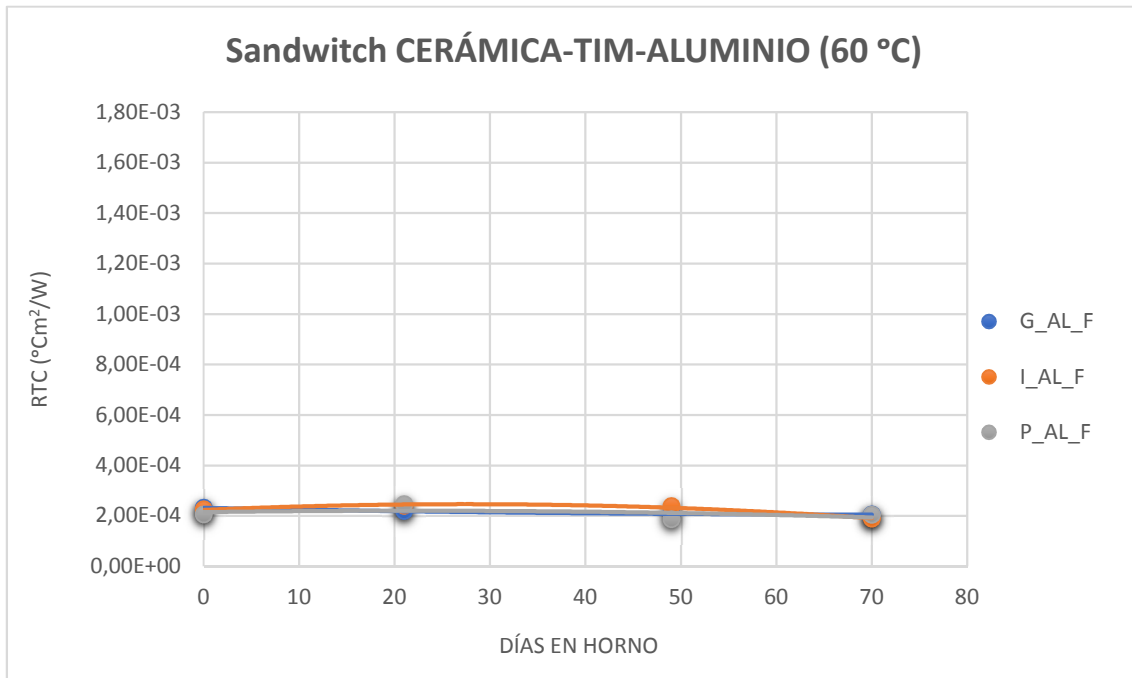


Figura 6.4: Gráfica comparativa de la R_t en función de días en horno a 60°C de las muestras X_AL_F

En los valores de resistencia térmica obtenidos para las muestras CERÁMICA-TIM-ALUMINIO se puede observar lo siguiente: Como en el caso de las muestras ACERO-TIM-CERÁMICA, la variación de la resistencia térmica en general de las muestras CERÁMICA-TIM-ALUMINIO es muy pequeña.

De nuevo se puede concluir que en ningún caso se producen cambios significativos en la resistencia térmica de las muestras al ser expuestas a una temperatura de 60°C durante un periodo de 70 días.

6.2. Resultados obtenidos en los ensayos de resistencia térmica en función de la presión aplicada

La presión aplicada en la zona de contacto entre dos materiales es una variable que afecta directamente al valor de resistencia térmica de contacto de la unión. Esto ocurre debido a la deformación de las superficies de los materiales provocada por la presión a la que están sometidos. Dicha deformación hace que se adapten mejor al relieve de forma que existen menos huecos entre ellos y la conducción de calor se da con mayor facilidad.

En este tipo de ensayos se busca observar la evolución de la resistencia térmica de contacto de los diferentes TIM's en los entornos relacionados con el aprovechamiento del calor residual en chimeneas industriales, cuando son sometidos a distintos valores de presión.

El apartado se divide en dos partes fundamentadas en los dos tipos de estructura de las muestras que se han ensayado (detallados en el apartado 5.4.1.). Los dos tipos de estructuras son:

- **Estructura tipo A:** sándwich CERÁMICA-TIM-CERÁMICA en cuyas caras exteriores se colocan láminas de grafito.
- **Estructura tipo B:** sándwich TIM-CERÁMICA-TIM.

A continuación, se describe la nomenclatura utilizada para nombrar a las diferentes muestras.

Nomenclatura utilizada para distinguir las muestras

El nombre de cada muestra tiene la siguiente configuración K_L_M

La posición K hace referencia al tipo de estructura que tiene la muestra: al material de las probetas del banco de ensayos:

- A: La estructura de la muestra es la estructura tipo A
- B: La estructura de la muestra es la estructura tipo B

La posición L hace referencia al material de las probetas del banco de ensayos:

- AC: Las probetas son de acero
- AL: Las probetas son de aluminio

La posición M hace referencia al TIM con el que se ha realizado la muestra:

- G: Grafito
- I: Indio
- P: Pasta térmica

En la siguiente tabla aparecen todas las muestras ensayadas en este tipo de ensayos:

Estructura tipo A	Estructura tipo B	
Probetas de acero	Probetas de acero	Probetas de aluminio
A_AC_G	B_AC_G	B_AL_G
A_AC_I	B_AC_I	B_AL_I
A_AC_P	B_AC_P	B_AL_P

Tabla 6.14: Nomenclatura de las muestras ensayadas en los ensayos de R_t -Presión

Además de los ensayos que aparecen en la tabla 6.14. se han realizado dos ensayos adicionales con el objetivo de comprobar la repetibilidad del equipo utilizado. Al final del capítulo se muestran los resultados obtenidos para dichos ensayos.

6.2.1. Resultados obtenidos con estructura tipo A

La estructura tipo A se ensaya con el objetivo de estudiar el comportamiento de la resistencia térmica de la unión involucrada en el caso de disponer módulos termoelectrónicos en cascada, de manera que las superficies en contacto con el TIM son ambas de cerámica. En este tipo de ensayos se compara la resistencia térmica global de la muestra cuyo resultado es el sumatorio de todas las resistencias involucradas desde la superficie superior de la probeta inferior hasta la superficie inferior de la probeta superior. Las resistencias involucradas aparecen en la expresión (5.12).

Considerando que $R_{k_{cer}}$ es constante y que $R_{c_{gra(probete-cerámica)}}$ es constante para cada punto de presión aplicado, se puede decir que la única resistencia que va a influir en la variación de la resistencia térmica global de la muestra es la resistencia de contacto $R_{c_{TIM(cerámica-cerámica)}}$. Por ello, se puede hacer una comparativa (de modo indirecto) de las distintas resistencias térmicas de contacto de los distintos TIM's.

En lo que sigue, se presentan los resultados obtenidos. En primer lugar, se expone una tabla de resultados para cada muestra ensayada en la que aparecen los distintos puntos de estabilización con sus respectivos valores de presión aplicada, temperatura de la muestra

y resistencia térmica global de la muestra incluyendo su incertidumbre. En segundo lugar, se incluye una gráfica comparativa relativa a las distintas muestras. Por último, se realizan comentarios analizando los resultados obtenidos.

Muestras con estructura tipo A y probetas de acero

A_AC_G					
	P (KPa)	Tª (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (%)	u (°C·m²/W)
1ª Estabilización	28,39	112,96	8,79E-04	20,19	1,77E-04
2ª Estabilización	556,25	111,73	2,93E-04	20,8	6,10E-05
3ª Estabilización	931,22	111,02	2,41E-04	21,14	5,09E-05
4ª Estabilización	1181,06	110,48	2,22E-04	21,32	4,73E-05
5ª Estabilización	1517,92	110,11	2,08E-04	21,49	4,47E-05
6ª Estabilización	1727,98	109,85	2,03E-04	21,57	4,38E-05

Tabla 6.15: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_G

A_AC_I					
	P (KPa)	Tª (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (%)	u (°C·m²/W)
1ª Estabilización	28,39	111,35	1,07E-03	20,19	2,16E-04
2ª Estabilización	534,29	110,45	3,10E-04	20,81	6,46E-05
3ª Estabilización	901,8	109,7	2,37E-04	21,3	5,04E-05
4ª Estabilización	1186,45	109,12	2,14E-04	21,57	4,62E-05
5ª Estabilización	1491,81	108,68	2,01E-04	21,78	4,37E-05
6ª Estabilización	1709,75	108,38	1,94E-04	21,89	4,26E-05

Tabla 6.16: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_I

A_AC_P					
	P (KPa)	Tª (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (%)	u (°C·m²/W)
1ª Estabilización	28,39	104,54	7,85E-04	20,24	1,59E-04
2ª Estabilización	530,98	104	2,77E-04	21,01	5,82E-05
3ª Estabilización	950	103,27	2,26E-04	21,47	4,84E+00
4ª Estabilización	1203,02	102,66	2,12E-04	21,66	4,59E-05
5ª Estabilización	1543,19	102,24	1,99E-04	21,87	4,35E+00
6ª Estabilización	1750,77	101,96	1,95E-04	21,94	4,28E-05

Tabla 6.17: Resultados obtenidos para la muestra A_AC_P

En la gráfica comparativa que aparece a continuación se han desechado los valores de resistencia térmica correspondientes al primer punto de presión ya que, como se comprueba en los ensayos de repetibilidad mostrados en el siguiente apartado, la baja presión aplicada en el primer punto hace que la calidad del contacto no sea demasiado buena y por consiguiente la medida en este punto no sea tan fiable. Además, haciéndolo de esta forma se puede observar con mayor claridad la evolución de las resistencias térmicas en el intervalo de 500 a 1800 KPa, que es el que más interesa ya que en la aplicación real la presión está dentro de esos valores. Lo anteriormente mencionado es también aplicado a las gráficas comparativas del apartado 6.2.2. por los mismos motivos.

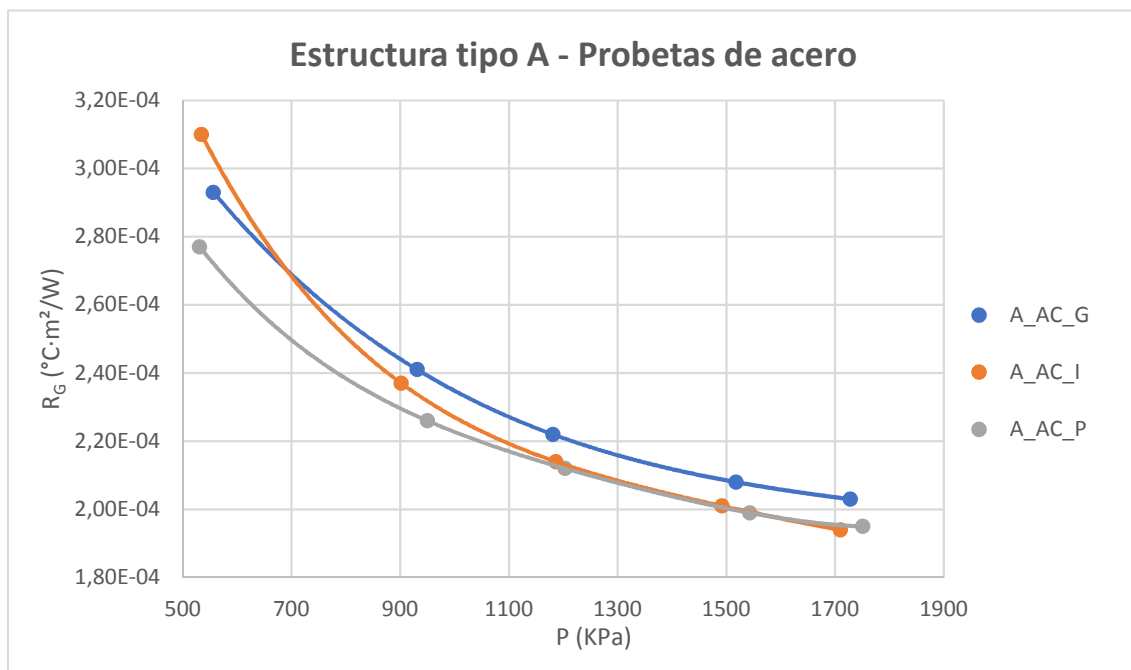


Figura 6.5: Gráfica comparativa de la R_t en función de la presión aplicada de las muestras A_AC_X

A la vista de los resultados obtenidos para las muestras con estructura tipo A, ensayadas entre probetas de acero se puede observar lo siguiente:

- A presiones bajas (valores en torno a los 500 KPa) la muestra que mejor se comporta es A_AC_P , realizada con pasta térmica, con un valor de resistencia térmica global de $2,77 \cdot 10^{-4} \text{ °C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$. Por otro lado, la muestra A_AC_I , realizada con indio, ofrece la mayor resistencia térmica con un valor de $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ °C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$. La muestra A_AC_G ofrece una resistencia intermedia entre las dos anteriores con un valor de $2,93 \cdot 10^{-4} \text{ °C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$.

- A presiones altas (valores en torno a 1700 KPa), las muestras A_AC_P y A_AC_I con valores de resistencia térmica de $1,95 \cdot 10^{-4}$ y $1,94 \cdot 10^{-4}$ °C·m²/W respectivamente tienen mejor comportamiento que la muestra A_AC_G cuyo valor de resistencia térmica es de $2,03 \cdot 10^{-4}$ °C·m²/W.

6.2.2. Resultados obtenidos con estructura tipo B

Como se menciona anteriormente en el apartado 5.4.1., con la estructura tipo B se busca estudiar el comportamiento de los TIM's en las situaciones de las uniones chimenea-módulo (acero-cerámica) y disipador-módulo (aluminio-cerámica). Por ello se realizan unos ensayos con probetas de acero y otros con probetas de aluminio. En los ensayos realizados se obtiene el valor de resistencia térmica global de la muestra. Conociendo dicho valor y el valor de resistencia térmica conductiva de la placa de cerámica utilizada se pueden obtener los valores de la resistencia térmica de contacto de las uniones cerámica-aluminio-TIM y acero-TIM-cerámica (presentes en la aplicación que ocupa este trabajo) utilizando la expresión 5.16.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos. Primero se expone una tabla de resultados para cada muestra ensayada en la que aparecen los distintos puntos de estabilización con sus respectivos valores de presión aplicada, temperatura de la muestra, resistencia térmica global de la muestra incluyendo su incertidumbre y resistencia térmica de contacto de la unión. En segundo lugar, se incluye una gráfica comparativa relativa a las distintas muestras. Por último, se realizan comentarios analizando los resultados obtenidos.

Muestras con estructura tipo B y probetas de acero

B_AC_G					
	P (KPa)	T ^a (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (°C·m ² /W)	RTC (°C·m ² /W)
1 ^a Est.	28,39	102,74	1,03E-03	2,10E-04	5,04E-04
2 ^a Est.	570,75	104,89	2,52E-04	5,40E-05	1,15E-04
3 ^a Est.	898,49	105,28	1,78E-04	4,02E-05	7,83E-05
4 ^a Est.	1195,98	105,40	1,54E-04	3,60E-05	6,63E-05
5 ^a Est.	1448,31	105,49	1,44E-04	3,43E-05	6,13E-05
6 ^a Est.	1732,95	105,53	1,40E-04	3,36E-05	5,93E-05

Tabla 6.18: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_G

B_AC_I					
	P (KPa)	Tª (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (°C·m ² /W)	RTC (°C·m ² /W)
1ª Est.	28,39	103,5	6,26E-04	1,27E-04	3,02E-04
2ª Est.	519,38	105,78	1,85E-04	4,12E-05	8,18E-05
3ª Est.	911,75	106,84	1,25E-04	3,07E-05	5,18E-05
4ª Est.	1166,98	107,73	1,05E-04	2,75E-05	4,18E-05
5ª Est.	1480,63	107,93	9,67E-05	2,62E-05	3,77E-05
6ª Est.	1698,56	108,12	9,26E-05	2,55E-05	3,56E-05

Tabla 6.19: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_I

B_AC_P					
	P (KPa)	Tª (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (°C·m ² /W)	RTC (°C·m ² /W)
1ª Est.	28,39	96,96	1,93E-04	4,33E-05	8,58E-05
2ª Est.	517,3	102,35	1,27E-04	3,14E-05	5,28E-05
3ª Est.	990,47	106,75	1,23E-04	3,03E-05	5,08E-05
4ª Est.	1171,95	108,35	1,22E-04	3,01E-05	5,03E-05
5ª Est.	1560,18	109,03	1,19E-04	2,95E-05	4,88E-05
6ª Est.	1679,5	109,48	1,20E-04	2,98E-05	4,93E-05

Tabla 6.20: Resultados obtenidos para la muestra B_AC_P

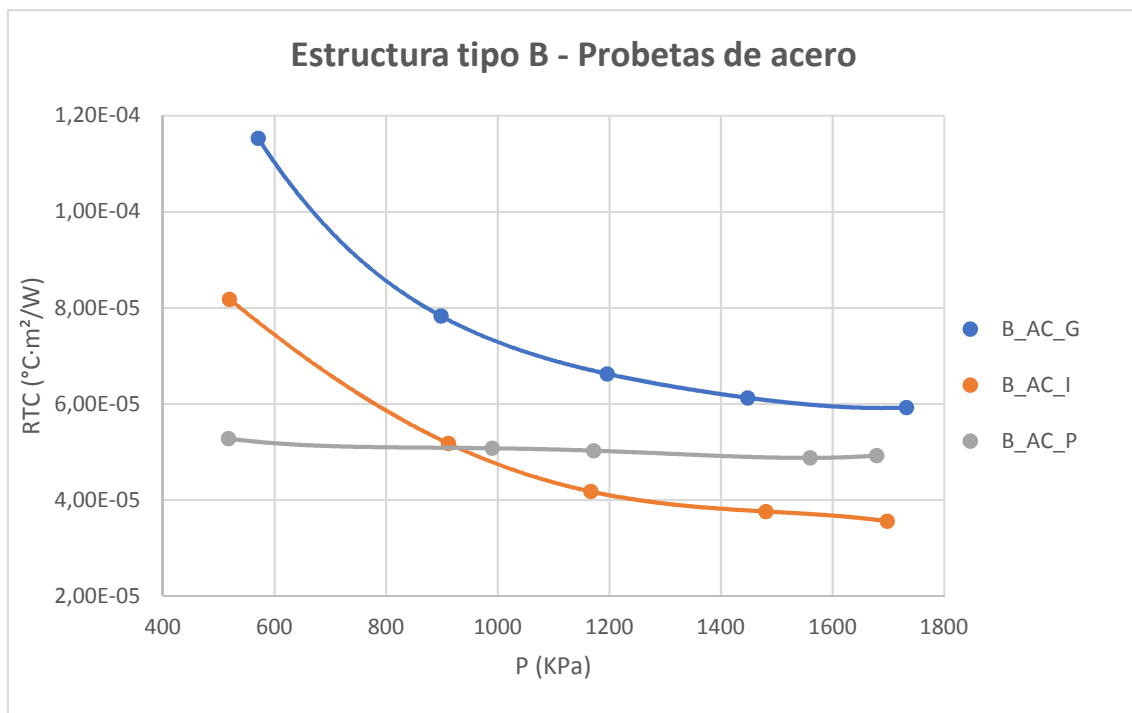


Figura 6.6: Gráfica comparativa de la RTC en función de la presión aplicada de las muestras B_AC_X

A la vista de los resultados obtenidos para las muestras con estructura tipo A, ensayadas entre probetas de acero se puede observar lo siguiente:

- La resistencia térmica de contacto en la unión acero – pasta térmica – cerámica no se ve afectada en gran medida por la presión aplicada sobre la unión. Se observa una ligera disminución en el valor, la cual es insignificante en comparación con la disminución existente en las uniones formadas por los otros dos TIM's.
- En cuanto a los resultados de las uniones acero – grafito – cerámica y acero – indio – cerámica, se observa una clara tendencia descendente en la resistencia térmica de contacto frente a la presión aplicada. En el intervalo de presiones de 500 KPa a 1500 KPa la disminución es más acusada. A partir de los 1500KPa el valor sigue bajando, pero más lentamente que en el intervalo anterior. En el caso de la unión cuyo TIM es el grafito la disminución en el intervalo de 500 a 1700KPa es de $5,57 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ mientras que la disminución de la unión con indio en ese mismo intervalo es de $4,62 \cdot 10^{-5}$.
- Haciendo una comparación de los valores de resistencia térmica de cada unión para cada punto de presión se observa que a presiones bajas (en torno a los 500 KPa), el TIM que mejor resistencia térmica de contacto ofrece para la unión estudiada es la pasta térmica y el que peor resistencia ofrece es el grafito. En cambio, a presiones altas (en torno a 1700 KPa), el TIM que mejor resistencia térmica de contacto ofrece es el indio.

Muestras con estructura tipo B y probetas de aluminio

B_AL_G					
	P (KPa)	T^a (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (°C·m²/W)	RTC (°C·m²/W)
1 ^a Est.		99,9	4,10E-04	8,66E-05	1,94E-04
2 ^a Est.	487,06	105,21	1,31E-04	2,75E-05	5,48E-05
3 ^a Est.	903,05	108,17	1,10E-04	2,29E-05	4,43E-05
4 ^a Est.	1172,36	105,8	1,05E-04	2,19E-05	4,18E-05
5 ^a Est.	1481,45	106,29	1,01E-04	2,10E-05	3,98E-05
6 ^a Est.	1721,77	106,4	9,72E-05	2,03E-05	3,79E-05

Tabla 6.21: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_G

B_AL_I					
	P (KPa)	T^a (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (°C·m²/W)	RTC (°C·m²/W)
1 ^a Est.		108,74	1,00E-03	2,14E-04	4,89E-04
2 ^a Est.	413,72	105,41	2,92E-04	6,13E-05	1,35E-04
3 ^a Est.	999,17	106,06	1,48E-04	3,08E-05	6,33E-05
4 ^a Est.	1122,64	105,67	1,29E-04	2,70E-05	5,38E-05
5 ^a Est.	1592,91	106,31	9,17E-05	1,92E-05	3,52E-05
6 ^a Est.	1703,95	105,96	8,10E-05	1,70E-05	2,98E-05

Tabla 6.22: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_I

B_AL_P					
	P (KPa)	T^a (°C)	R_G (°C·m²/W)	u (°C·m²/W)	RTC (°C·m²/W)
1 ^a Est.		106,67	1,27E-04	2,64E-05	5,28E-05
2 ^a Est.	560,81	107,1	8,27E-05	1,73E-05	3,07E-05
3 ^a Est.	908,02	106,11	7,79E-05	1,63E-05	2,83E-05
4 ^a Est.	1259,37	105,56	7,58E-05	1,59E-05	2,72E-05
5 ^a Est.	1474,41	105,26	7,47E-05	1,57E-05	2,67E-05
6 ^a Est.	1764,44	105,13	7,32E-05	1,54E-05	2,59E-05

Tabla 6.23: Resultados obtenidos para la muestra B_AL_I

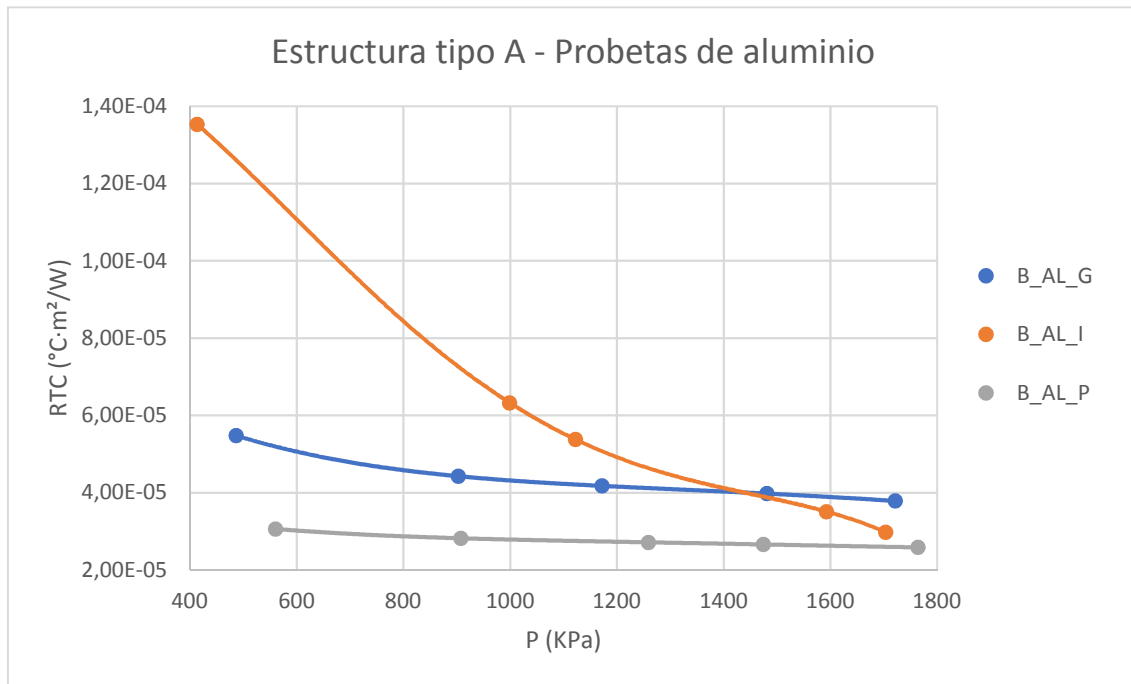


Figura 6.7: Gráfica comparativa de la RTC en función de la presión aplicada de las muestras B_AL_X

Analizando los resultados obtenidos para las muestras con estructura tipo B, ensayadas entre probetas de aluminio se puede observar lo siguiente:

La unión cerámica – pasta térmica – aluminio es la que mejor comportamiento tiene en todo el intervalo de presión ensayado ya que ofrece en todo momento la mejor resistencia térmica de contacto. Entre las uniones cerámica – grafito – aluminio y cerámica – indio – aluminio, para valores bajos de presión (en torno a 500 KPa), la de grafito tiene mejor resistencia térmica. En cambio, para valores altos de presión (en torno a 1700KPa), la unión con indio tiene menor resistencia térmica.

6.2.3. Ensayos para comprobar la repetibilidad del equipo utilizado

En general, en estudios empíricos en los que se hacen medidas de cualquier variable siempre va a existir una incertidumbre asociada a cada medida. La repetibilidad de los ensayos que se hacen para obtener dichas medidas es una herramienta utilizada para reducir la incertidumbre. A más repeticiones menor incertidumbre.

En el caso de este proyecto, no se han hecho repeticiones para todos los ensayos debido a la falta de tiempo para realizarlas. Si en un futuro se continúa con esta investigación y se dispone del tiempo necesario para realizar varias repeticiones para cada ensayo, se puede conseguir reducir las incertidumbres obteniendo una mayor exactitud para cada medida y pudiendo sacar conclusiones más fiables.

En el presente apartado se exponen los resultados y tabla comparativa de tres ensayos que se han realizado con el objetivo de comprobar la repetibilidad del equipo utilizado. En estos ensayos se ha ido aumentando la presión aplicada a la muestra de forma similar a los ensayos de resistencia térmica en función de la presión y como muestra se ha utilizado una con estructura tipo A y sin material de interfaz térmica.

Los tres ensayos se han realizado intentando mantener constantes todos los parámetros que intervienen en el resultado de la medida como son temperatura ambiente, tensión en las resistencias del generador, tensión en los ventiladores de convección, presión aplicada en cada punto, material de las probetas, estructura y composición de las muestras.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada ensayo en forma de tabla y una gráfica comparativa de los tres.

A1					
	P (KPa)	T ^a (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (%)	u (°C·m ² /W)
1ª Estabilización	28,39	112,63	9,71E-04	20,18	1,96E-04
2ª Estabilización	575,72	111,51	3,66E-04	20,56	7,53E-05
3ª Estabilización	948,21	110,7	3,22E-04	20,69	6,66E-05
4ª Estabilización	1260,61	110,47	3,02E-04	20,77	6,28E-05
5ª Estabilización	1521,64	110,47	2,92E-04	20,81	6,08E-05
6ª Estabilización	1793,45	110,54	2,82E-04	20,86	5,89E-05

Tabla 6.24: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A1

A2					
	P (KPa)	Tª (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (%)	u (°C·m ² /W)
1ª Estabilización	28,39	112,25	8,00E-04	20,2	1,62E-04
2ª Estabilización	588,57	111,79	3,54E-04	20,58	7,29E-05
3ª Estabilización	963,54	111,18	3,17E-04	20,7	6,57E-05
4ª Estabilización	1243,63	110,63	3,03E-04	20,76	6,30E-05
5ª Estabilización	1529,52	110,01	2,93E-04	20,82	6,09E-05
6ª Estabilización	1800,49	109,78	2,85E-04	20,86	5,94E-05

Tabla 6.25: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A2

A3					
	P (KPa)	Tª (°C)	R _G (°C·m ² /W)	u (%)	u (°C·m ² /W)
1ª Estabilización	28,39	94,8	9,95E-04	20,27	2,02E-04
2ª Estabilización	601	100,61	3,59E-04	20,76	7,45E-05
3ª Estabilización	899,32	105,36	3,01E-04	20,98	6,31E-05
4ª Estabilización	1226,64	106,95	2,70E-04	21,15	5,72E-05
5ª Estabilización	1488,08	107,45	2,59E-04	21,23	5,50E-05
6ª Estabilización	1749,94	108,14	2,52E-04	21,29	5,36E-05

Tabla 6.26: Resultados obtenidos para la muestra SINTIM A3

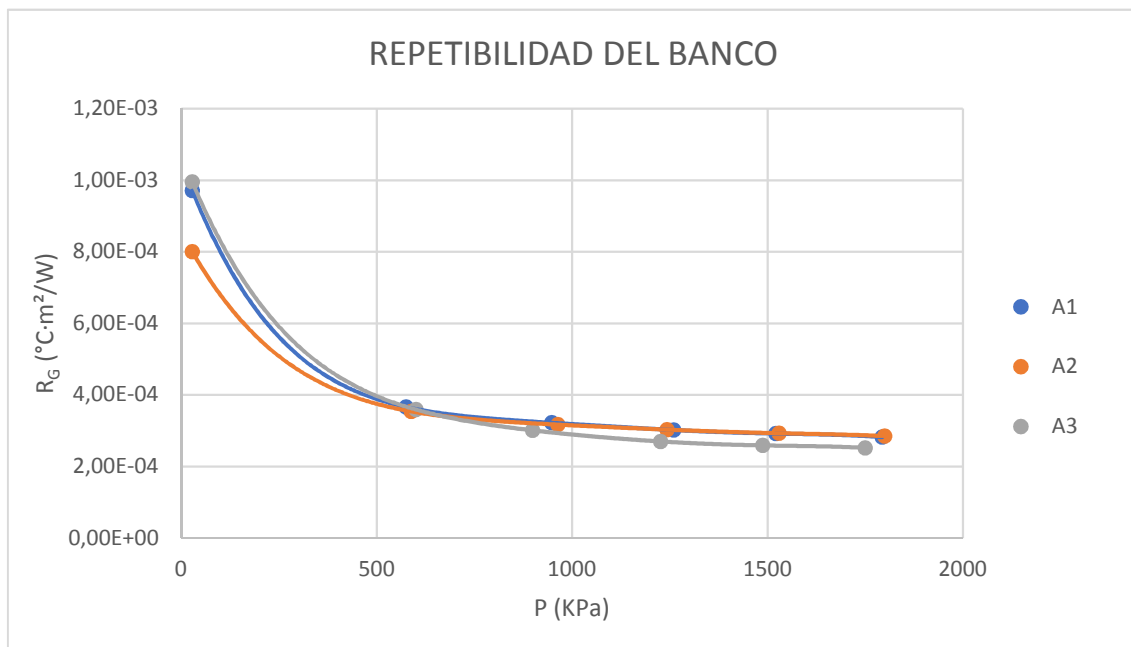


Figura 6.8: Gráfica comparativa de los ensayos de repetibilidad realizados con estructura tipo A

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que la mayor desviación en la medida se da en el primer punto de presión con una diferencia entre los valores más alejados de $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$. El hecho de que la mayor desviación se produzca en este punto puede ser debido a que la baja presión aplicada de 28,39 KPa haga que la calidad del contacto entre superficies sea mala y por tanto aparezcan mayores diferencias entre las interfaces de unión involucradas en los distintos ensayos. Conforme se va aumentando la presión estas diferencias se van reduciendo y por consiguiente los valores de resistencia térmica obtenidos son más cercanos.

7. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio empírico consistente en medir la resistencia térmica de contacto de diferentes materiales de interfaz térmica, en distintas situaciones de trabajo relacionadas con el estudio del aprovechamiento del calor residual en chimeneas industriales. Para alcanzar el objetivo principal, ha sido necesario alcanzar una serie de objetivos previos. A continuación, se exponen varias conclusiones referentes en primer lugar a los objetivos previos y finalmente al objetivo principal.

Primeramente, **se ha realizado una revisión bibliográfica** que incluye una introducción a la generación termoeléctrica (describiendo los efectos Seebeck y Peltier así como el funcionamiento de los módulos termoeléctricos), una explicación de la resistencia térmica de contacto entre dos superficies (incluyendo las expresiones matemáticas con las que se puede calcular y algunos de los factores físicos que influyen en su valor) y por último, una investigación referente a los llamados materiales de interfaz térmica (incluyendo una clasificación según su composición y dando valores de resistencias térmicas de algunos de ellos presentes en la bibliografía). Este primer objetivo es importante ya que ha permitido afrontar los siguientes objetivos con cierto conocimiento sobre los temas relacionados con el trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del presente trabajo consiste en realizar mediciones de resistencia térmica utilizando un banco de ensayos. Es sabido que la medición de cualquier variable física lleva asociada una incertidumbre. Por tanto, uno de los objetivos realizados para llevar a cabo el objetivo principal es hacer un estudio relativo a las incertidumbres asociadas a los valores de resistencia térmica que se obtienen mediante el banco de ensayos utilizado. Para ello, se ha aplicado la Ley de propagación de la incertidumbre a la expresión con la que se obtiene la resistencia térmica en la que aparecen temperaturas, longitudes y conductividades térmicas que llevan asociadas sus correspondientes incertidumbres. De esta forma **se ha conseguido obtener una expresión para el cálculo de la incertidumbre total asociada a la resistencia térmica medida** para cada muestra ensayada. Así pues, todas las medidas que aparecen en este trabajo incluyen sus incertidumbres asociadas. Por ejemplo, la resistencia térmica de contacto obtenida para la unión cerámica – indio – aluminio con unas condiciones de

presión y temperatura de 1700 KPa y 106 ° C respectivamente es de $8,1 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ con una incertidumbre de $2,98 * 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

Para poder simular y ensayar las distintas uniones involucradas en el aprovechamiento del calor residual de chimeneas industriales mediante generación termoeléctrica, previamente **se han desarrollado una serie de diseños de las muestras a ensayar**. Con los distintos diseños se ha intentado recrear lo más fielmente posible las distintas situaciones en las que van a trabajar los TIM's. Existen dos uniones en la aplicación real como son la unión chimenea – módulo termoeléctrico y módulo termoeléctrico – disipador. Las variables que cambian en dichas uniones son los materiales (acero para la chimenea, aluminio para el disipador y cerámica para las caras exteriores de los módulos termoeléctricos) y las temperaturas (en torno a 180 ° C entre la chimenea y el módulo termoeléctrico y en torno a 60 ° C entre el módulo termoeléctrico y el disipador). Así pues, teniendo en cuenta las uniones anteriormente citadas se ha realizado el diseño de las muestras. En todos los casos la estructura de las muestras se ha basado en rodear al TIM de los materiales involucrados en la unión. Por ejemplo, en los ensayos de envejecimiento, para simular el comportamiento del grafito en la unión chimenea – módulo termoeléctrico, se ha realizado un sándwich formado por acero y cerámica en el exterior y grafito en el interior y se ha expuesto durante un periodo de 70 días a una temperatura de 180 ° C.

Gracias a la consecución de los objetivos anteriormente mencionados se ha podido realizar un estudio empírico fundamentado, obteniendo valores de resistencia térmica muy similares a los que van a tener las uniones en la aplicación real.

Se han realizado un total de 60 ensayos:

- 48 para el estudio de la resistencia térmica en función del envejecimiento
- 9 para el estudio de la resistencia térmica en función de la presión aplicada
- 3 para comprobar la repetibilidad del banco de ensayos

A continuación, se exponen las conclusiones más destacadas que se pueden obtener a partir de los resultados obtenidos en los distintos tipos de ensayo.

Ensayos de resistencia térmica en función del envejecimiento de los TIM's

En primer lugar, en cuanto a los ensayos realizados a las muestras sometidas a una temperatura de envejecimiento de 180 ° C se observa un aumento de la resistencia térmica en los tres TIM's estudiados. En concreto, las muestras realizadas con pasta térmica son las que mayor aumento de resistencia térmica han tenido tras los 70 días de envejecimiento llegando a un aumento porcentual de un 300% en el caso de la muestra P_AC_C, consistente en un sándwich formado por acero, pasta térmica y cerámica. En contraposición, la muestra que mejor comportamiento ha tenido ha sido la muestra G_AC_C, consistente en un sándwich formado por acero grafito y cerámica, cuyo aumento porcentual en el valor de resistencia térmica tras 70 días de envejecimiento a 180 ° C ha sido de un 8,48%.

Por otro lado, en las muestras sometidas a una temperatura de envejecimiento de 60 °C no se observa una variación significativa del valor de resistencia térmica de las mismas.

Ensayos de resistencia térmica en función de la presión aplicada

En este tipo de ensayos se observan diferencias entre las uniones en las que interviene el acero y en las que interviene el aluminio. Era de esperar puesto que es sabido que la dureza superficial de los materiales involucrados en la unión es un factor que afecta directamente a la resistencia térmica de contacto de la misma. En las uniones en las que interviene el aluminio se obtienen valores menores de resistencia térmica para los mismos valores de presión aplicada.

La primera conclusión que se puede sacar analizando los resultados de estos ensayos es que la presión aplicada a las uniones en las que se ha utilizado como TIM pasta térmica no afecta significativamente al valor de resistencia térmica de contacto. Esto era de esperar puesto que la pasta térmica es un fluido viscoso cuya capacidad para adaptarse con poca presión a las irregularidades superficiales de los materiales involucrados en la unión es grande. Además, ofrece valores pequeños de resistencia térmica de contacto.

En cuanto a los valores de resistencia térmica de contacto de las uniones cerámica – grafito – acero y cerámica – indio – acero frente a la presión aplicada se observan tendencias claramente descendentes y muy parecidas. Siendo el indio el material que mejor resistencia térmica de contacto ofrece entre estas dos uniones, para todos los valores de presión estudiados.

Con los datos obtenidos al cabo de todos los ensayos realizados se pueden concluir varias cosas en cuanto a la elección de los TIM's para el lado de la chimenea y para el lado del disipador:

- Se puede descartar utilizar pasta térmica a modo de TIM en la unión chimenea – módulo termoelectrico debido al envejecimiento que sufre este material a temperaturas en torno a 180 ° C. Entre los otros dos materiales estudiados, el grafito se comporta mejor frente al envejecimiento, pero el indio ofrece mejores valores de resistencia térmica de contacto. En esta elección habría que sopesar si compensa el ahorro que supone en mantenimiento el no tener que cambiar el grafito con tanta frecuencia a pesar de tener un peor valor de resistencia térmica en la unión.
- En cuanto a la unión módulo termoelectrico – disipador, poner pasta térmica a modo de TIM puede ser una buena opción ya que es el material que mejores valores de resistencia térmica de contacto proporciona en las muestras con aluminio y además, a las temperaturas que se dan en esa situación (en torno a 60 ° C) la pasta térmica no sufre envejecimiento.

8. Bibliografía

- [1] A. González Inza, “Estudio experimental de un generador termoeléctrico que aprovecha los humos residuales de una caldera doméstica de combustión,” 2016.
- [2] M. G. Cooper, B. B. Mikic, and M. M. Yovanovich, “Thermal contact conductance,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 12, no. 3, p. 2, 1969.
- [3] A. Hasselström and U. Nilsson, “Thermal Contact Conductance in Bolted Joints,” Chalmers University of Technology, 2012.
- [4] M. Mantelli and M. Yovanovich, *Spacecraft Thermal Control Handbook Volume I: Fundamental Technologies*, 2nd Ed. Reston, Virginia, 2002.
- [5] Y. Martin, T.V. Kessel, “High performance liquid metal thermal interface for large volume production”, *IMAPS Thermal and Power Management*, San Jose CA, 2007.
- [6] R. Prasher, *Thermal interface materials: historical perspective, status, and future directions*, vol. 94 no. 8, 2006.
- [7] D. Blazej, *Thermal interface materials*, *Electron.Cool.* Vol. 9, no. 4, 2003.
- [8] B.A. Cola, “Carbon nanotubes as high performance thermal interface materials”, *Electron. Cool. Mag.* Vol. 16, no. 1, 2010.

Fdo. Adrián Garcíandía Rosa

Pamplona, a 19 de Noviembre de 2018