

Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Caracterización de diferentes materiales para hacer el encapsulado de sensores que tienen que trabajar a altas temperaturas.

Entidad colaboradora: ARCELORMITTAL

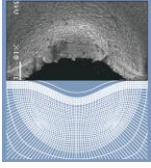
Tutor industrial o externo: JESÚS PÉREZ PEREIRA

Tutor académico: FRANCISCO JAVIER BELZUNCE VARELA

Departamento: DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA

Universidad de Oviedo

JULIO 2015



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo: Caracterización de diferentes materiales para hacer el encapsulado de sensores que tienen que trabajar a altas temperaturas.

Nombre tutor industrial:

Jesús Pérez Pereira

Nombre tutor académico:

F. Javier Belzunce Varela

Alumno:

Manuel Fco. González Fernández

Universidad de Oviedo

JULIO 2015

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis tutores, D. F. Javier Belzunce, y D. Jesús Pérez Pereira (ArcelorMittal) que hayan dedicado su tiempo y conocimientos, así como a todos los profesores del máster por su ayuda y dedicación.

Finalmente, a modo personal, agradecer a la familia, y amigos, la comprensión y el apoyo brindado durante la realización del máster y este trabajo.

ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVO.	7
2. BASES DE PARTIDA.	8
2.1 Definiciones y variables a considerar.	8
2.1.1. Transferencia de calor.	9
2.1.2. Normas técnicas que deben cumplir los materiales aislantes.....	16
2.2. Método de los elementos finitos.	16
2.2.1. Breve historia del método de los elementos finitos.	17
2.2.2. Conceptos generales del método.	19
2.2.3. Ventajas del método de los elementos finitos.	20
2.2.4. Aplicaciones del método.....	20
2.2.5. Breve introducción al método de la rigidez de elementos finitos: Método directo.	21
2.2.6. MEF: Transferencia de calor.....	22
3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO Y RESULTADOS.	24
3.1. Búsqueda y caracterización de materiales.	24
3.1.1. Selección de materiales aislantes.	26
3.2. Modelización en ABAQUS.	31
3.2.1. Elementos a modelizar – Sensor.	31
3.2.2. Modelización.	33
PRUEBA 1.	40
PRUEBA 2.	46
PRUEBA 3.	52
PRUEBA 4.	56

PRUEBA 5.	60
PRUEBA 6.	64
PRUEBA 7.	68
PRUEBA 8.	70
4. CONCLUSIONES.	74
5. PRESUPUESTO.	76
6. PLANIFICACIÓN.	78
7. BIBLIOGRAFÍA.	79

RESUMEN

El Trabajo Fin de Máster que se presenta, recoge los resultados obtenidos de la modelización mediante el método de los elementos finitos de sensores dispuestos en el interior de un horno de ArcelorMittal. Este trabajo se ha llevado a cabo como requisito para la finalización de los estudios del Máster universitario en integridad y durabilidad de materiales, componentes y estructuras por la universidad de Oviedo.

Las condiciones que deben soportar los sensores a consecuencia de las altas temperaturas existentes en los hornos, y la difícil elección de un material que aguante esas condiciones extremas nos ha llevado a realizar un modelo en ABAQUS de transferencia de calor en estas condiciones, para ver con que materiales podría aislarse el sensor para resistir las temperaturas citadas.

El trabajo se ha desarrollado en dos etapas, una primera, que consistió en buscar materiales con unas características térmicas que nos permitieran aguantar las temperaturas planteadas inicialmente y la segunda etapa, en la que se desarrolló el modelo y se comprobó el comportamiento de los materiales seleccionados y se calcularon los tiempos de servicio permitidos en función del espesor de la pared del aislante.

El estudio de materiales y su modelización con elementos finitos constituye un arma de cálculo potente desde el punto de vista de la investigación de estos productos. El ahorro de tiempo y trabajo de laboratorio que conlleva el empleo de estas herramientas puede ayudar a estimar las distintas soluciones posibles y así elegir aquellas más viables para su reproducción. De cualquier manera, este estudio debe completarse ahora con la ejecución de ensayos experimentales con objeto de comprobar la adecuación de los materiales y diseños seleccionados que a priori se consideran los más adecuados para solucionar el problema planteado.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVO

El problema sobre el que se desarrollara este trabajo se basa en conseguir el correcto funcionamiento térmico de una serie de sensores de medición de temperatura.

Estos sensores sirven para medir la temperatura del agua de los circuitos de refrigeración de los hornos donde se funde el acero. Algunos de ellos se deben situar en ambientes con temperaturas que pueden llegar a los 270 °C o más, lo que produce que la electrónica de los sensores deje de funcionar correctamente.

El objetivo principal de este trabajo es la selección de distintos materiales que permitan proteger térmicamente a sensores que deben de trabajar a altas temperaturas, haciendo también uso del programa ABAQUS para simular la transferencia de calor a su través y modelizar su comportamiento.

Para la consecución de este objetivo y, tras una introducción al tema objeto de estudio, se ha dividido el trabajo en dos partes. En una primera parte se ha realizado la búsqueda y documentación de las propiedades de los materiales que podrían ser utilizados en este contexto como aislantes térmicos y se han definido los materiales a priori idóneos para esta aplicación. A continuación, se ha llevado a cabo una modelización mediante elementos finitos del aislamiento del sensor con objeto de definir el espesor de pared necesario y el tiempo máximo de trabajo posible en cada caso.

2. BASES DE PARTIDA

2.1. Definiciones y variables a considerar

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y en la industria, caracterizado principalmente por su baja conductividad térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos puntos que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, dificultando que el calor lo traspase (por ejemplo, una vivienda) y adquiera la temperatura del ambiente que lo rodea

Todos los materiales oponen resistencia, en mayor o menor medida al paso del calor a través de ellos. Algunos muy escasa como los metales (alta conductividad térmica), otros ofrecen una resistencia media como es el caso de los materiales de construcción (yesos, ladrillos, morteros,...). Aquellos materiales que ofrecen una resistencia alta a la conducción de calor a su través se llaman materiales aislantes (véase la Fig. 2.1).

Uno de los mejores aislantes térmicos es el vacío, en el que el calor sólo se transmite por radiación, pero debido a la gran dificultad y alto coste para obtener y mantener condiciones de vacío se emplea en muy pocas ocasiones. En la práctica se utiliza mayoritariamente aire con baja humedad, que dificulta el paso del calor por conducción, gracias a su baja conductividad térmica, y por radiación, gracias a un bajo coeficiente de absorción.

El aire también transmite calor por convección, lo que reduce su capacidad de aislamiento. Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdillas más o menos estancas. Aunque en la mayoría de los casos el gas encerrado es aire común, en aislantes de poro cerrado —formados por burbujas no comunicadas entre sí, como es el caso del poliuretano proyectado—, el gas utilizado como agente espumante es el que queda finalmente encerrado en el interior de las celdillas citadas. También es posible utilizar otras combinaciones de gases distintas, pero su empleo está muy poco extendido.



Fig. 2.1 Esquema básico de la transmisión de calor

2.1.1 Transferencia de calor

Existen tres formas básicas de transmisión de calor: conducción, convección y radiación.

➤ Transmisión de calor por conducción

La conducción es la forma como se transmite el calor a través de los cuerpos sólidos. Cuando un sólido se calienta, aumenta la amplitud de la vibración de los átomos o moléculas que lo componen, chocan con los átomos o moléculas que lo rodean; éstas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas, de manera que la amplitud de la vibración se va transmitiendo a otros átomos o moléculas del cuerpo. Por esta razón, si el extremo de una varilla metálica se calienta con una llama, al cabo de un cierto tiempo el calor llega al otro extremo.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección [1]. De forma vectorial:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

donde,

q es el vector de flujo de calor por unidad de superficie ($W m^{-2}$)

λ es una constante de proporcionalidad característica del material en cuestión, llamada conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)

∇T es el gradiente de campo de temperatura existente en el interior del material ($K m^{-1}$)

El caso más general de la ecuación de conducción, expresada en forma diferencial, refleja el balance entre el flujo neto de calor, el calor generado y el calor almacenado en el material.

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_G}{\rho C_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

donde,

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, es la difusividad térmica

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, es el operador laplaciano del campo de temperatura, que mide el flujo neto de calor.

\dot{q}_G es el calor generado por unidad de volumen.

ρ la densidad del material.

C_p es el calor específico del material.

$\frac{\partial T}{\partial t}$ es la variación de temperatura con el tiempo.

Para el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección (Fig. 2.2), el calor transmitido es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, a la conductividad térmica del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\lambda A}{x} (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

donde,

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ calor transmitido por unidad de tiempo.

$(T_1 - T_2)$ es la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío.

A es el área de la superficie de contacto.

λ es la conductividad térmica del material.

x es el espesor material.

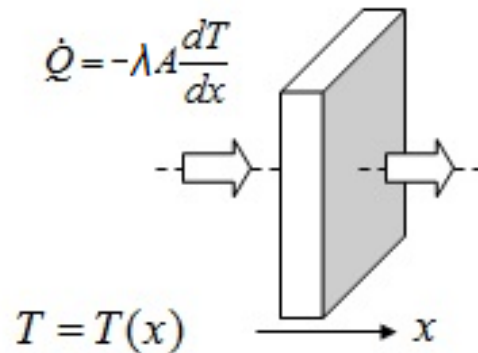


Fig. 2.2 Transferencia de calor unidireccional por conducción (régimen estacionario).

➤ Transmisión de calor por convección y por radiación

La convección es otra una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.

La transferencia de calor por convección se expresa mediante la ley del enfriamiento de Newton [1], (Fig. 2.3):

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf}) \quad (2.4)$$

donde,

h es el coeficiente de convección.

A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido.

T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.



Fig. 2.3 Transferencia de calor por convección.

Por otro lado se denomina radiación térmica o radiación calorífica a la emitida por un cuerpo debido a su temperatura (Fig. 2.4). La radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. En ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies que tienen diferentes temperaturas, debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas y la energía emitida es tanto mayor cuanto mayor es su temperatura.

La energía emitida por radiación por una superficie que se encuentra a temperatura T (K), viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

donde,

σ es la constante universal de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

El calor intercambiado entre la superficie de un cuerpo y el recinto que lo rodea es:

$$Q_{rad} = A_{sup} \sigma \varepsilon (T_{sup}^4 - T_{rec}^4) \quad (2.6)$$

donde,

ε es la emisividad de la superficie (propiedad de la misma).

T_{sup} , T_{rec} , son las temperaturas de la superficie y del recinto (K).

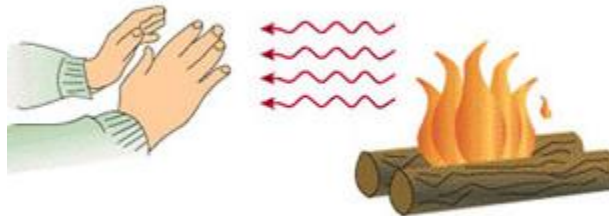


Fig. 2.4 Transferencia de calor por radiación.

De forma general, uniendo la parte de transmisión por convección y la parte de transmisión por radiación, el coeficiente superficial de transmisión de calor queda:

$$h = h_R + h_{CV} \quad (2.7)$$

donde,

h es el coeficiente superficial de transmisión de calor.

h_R es la parte radiactiva del coeficiente superficial que depende de la temperatura, del acabado superficial, y de su emisividad.

h_{CV} es la parte convectiva del coeficiente superficial. Este depende de la velocidad del aire, la orientación de la superficie, el tipo de material, la diferencia de temperatura, etc.

En la Figura 2.5 se muestra un caso general de transmisión de calor en el que operan los tres mecanismos expuestos.

Por otro lado, cuando un sólido se calienta o enfría ocurren simultáneamente 3 fenómenos diferenciados: el sólido absorbe calor, transmite calor y se expande, estos tres efectos quedan definidos respectivamente por las propiedades respectivas siguientes: el calor específico, la conductividad térmica y el coeficiente de dilatación térmica.



Fig. 2.5 Esquema general de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

- Calor específico

Representa la cantidad de energía térmica necesaria para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de un material.

- Conductividad térmica

Es el fenómeno por el cual el calor se transporta desde las regiones de alta temperatura a las de baja temperatura en un material cualquiera. Cuanto menor sea la conductividad térmica del material, mayor será su capacidad de aislamiento térmico.

- Difusividad térmica

La difusividad térmica es directamente proporcional a la conductividad térmica de un material, e inversamente proporcional a su densidad y a su calor específico. Es un índice que expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Cuanto mayor es la difusividad térmica de un material, más rápido se calentará o se enfriará bajo unas condiciones de calentamiento o de enfriamiento dadas.

- Conductancia térmica

La conductancia térmica ($C = \frac{\lambda}{x}$), es una medida de transferencia de calor a través de los materiales, formados por una o varias capas, y en condiciones de laboratorio. En este caso se mide la cantidad de calor transferido a través del material en un tiempo y superficie unitarios, para un espesor especificado (no necesariamente unitario).

- Resistencia térmica

La resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo de calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material; en materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica. Cuanto mayor sea el valor numérico de "R" mayor capacidad aislante tendrá el material.

- Coefficiente de dilatación térmica

El coeficiente de dilatación es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura provocando una dilatación térmica cuando se calienta.

2.1.2. Normas técnicas que deben cumplir los materiales aislantes

Todo material aislante debe cumplir ciertos requisitos mínimos para ser considerado como tal, los cuales deben ceñirse a normas técnicas de evaluación elaboradas por entidades especializadas. Estos requisitos están dirigidos a obtener información sobre los siguientes aspectos:

- Características dimensionales.
- Densidad.
- Propiedades de transferencia de calor
- Máximas temperaturas de uso.
- Análisis químicos.
- Resistencia al fuego.
- Absorción de agua, etc.

2.2. Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc. (Fig. 2.7), ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

El MEF, es un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello se hace uso de la discretización o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos [2].

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nueva; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos. Pero no hay que llevarse a engaño, el manejo correcto de este tipo de programas exige un profundo conocimiento no solo del material con el que se trabaja, sino también de los principios del MEF. Sólo en este caso estaremos en condiciones de garantizar que los resultados obtenidos en los análisis se ajustan a la realidad.

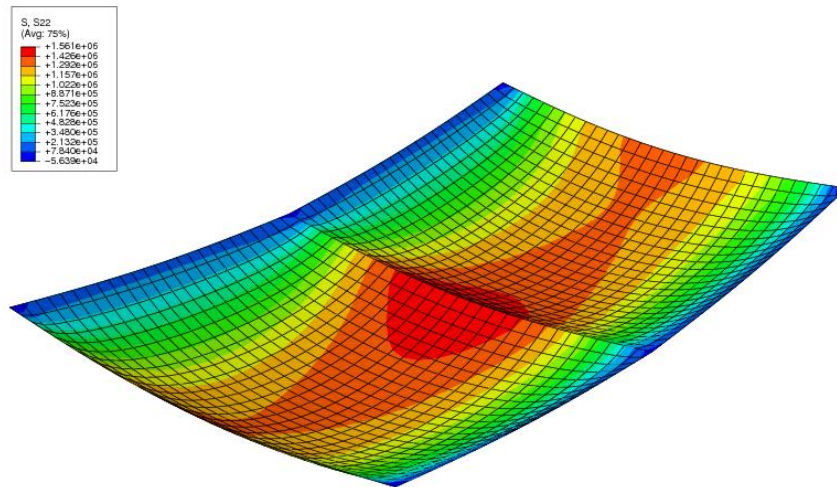


Fig. 2.7 Ejemplo de cubierta modelizada por el MEF.

2.2.1. Breve historia del método de los elementos finitos

Aunque el nombre del MEF se ha establecido recientemente, el concepto se ha usado desde hace varios siglos. El empleo de métodos de discretizado espacial y temporalmente y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde hace ya mucho tiempo. El concepto de 'elementos finitos' parte de esa idea.

Para encontrar vestigios de este tipo de cálculos podríamos remontarnos hasta a la época de la construcción de las pirámides egipcias. Los egipcios empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. Arquímedes (287-212 a.C.) empleó métodos similares para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o la superficie de áreas con formas complejas. En oriente

también se utilizaron aparecen métodos de aproximación para realizar cálculos. Así el matemático chino Lui Hui (300 d.C.) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular longitudes de circunferencias con lo que consiguió una aproximación al número Pi de 3.1416.

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En los años 40 Courant propuso la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh Ritz para aproximar soluciones.

Fueron Turner, Clough, Martin y Topp quienes presentaron el MEF en la forma aceptada hoy en día. En su trabajo introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma.

El trabajo de revisión de Oden presenta algunas de las contribuciones matemáticas más importantes al MEF. Los libros de Przemieniecki y de Zienkiewicz y Holister presentan el MEF en su aplicación al análisis estructural. Los libros de Zienkiewicz y Cheung y de Zienkiewicz y Taylor [3] presenta una interpretación amplia del MEF y su aplicación a cualquier problema en diferentes campos. En él se demuestra que las ecuaciones de los EF pueden obtenerse utilizando un método de aproximación de pesos residuales, tal como el método de Galerkin o el de mínimos cuadrados. Esta visión del problema despertó un gran interés entre los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales mediante el MEF, que ha dado lugar a una gran cantidad de publicaciones hasta tal punto que hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada.

Actualmente el método se encuentra en una fase de gran expansión: es ya ampliamente utilizado en la industria y continúan apareciendo cientos de trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver con la rapidez necesaria la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Entre éstas, además de permitir la descentralización de los programas de EF, ha contribuido a favorecer su uso a través de sofisticados paquetes gráficos que facilitan el modelado y la síntesis de resultados. Hoy en día ya se utiliza concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación.

2.2.2. Conceptos generales del método

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también en el elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir (Fig. 2.8), entre: ·

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor,...
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas,...

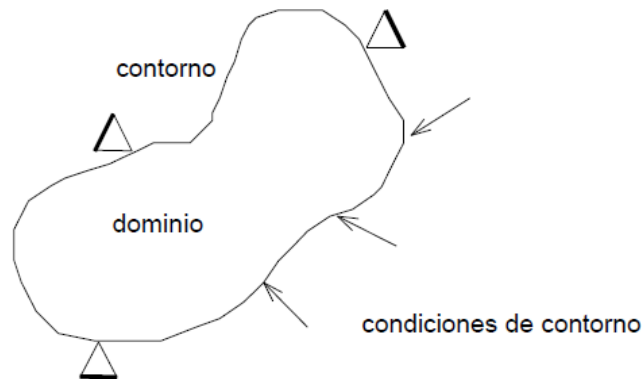


Fig. 2.8. Ejemplo de sistema a analizar.

El uso del método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema supone dividir el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total objeto de estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

2.2.3. Ventajas del método de los elementos finitos

- Gran capacidad de visualización.
- Disminución del tiempo de ciclo de diseño.
- Disminución del número de prototipos necesarios en el diseño.
- Disminución en el número de ensayos de validación.
- Optimización del diseño.

2.2.4. Aplicaciones del método de elementos finitos

Existen diferentes aplicaciones del método de elementos finitos, que van desde la simulación de flujo de fluidos, al análisis de esfuerzos estructurales, la transferencia de calor y el análisis multifénomeno para la determinación de secuencias mecánicas [4–5]. El área de elementos finitos es un campo en continuo desarrollo [6], y día a día muchos investigadores están desarrollando nuevas aplicaciones.

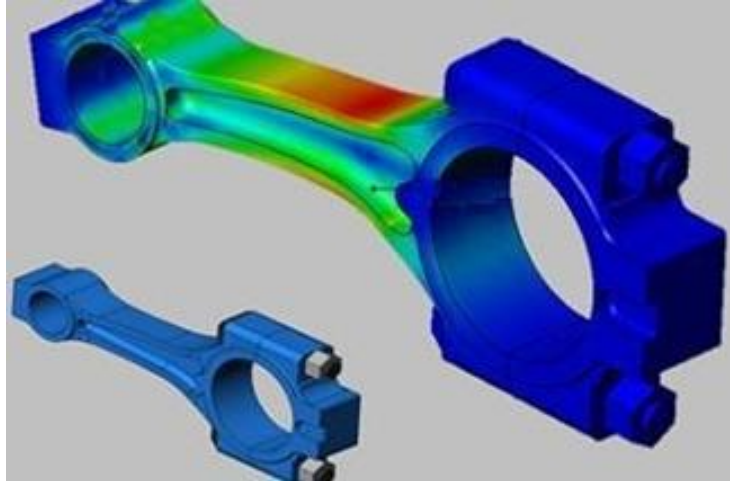


Fig. 2.9. Aplicación MEF en una biela, representando la distribución de la deformación.

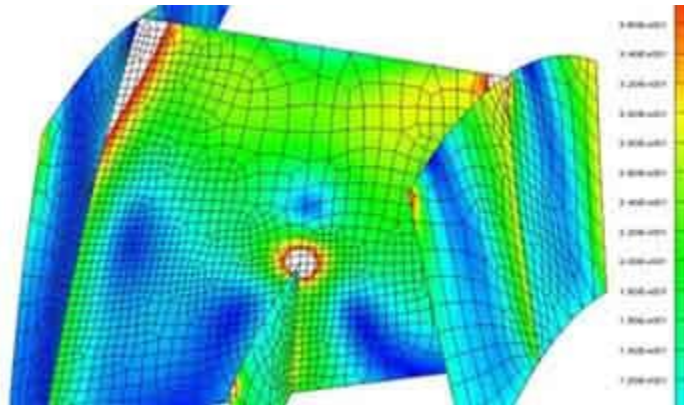


Fig. 2.10. Aplicación del MEF, representando la distribución de esfuerzos en álabes de un ventilador centrífugo.

2.2.5. Breve introducción al método de la rigidez de elementos finitos: Método directo

El método de elementos finitos se desarrolló, al inicio de la década de los años cincuenta, a partir del llamado método directo asociado al cálculo estructural, el cual fue ampliamente usado en la solución de diversos problemas estructurales relacionados con la industria aeronáutica. Mediante este método se analizaron elementos estructurales reticulares. Las relaciones entre los desplazamientos y las fuerzas que los originan, se expresaron mediante un conjunto de ecuaciones, dando origen a lo

que se dio en llamar *matriz de rigidez* de cada elemento estructural, y se desarrollaron técnicas para realizar el ensamblaje de estas matrices en una matriz global, que expresara el comportamiento de toda la estructura objeto de estudio [4]. Desafortunadamente, este método es difícil de aplicar en problemas bidimensionales y tridimensionales, los cuales son, precisamente, los casos donde el método de elementos finitos es más útil. Esta limitación es por lo tanto muy severa y reduce, drásticamente, su rango de aplicación [7].

2.2.6. Método de elementos finitos: Transferencia de calor

En el programa de EF que se va a utilizar para la resolución del problema planteado en el Trabajo Fin de Máster, el software ABAQUS, permite abordar los distintos procedimientos de análisis en la transferencia de calor. Entre ellos, los más utilizados son:

- **Análisis de transferencia de calor no conectado**

Los problemas de transferencia de calor que implican conducción, convección forzada y la radiación divisoria se pueden analizar en Abaqus/Standard. En estos análisis el campo de temperaturas se calcula sin el conocimiento del estado de la tensión/deformación o el campo eléctrico en los cuerpos estudiados. Los problemas de transferencia de calor puros pueden ser pasajeros o estables y lineales o no lineales.

- **Análisis de la tensión térmica secuencialmente conectado**

Si la solución de la tensión/desplazamiento es dependiente de un campo de temperaturas pero no hay dependencia inversa, un análisis de la tensión térmica secuencialmente conectado se puede hacer en Abaqus/Standard. El análisis de la tensión térmica secuencialmente conectado se inicia con la primera solución del problema de transferencia de calor puro, entonces se lee la solución de temperaturas dentro de un análisis de tensión con un campo predefinido. En el análisis de la tensión, la temperatura puede variar con tiempo y la posición, pero no se modifica con la solución de análisis de la tensión.

- **Análisis de la tensión térmica totalmente conectado**

El procedimiento de cálculo totalmente conectado se utiliza para solucionar simultáneamente la tensión/desplazamiento y los campos de temperaturas. Un análisis conectado se usa cuando las

soluciones térmicas y mecánicas están afectadas entre sí de modo significativo. Por ejemplo, en problemas de contacto, el calor conducido a través de huecos puede depender fuertemente del espacio libre del hueco o de la presión. Tanto Abaqus/Standard como Abaqus/Explicit proporcionan procedimientos de análisis de los problemas totalmente conectados, pero los algoritmos usados por cada programa se diferencian bastante.

En Abaqus/Standard las ecuaciones de transferencia de calor se integran usando un esquema de la diferencia atrasada, y el sistema conectado se soluciona usando el método de Newton. Estos problemas pueden ser pasajeros o estables y lineales o no lineales.

En Abaqus/Explicit las ecuaciones de transferencia de calor se integran usando una regla de integración del tiempo de la diferencia avanzada explícita, y la respuesta de solución mecánica se obtiene usando una regla de integración de la diferencia central explícita. El análisis de la tensión térmica totalmente conectado en Abaqus/Explicit siempre es pasajero.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO Y RESULTADOS

3.1. Búsqueda y caracterización de materiales

El objetivo del trabajo, como se ha explicado anteriormente, se basa en la búsqueda de los materiales idóneos que permitan aislar térmicamente a sensores que deben colocarse en el exterior de los hornos para así poder medir la temperatura del circuito de refrigeración del agua (véase la Fig. 3.1).



Fig. 3.1 Horno tipo donde se situarán los sensores.

ArcelorMittal solicitó la realización de este trabajo porque durante la utilización de diferentes sensores, los que estaban colocados en la parte superior de los hornos de fundición de acero por donde salen los gases (a una temperatura aproximada de 270 °C) dejaban de funcionar bien al cabo de un tiempo muy corto.

Estos sensores constan de una electrónica que puede funcionar razonablemente bien hasta una temperatura máxima de 80 °C, con lo que cuando el sensor supera ese valor de temperatura durante

un cierto periodo de tiempo, las medidas dejan de ser correctas. Evidentemente a 270 °C de temperatura o más, que pueden alcanzar los gases de salida de los hornos, todos los sensores terminarían por superar la barrera de los 80 °C y fallarían, por lo tanto, además de aislar el sensor frente a altas temperaturas, se busca que la pendiente en el rango térmico que va de 20 °C a 80 °C sea lo más plana posible, para que el sensor pueda trabajar correctamente el mayor tiempo posible.

En un principio se comenzó el trabajo buscando información sobre las propiedades que serían necesarias cumplir por un material para poder aislar térmicamente en la aplicación referida. El aspecto principal a tener en cuenta es el aislamiento térmico, junto con la necesidad de que el material seleccionado tenga un punto de fusión o de reblandecimiento superior a 270°C.

El concepto de aislamiento térmico consiste en aislar térmicamente una superficie reduciendo la transferencia de calor hacia o desde el ambiente mediante el uso de materiales aislantes, es decir materiales con una baja conductividad térmica.

Se comenzó de este modo buscando los materiales cuya principal característica física fuera su baja conductividad térmica. La Tabla 3.1 muestra la conductividad característica de los aislante buenos, moderados y malos.

TIPO MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TERMICA (Btu.in/h(ft) ² °F)	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m.k)	CONDUCTIVIDAD TERMICA (Kcal/m.h.°C)
BUENOS AISLANTES	0.3-2.0	0.043-0.288	0.037-0.25
MODERADOS AISLANTES	2.0-5.0	0.288-0.721	0.25-0.62
POBRES AISLANTES	>5.0	>0.721	>0.62

Tabla 3.1 División de los materiales en buenos aislantes térmicos, moderados y pobres.

La unidad de conductividad térmica que se utiliza en el sistema internacional es W/mK.

3.1.1 Selección de materiales aislantes

En un primer momento cabría pensar seleccionar materiales con una conductividad térmica lo más baja posible. De cualquier manera, también deben tenerse en cuenta otra serie de características:

- Las contracciones y dilataciones del aislante.
- Su resistencia al fuego.
- La acción de disolventes y agentes atmosféricos.
- Su respuesta ante las sollicitaciones mecánicas (si existieran).
- Máxima temperatura de uso (en este caso 270 °C)

Nuestro modelo de aislamiento, se define una pared de espesor S (en el interior iría colocado el sensor correspondiente) y un material con una conductividad térmica λ . El flujo térmico J a través de la pared, en condiciones estacionarias (la temperatura en el interior y exterior de la pared citada serían constantes) es:

$$J = \lambda \frac{(T_i - T_o)}{S} \quad (3.1)$$

Donde T_o es la temperatura de la superficie exterior, y T_i la temperatura de la superficie interior. Este flujo térmico se minimiza escogiendo un material en la pared con un valor mínimo de λ .

De cualquier manera la situación planteada no es ésta, ya que colocamos el sensor dentro del contenedor aislante a temperatura ambiente y lo situamos en la atmósfera del horno, que se encuentra a una temperatura elevada (Figura 3.2). En esta situación el calor penetra progresivamente a través de la pared del aislante y la temperatura interna del contenedor se eleva progresivamente. Lo que se busca es que la velocidad de aumento de temperatura en el interior del contenedor sea lo menor posible. La distancia X que penetra en un tiempo t es aproximadamente

$\sqrt{2at}$. Donde a es la difusividad térmica, definida como $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, donde ρ es la densidad y c_p es el

calor específico del material utilizado como aislante.

Igualando X al espesor de la pared, resulta:

$$t = \frac{S^2}{2a} \quad (2.2)$$

De este modo, para maximizar el tiempo necesario para alcanzar una temperatura interior dada es necesario seleccionar el material con el menor valor de difusividad térmica [8].

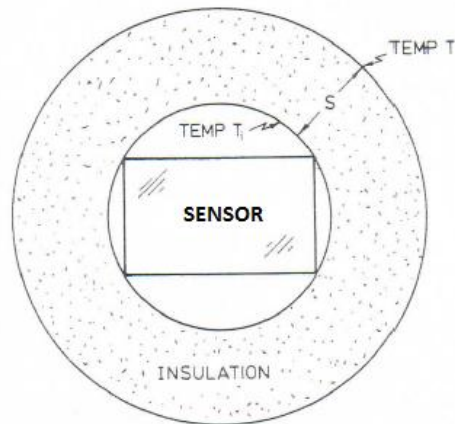


Fig. 3.2 Modelo de contenedor isotérmico.

Si bien es cierto, que en los metales los electrones son los encargados de transferir la energía térmica, ya que al existir muchos electrones libres, la conductividad térmica de los metales será muy elevada. Asimismo hay que tener en cuenta que la conductividad térmica decae rápidamente al introducir elementos aleantes debido a la difracción de los electrones en virtud de la presencia de átomos extraños.

En cambio, los materiales no metálicos son aislantes térmicos puesto que no contienen electrones libres y son los fonones (ondas elásticas) los responsables de la conductividad [9]

La Figura 3.3 muestra una representación gráfica de la conductividad térmica frente a la difusividad térmica de las diferentes familias de materiales disponibles: aleaciones metálicas, cerámicas, plásticos, materiales compuestos, maderas, gomas y espumas poliméricas.

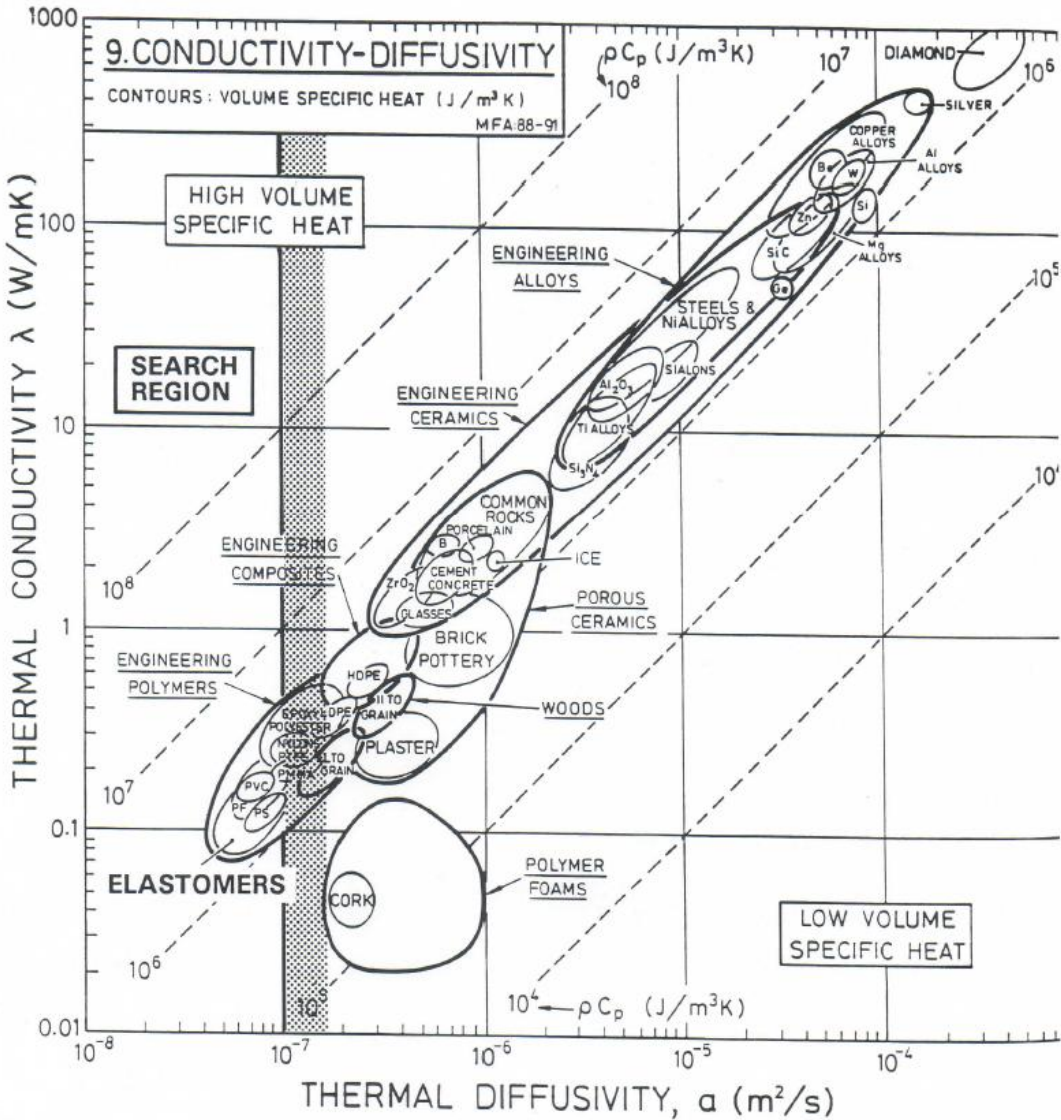


Fig. 3.3 Materiales para contenedores isotérmicos.

Se pone de manifiesto que mientras las espumas poliméricas son los materiales que tienen la menor conductividad térmica, sin embargo, desde el punto de vista de la difusividad térmica, las gomas (elastómeros) y los polímeros masivos se comportan mejor (las espumas tiene una densidad muy bajo que penaliza a la difusividad térmica) y las cerámicas muestran comportamientos similares a las de las espumas plásticas. De este modo el material ideal para realizar el contenedor aislante sería un polímero, pero debería tener una temperatura de reblandecimiento superior a 270°C, ya que si no fuera así el polímero se debilitará, disminuyendo su resistencia mecánica y su rigidez. En caso contrario, debería buscarse alguna cerámica.

La Tabla 3.2 [10], muestra la difusividad térmica de diferentes polímeros. Su difusividad se sitúa alrededor de 10^{-7} m²/s. Se aprecia también que las espumas plásticas (espuma de poliuretano) tienen una difusividad térmica mayor. Sin embargo el problema que tienen todos estos polímeros es que presentan temperaturas de transición vítrea inferiores a 176 °C, lo que hace que a partir de esta temperatura el material se vuelva gomoso y blando, y ya no sirve para nuestra aplicación.

MATERIAL	Conductividad térmica λ (W/mK)	Densidad(Kg/m ³)	Cp(J/kgK)	Tg(°C)	Difusividad térmica α (m ² /s)
Filtro (Wool)	0,52	250	800		0,000003
Espumas de polietileno	0,05	70	2300		3,1E-07
Espumas de poliuretano	0,05	70	1500		4,8E-07
Espumas de silicona	0,12	750	1000		0,0000002
Silicona pura	0,35	1200	1000		2,9E-07
ABS/Polycarbonato	0,137	1190	1255	110	9,2E-08
Goma dura	0,163	1150	2009		7,1E-08
PVC	0,145	1218	1213	87	9,8E-08
Poliestireno(PS)	0,156	1050	1464	102	1,0E-07
Poliestireno Extruido(XPS)	0,033	32	1450	100	7,1E-07
Espuma poliuretano rígida	0,028	40	1400		0,0000005
Espuma poliuretano expandida	0,04	40	1674		6,0E-07
PMMA	0,2	1180	1470	105	1,2E-07
Epoxi	0,35	1412	2092	107	1,2E-07
Polietileno(PE)-Baja densidad	0,35	920	2100	-20	1,8E-07
Polietileno(PE)-Alta densidad	0,52	960	1900	-20	2,9E-07
Nylon	0,24	1467	2092	≈50-67	7,8E-08
Polipropileno (PP)	0,12	1356	1880	160-176	4,7E-08
PTFE	0,24	2297	1046		1,0E-07
Poliéster (PET)	0,31	1688	1275	69-80	1,4E-07

Tabla 3.2 Propiedades térmicas de polímeros comunes.

Existen en el mercado algunos plásticos que tienen temperaturas de reblandecimiento superiores a 270°C, como las poliimidas, aunque su coste ya sería muy superior al de los plásticos convencionales. La Tabla 2.3 muestra las propiedades térmicas de las poliimidas. Vemos que la difusividad térmica de las poliimidas es también muy baja, se sitúa en torno a $5 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

MATERIAL	Conductividad térmica λ (W/mK)	Densidad(Kg/m ³)	Cp(J/kgK)	Difusividad térmica α (m ² /s)
Poliimida	0,99	1439	1297	5,30E-07

Tabla 3.3. Propiedades térmicas de las poliimidas.

Una segunda posibilidad a la hora de seleccionar el material de aislamiento adecuado que no tendría ya la limitación en cuanto a la temperatura máxima de servicio, sería el uso de cerámicas, ya que todas ellas son materiales refractarios que aguantan perfectamente temperaturas incluso por encima de los 1000°C. La Tabla 3.4 muestra las propiedades térmicas de algunas de las cerámicas posibles.

MATERIAL	Conductividad térmica λ (W/mK)	Densidad(Kg/m ³)	Cp(J/kgK)	Difusividad térmica α (m ² /s)
Alúmina (Al ₂ O ₃)	30	3900	775	9,9E-06
Oxido de berilio (BeO)	220	3020	1050	6,9E-05
Magnesia (MgO)	37,7	3580	940	1,1E-05
Espinela (MgAl ₂ O ₄)	15	3800	790	5,0E-06
Sílice vítrea (SiO ₂)	2	2650	740	1,0E-06
Vidrio de sosa y cal	1,7	2500	840	8,1E-07
Zircona (ZrO ₂)	0,9	5680	699	2,3E-07

Tabla 3.4. Propiedades térmicas de las cerámicas.

Entre todas ellas, destaca la zircona. Es una de las cerámicas que tiene una menor conductividad térmica, que unida a su relativamente alta densidad, da lugar a una difusividad térmica que se sitúa en torno a $2 \cdot 10^{-7}$ m²/s, es decir, incluso por debajo de la de las poliimidas.

Por otro lado, las propiedades térmicas de los materiales varían con la temperatura. A modo de ejemplo, la Fig. 3.4 muestra la variación de la conductividad térmica con la temperatura de diferentes cerámicas. Se hace notar que la variación en la zircona (ZrO₂) es muy pequeña, de tal manera que su variación puede despreciarse en el rango térmico que se analiza en este trabajo (20-270°C).

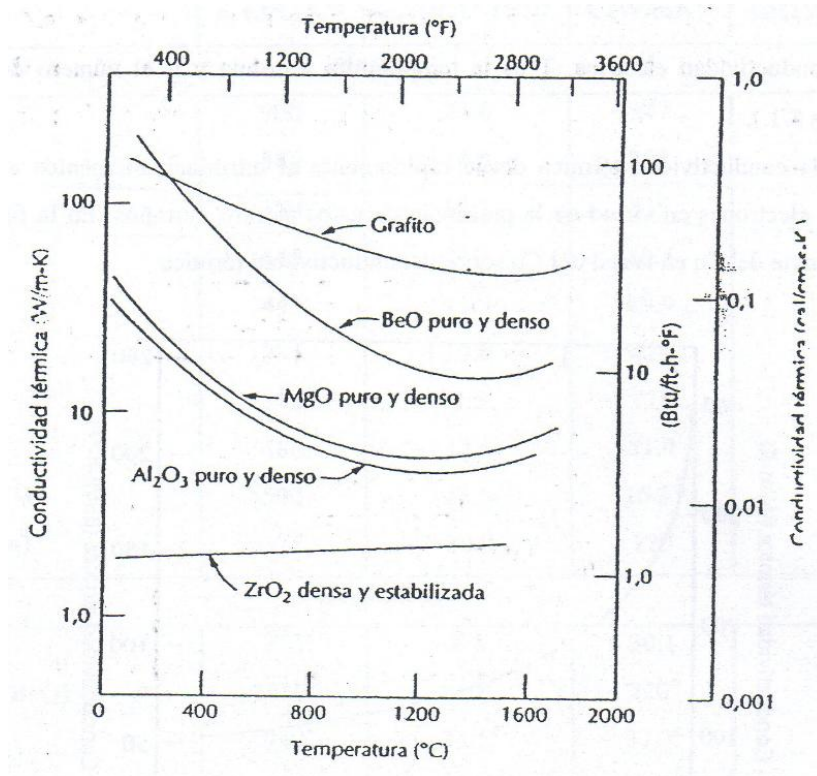


Fig. 3.4. Influencia de la temperatura sobre la conductividad térmica para varios materiales cerámicos.

3.2. Modelización en ABAQUS

3.2.1. Elemento a modelizar - Sensor

A continuación se procedió a modelizar un sensor del tipo de los que necesita ArcelorMittal, para lo que se utilizaron una serie de simplificaciones que facilitarían el cálculo con el programa de elementos finitos. En la Fig. 3.5 se muestra uno de estos sensores, sin encapsular y encapsulado con el aislamiento térmico.

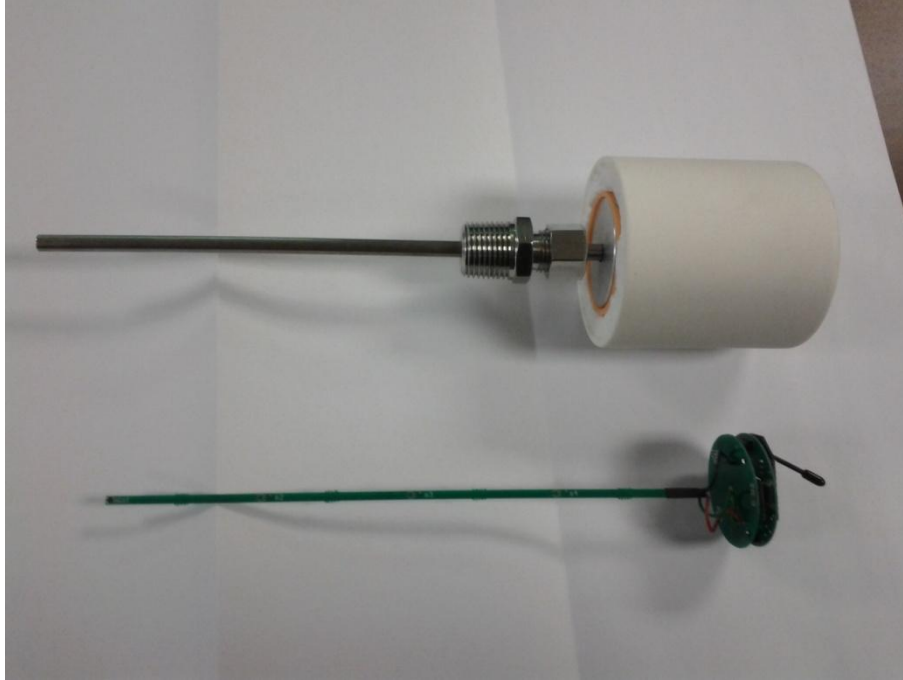


Fig. 3.5. Sensor con material aislante y sensor desnudo.

El sensor a modelizar tiene un diámetro de 40 mm (en la Fig. 3.5 sería la cabeza circular que se puede ver en el sensor desnudo), al que se le ha dotado de una antena de radiofrecuencia para transmitir los datos de manera inalámbrica. Este viene encajado en un molde de plástico (polipropileno) y después se envuelve en el material aislante.

El sensor y el molde de plástico se cubren con un material aislante de espesor a determinar (en la Fig. 3.5. se observa también la fotografía del sensor cubierto), y envolviendo al material aislante se cubre con un material cerámico (MACOR, proporcionado por ArcelorMittal) para proteger el conjunto de posibles salpicaduras de acero fundido. Si bien es cierto que no deja de ser un material cerámico que posee unas propiedades térmicas muy buenas, que ayudarán también a la hora de frenar la transmisión de calor, pero su función última es servir de cubierta protectora.

Antes del comienzo de este trabajo ArcelorMittal hizo distintos intentos para aislar el sensor utilizando un material de la compañía Porextherm, denominado WDS High, que mostraba una conductividad térmica muy baja de 0.026 W/mK (Fig. 3.6). De cualquier manera se trata de un material poroso que, como se demostró, no es la mejor opción, al tener también muy baja densidad.



Fig. 3.6. Material aislante WDS.

En las pruebas realizadas, se comprobó que este aislante funcionaba bastante bien a altas temperaturas, pero sin embargo, a bajas temperaturas, en el rango de 0 – 80°C la curva temperatura-tiempo tenía una pendiente excesiva, y el sensor alcanzaba muy pronto la temperatura límite de 80°C, siendo a partir de esa temperatura cuando el material WDS comenzaba a aislar mejor.

3.2.2. Modelización

Se hicieron muchas simulaciones utilizando distintas configuraciones para intentar esclarecer el rango de espesor del aislamiento más adecuado y los materiales idóneos para el aislamiento del sensor.

La zircona es un material cerámico, por eso la hemos incluido en la tabla con los cerámicos (Tabla 3.5), pero como veremos más adelante se ha ensayado utilizándola como aislante, ya que como cubierta protectora en principio se ha utilizado el material MACOR proporcionado por ArceloMittal.

	MATERIAL	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (Kg/m3)	Cp(J/KgK)	Difusividad térmica (m2/s)
AISLANTE	Corcho	0,042	120	1880	1,9E-07
	Goma dura	0,163	1150	2009	7,1E-08
	Espuma poliuretano rigida	0,028	40	1400	0,0000005
	Madera	0,13	840	1381	1,1E-07
	Poliimida	0,99	1439	1297	5,3E-07
CERÁMICO	Macor	1,5	2520	790	7,5E-07
	Alúmina	30	3900	775	9,9E-06
	SiC	175	3100	1100	5,1E-05
	Zircona	0,9	5680	699	2,3E-07
PLÁSTICO	POLIPROPILENO	0,12	1356	1880	4,7E-08

Tabla 3.5. Distintas configuraciones de materiales utilizadas en las simulaciones.

Evidentemente, los materiales de la tabla 3.5, son materiales escogidos por su baja conductividad térmica, sin tener en cuenta las temperaturas de reblandecimiento (solo poliimidias y zirconas pueden soportar altas temperaturas).

Así, en estas primeras pruebas se supuso un espesor de pared de cerámica de 10 mm, y un espesor de pared de aislante de 10 mm, pero los resultados obtenidos no eran satisfactorios, ya que el sensor alcanzaba los 80°C en muy poco tiempo. Además desde ArcelorMittal se informó que el diámetro del sensor dentro del acoplamiento de plástico sería de 40 mm.

En todas las pruebas realizadas se adoptaron unas condiciones iniciales de temperatura de 293K (20°C) en todo el elemento.

La Fig. 3.7 muestra el modelo geométrico planteado que consta de una capa exterior de cerámica Macor de 10 mm de espesor, una segunda capa de material aislante (se han evaluado diferentes materiales aislantes), también de 10 mm de espesor, y finalmente, en la región más interna, el sensor de polipropileno, con un diámetro de 40 mm.

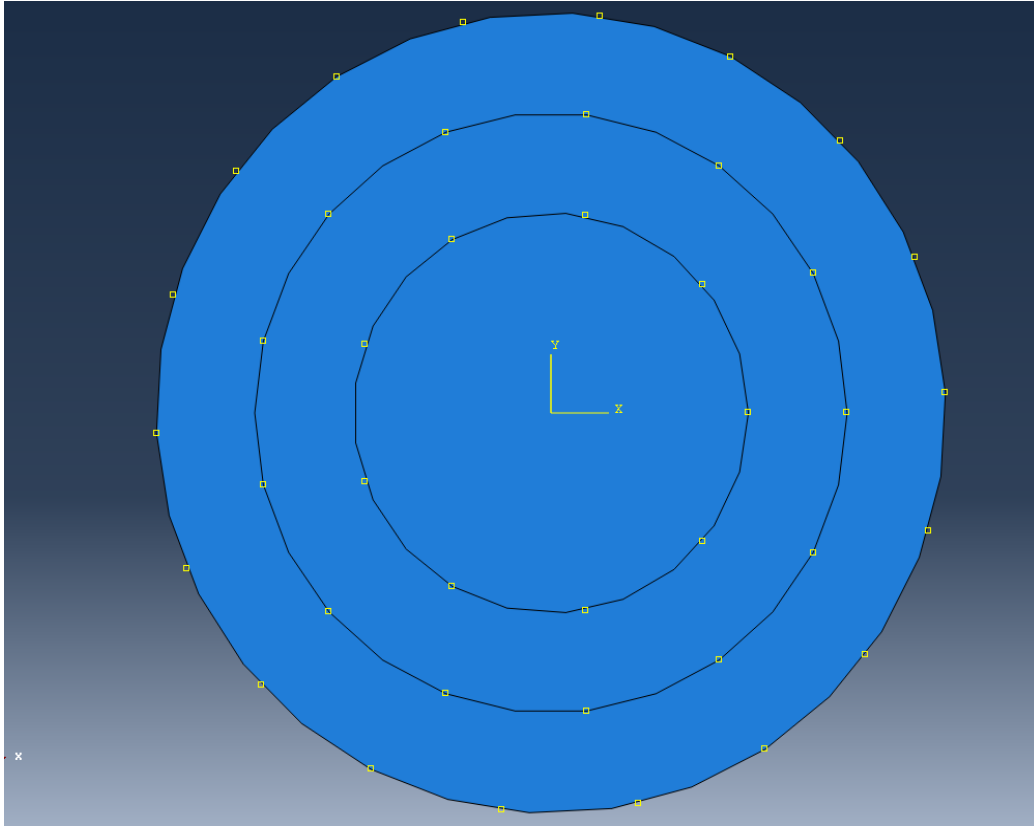


Fig. 3.7. Geometría del elemento completo (cerámico + aislante + sensor)

Se han estudiado además dos condiciones diferentes de transferencia de calor desde la atmósfera del horno a la capa externa cerámica: una transmisión en la que la superficie exterior de la cerámica alcanzaba la temperatura de la atmósfera del horno, 270°C, instantáneamente y una transmisión de calor por convección forzada.

En las simulaciones se han utilizado elementos con forma Quad-dominated, y el algoritmo de mallado escogido es el Medial axis, además de un tamaño de semilla que se fue variando en las distintas pruebas para conseguir un mejor mallado. Además, se utilizaron elementos DC2D4, que son elementos más apropiados para abordar la transferencia de calor, véase la Fig. 3.8.

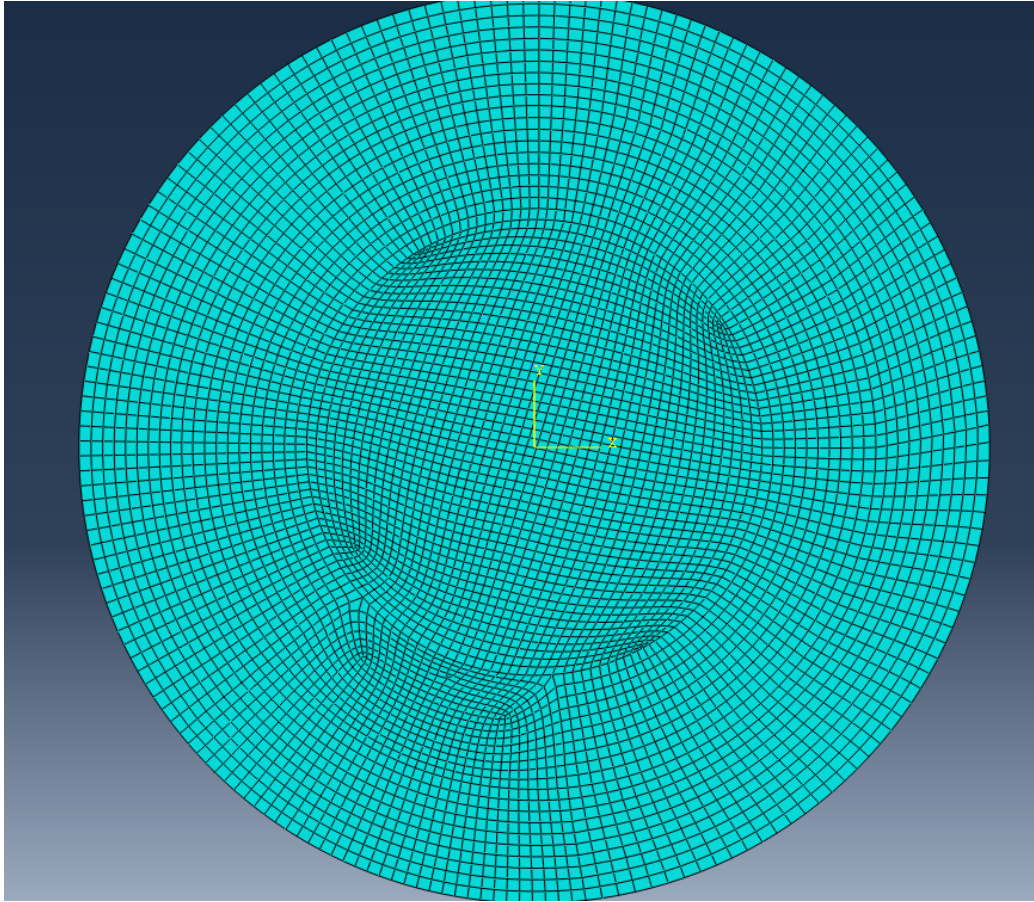


Fig. 3.8. Elemento mallado.

La Fig. 3.9 corresponde a una de las primeras pruebas realizadas. Se observa que en este caso al cabo de 14400 s (4 horas) de mantenimiento del conjunto en una atmósfera a 543 K (270°C) se ha alcanzado una temperatura de 492K (219°C) en la región interna del sensor.

En este caso se estableció una transmisión de calor por convección forzada (más adelante también se supondrá unas condiciones límite, en la que la pared exterior alcanza los 270°C instantáneamente).

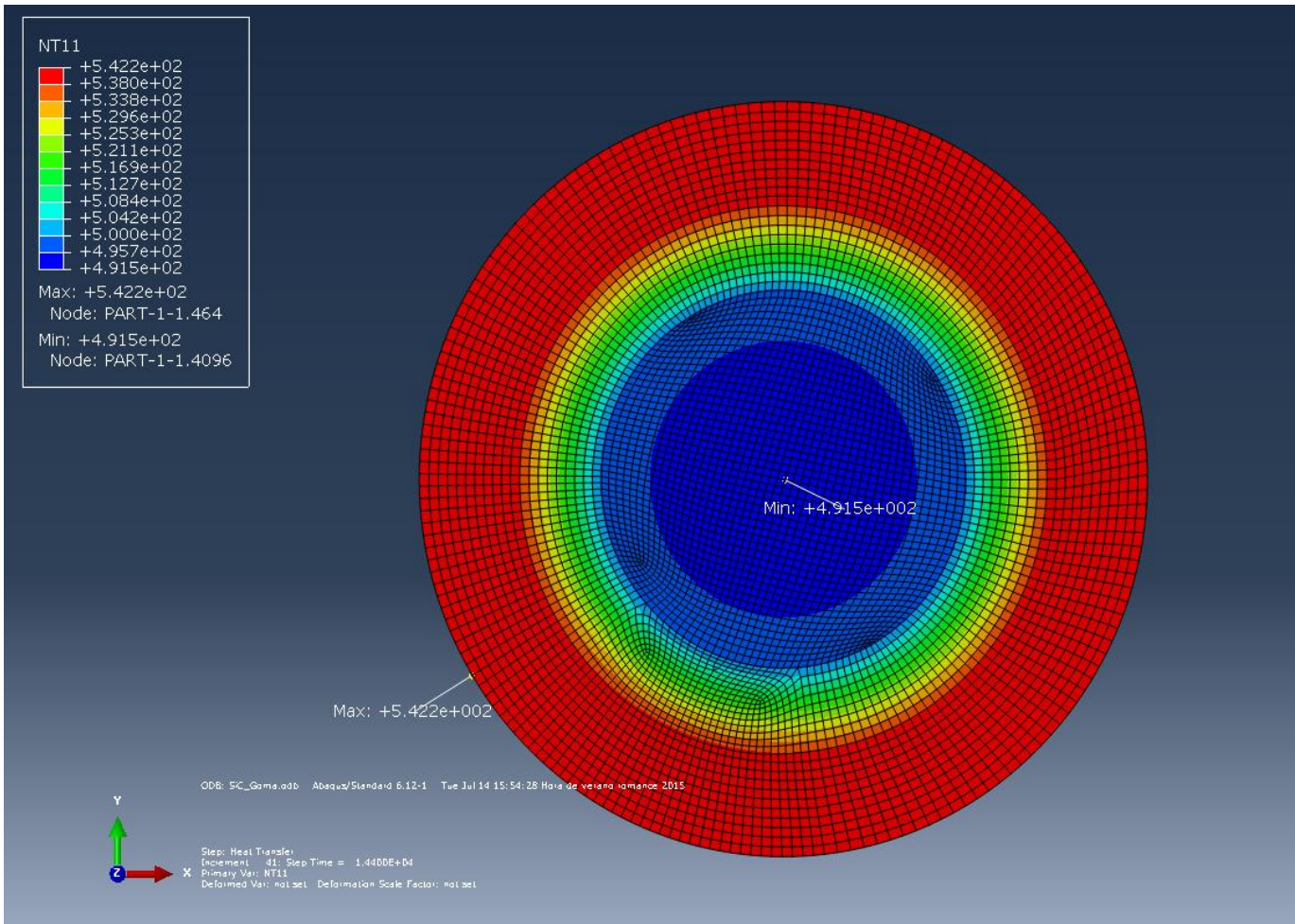


Fig. 3.9. Temperatura en los nodos al cabo de 14400 s.

Por otro lado, en esta misma prueba previa el sensor alcanza el límite que se ha establecido de 80°C en aproximadamente 2500 segundos (Fig. 3.10).

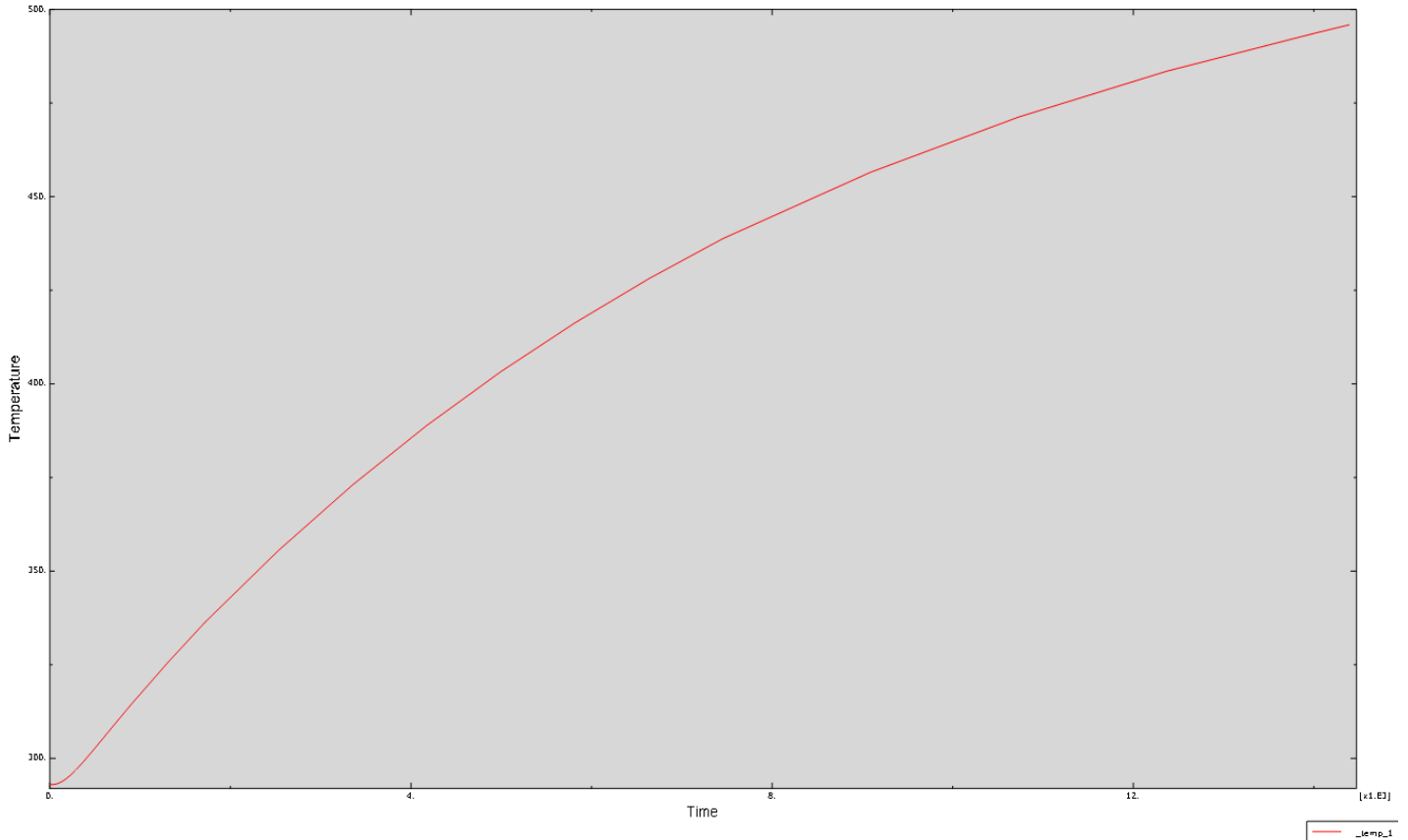


Fig. 3.10. Evolución de la temperatura media del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C

En base a estas primeras pruebas, se comprobó la necesidad de aumentar los espesores de pared y la conveniencia de utilizar los materiales que tuvieran la menor difusividad térmica, tal y como se había previsto y definido en un apartado anterior y que además fueran capaces de soportar la temperatura límite de 270°C. Las poliimididas, las zirconas, así como el cerámico Macor proporcionado por ArcelorMittal, fueron entonces los materiales seleccionados.

En cuanto al sensor este modelizó siempre como polipropileno ($\lambda=0.12\text{W/mK}$), asemejándolo al molde de plástico que lo recubre.

En el programa ABAQUS es necesario establecer un tiempo de cálculo en el Step del programa, que se ha tomado como 14400 segundos (4 horas), en el caso de que el sensor entre en régimen estable, es decir el programa encuentra un equilibrio entre la temperatura externa y la interna, pero si transcurrido ese tiempo todavía no ha entrado en régimen estable, se prolongará el cálculo durante el tiempo necesario hasta alcanzar el equilibrio.

Se han analizado además dos supuestos: la superficie exterior de la cerámica alcanza instantáneamente los 270°C (543K), o existencia de una etapa de convección forzada, es decir, convección de los humos y gases presentes en la atmósfera del horno a alta temperatura, en cuyo caso la superficie externa del sensor se calentaría de modo progresivo hasta los 270°C. La Tabla 3.6 muestra los coeficientes de convección típicos. A falta de otros datos, en este trabajo se ha tomado siempre $h=100 \text{ W/m}^2\text{K}$. El uso de este coeficiente u otro habría de validarse con la realización de alguna prueba experimental.

Medio	Coefficiente de transferencia de calor h ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Tabla 3.6. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Se detallan a continuación los resultados obtenidos en las distintas pruebas practicadas, utilizando el MACOR como material cerámico protector, y la poliimida y zircona como aislantes y el polipropileno como material constitutivo del sensor.

PRUEBA 1

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Poliimida (10 mm de espesor)

a) **Sin convección forzada** (la superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

- **Duración total de la prueba: 4 horas**

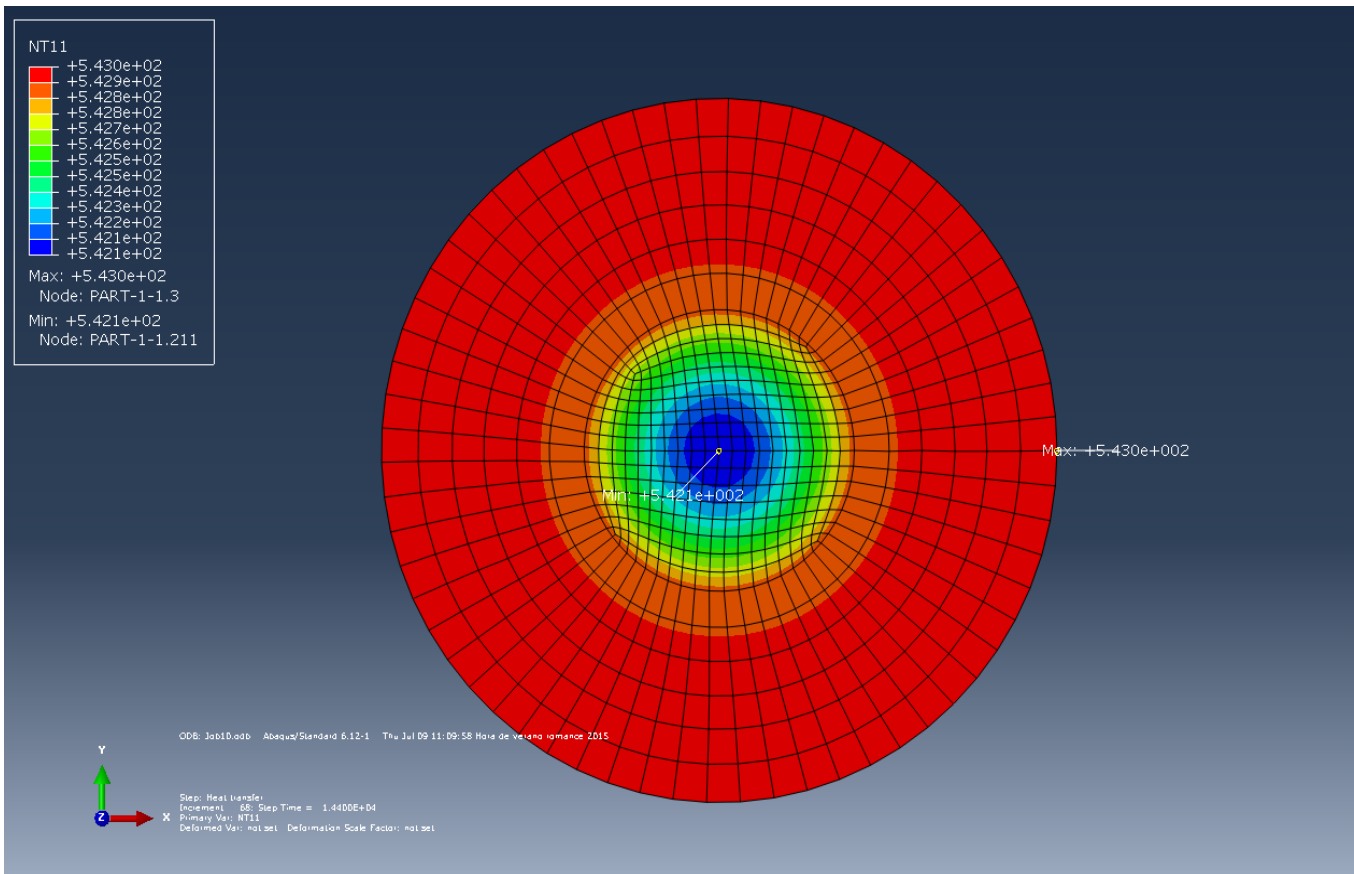


Fig. 3.11. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

En la Fig. 3.11 se ha representado la distribución de temperaturas en el conjunto al cabo de 14400 segundos a 270°C. Como vemos, al cabo de las 4 horas de mantenimiento prácticamente ya se ha alcanzado el equilibrio, siendo la temperatura en la superficie externa 270°C (543 K) y en el sensor 269°C (542K).

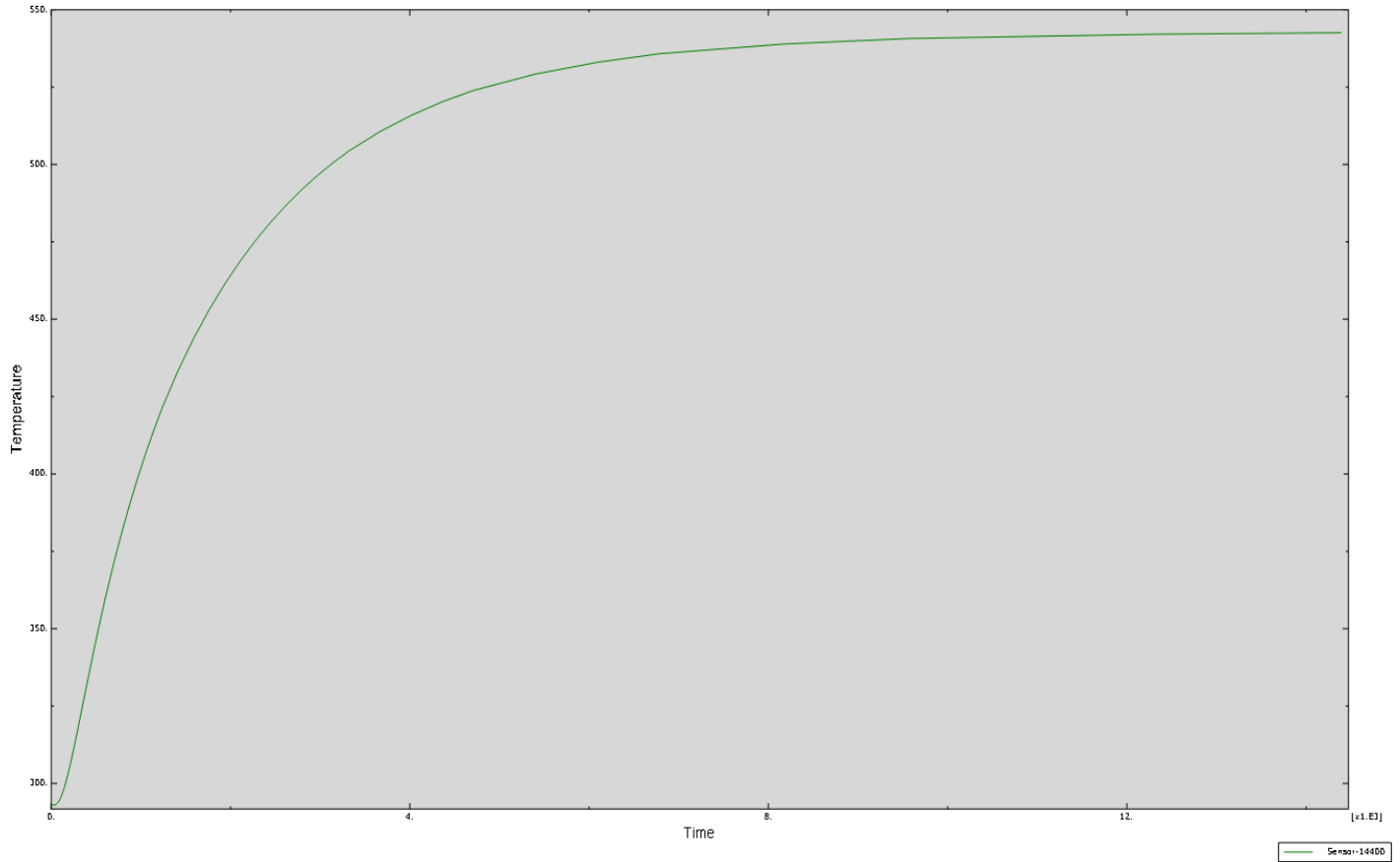


Fig. 3.12. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

La evolución de la temperatura en el sensor a lo largo del tiempo de mantenimiento a 270°C se ha representado en la Fig. 3.12. Con estos datos se ha determinado que en este caso el sensor tardaría en alcanzar los 80°C (543K), que se habían establecido como límite para un buen funcionamiento, en torno a 600 segundos, es decir 10 minutos.

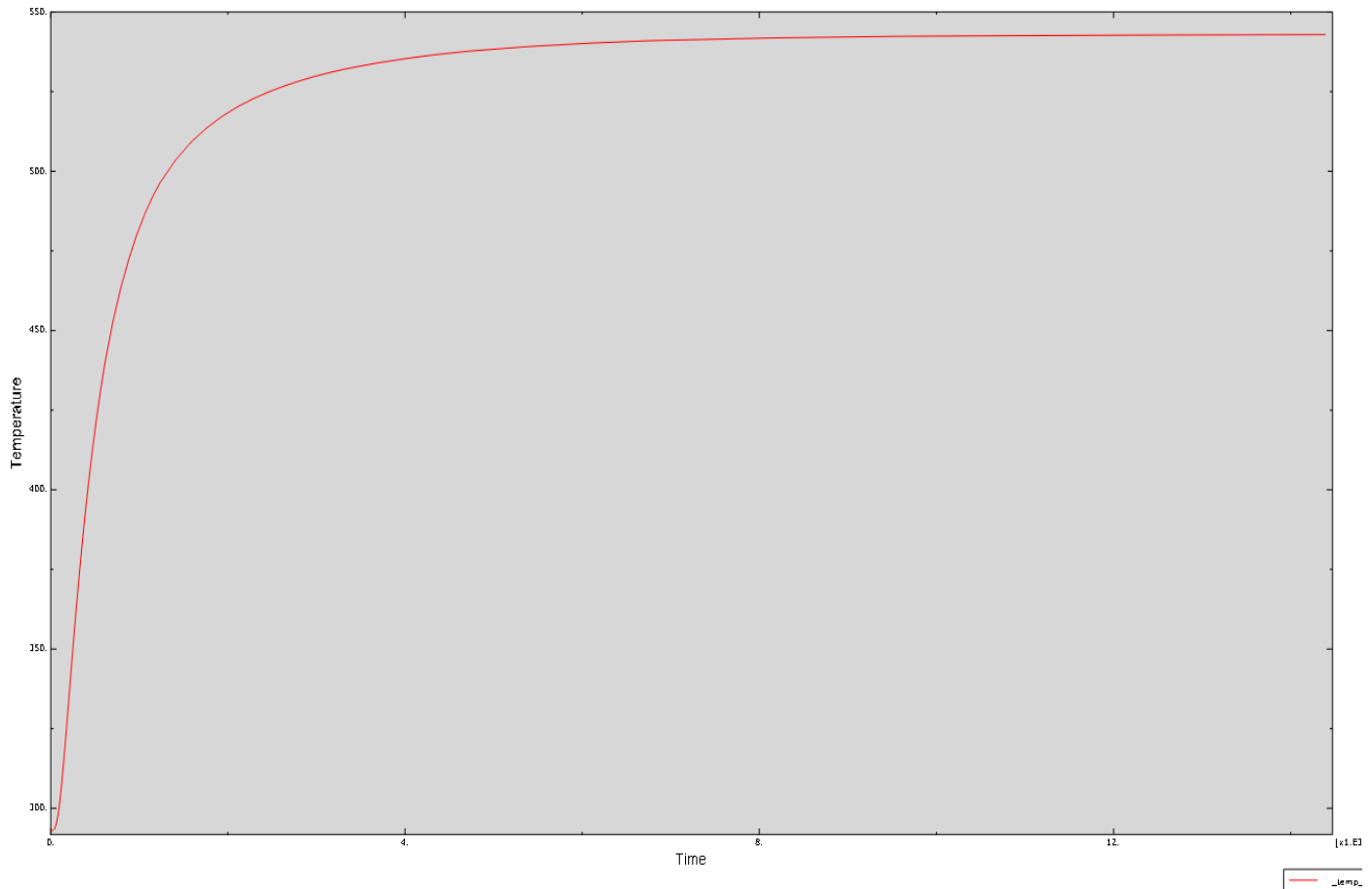


Fig. 3.13. Evolución de la temperatura de la pared interna del aislante durante el mantenimiento a 270°C.

Con los datos de la Fig. 3.13 también se puede apreciar que la pared interna del aislante de poliimida ya alcanzó el equilibrio (270°C) al cabo de unos 8000 segundos.

Por otro lado, en la Fig. 3.14 se ha representado la distribución térmica en el conjunto al finalizar las 4 horas de mantenimiento a 270°C (543K). En la figura se aprecian tres pendientes distintas, correspondiendo cada una de ellas a un material distinto, siendo la región con la mayor temperatura la capa de cerámica Macor externa, la de temperatura intermedia la del aislante (poliimida), y la de menor temperatura, zona interna, la del sensor (polipropileno).

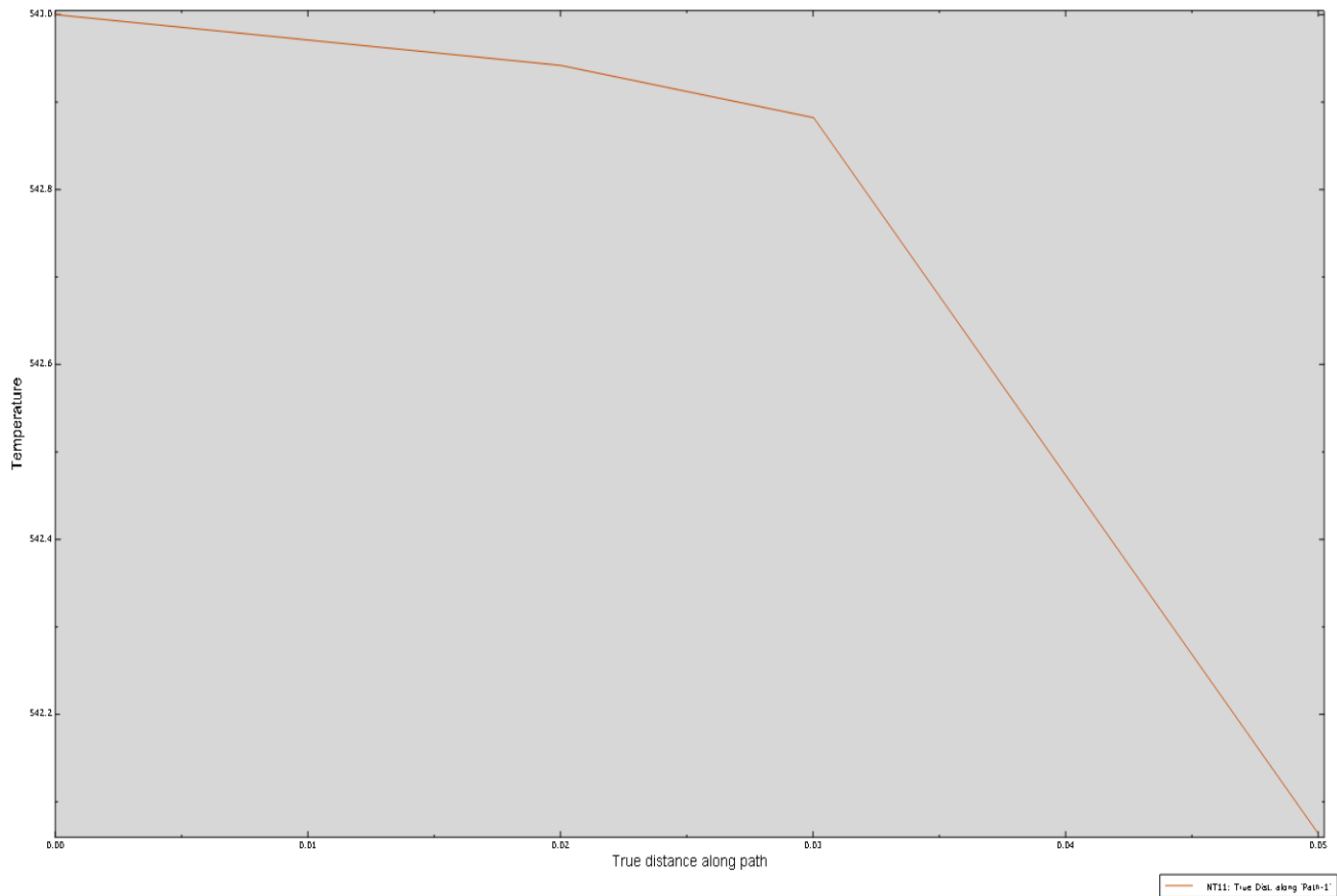


Fig. 3.14. Variación de la temperatura a lo largo del espesor del conjunto al cabo de las 4 horas de mantenimiento a 270°C.

b) Con convección forzada (h= 100)

- **Duración total de la prueba: 4 horas**

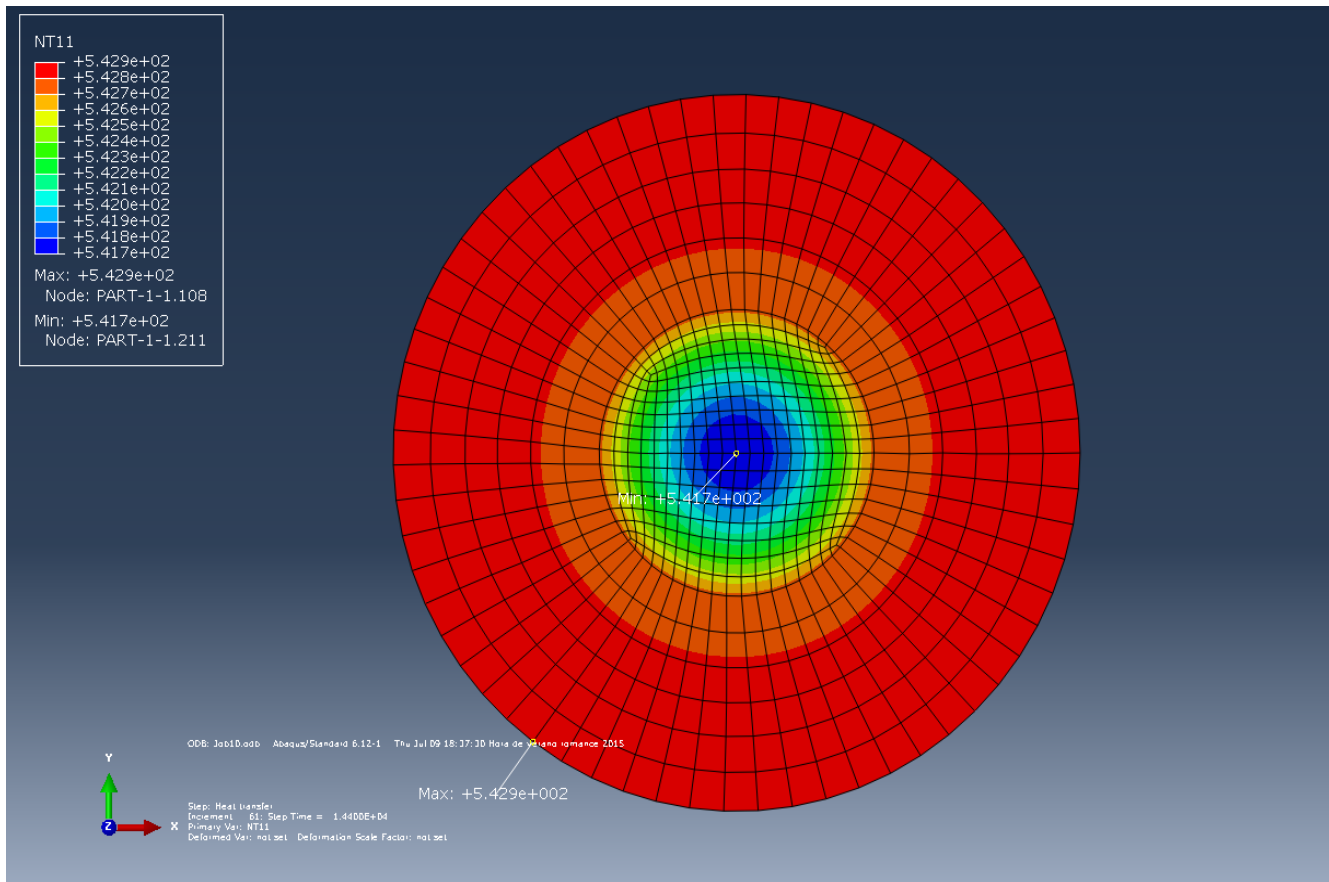


Fig. 3.15. Temperatura nodal con convección al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

En la Fig. 3.15, podemos ver que la temperatura interior al cabo de 4 horas de mantenimiento es de 269°C (542K), cuando la temperatura exterior es de 543K (270°C).

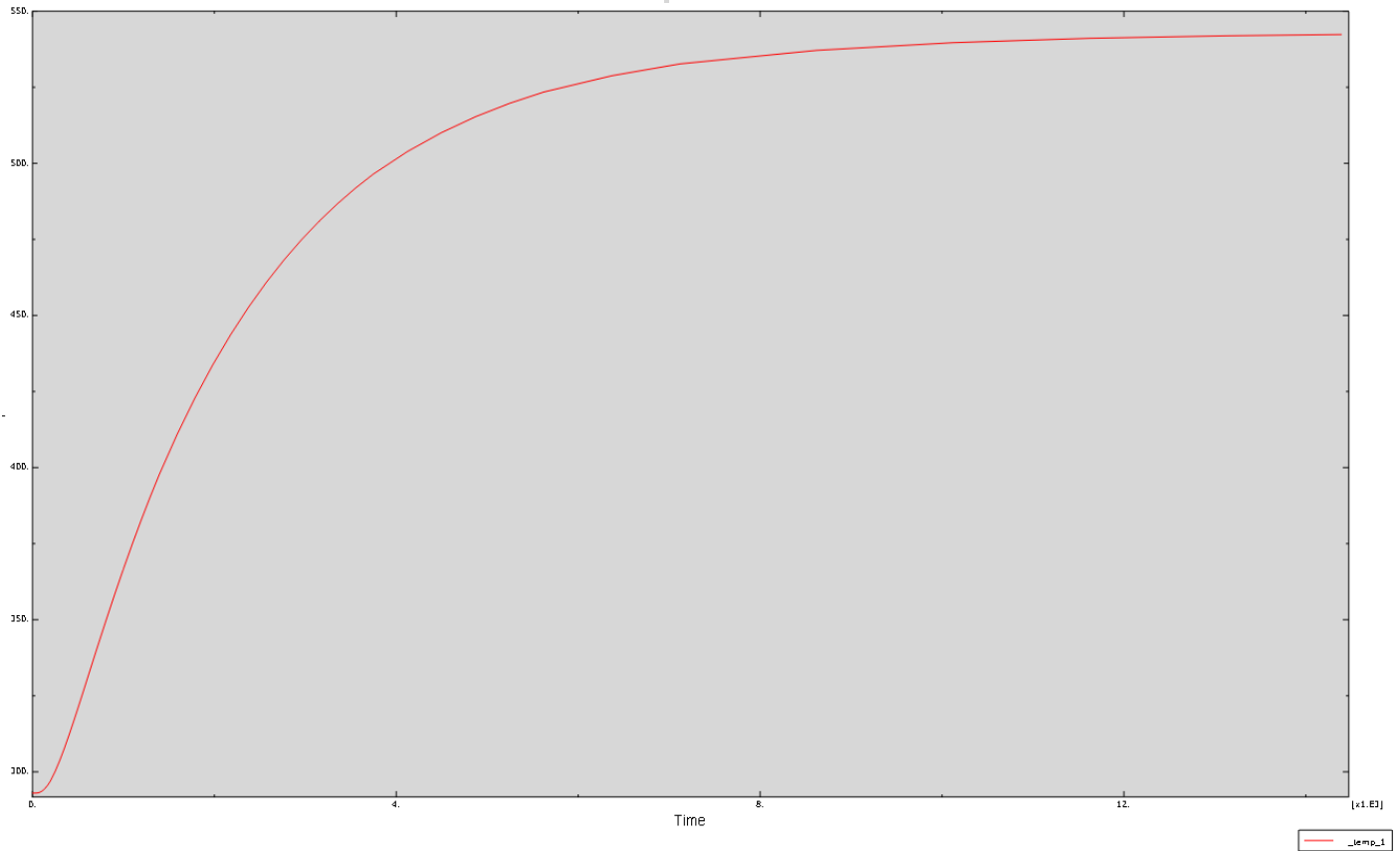


Fig. 3.16. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

La convección forzada no ofrece resultados muy diferentes a suponer que se alcanza la máxima temperatura instantáneamente en la cara exterior de la cerámica. La principal diferencia estriba en que en el primer caso el calor se transmite muy rápidamente durante los primeros minutos, mientras que cuando se tiene en cuenta la convección, el calor tarda más en llegar al principio de la prueba. En este caso, la Fig. 3.16 nos dice que el sensor alcanza ahora los 80°C al cabo de unos 850 segundos aproximadamente (algo más de 14 minutos).

PRUEBA 2

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Zircona (10 mm de espesor)

a) Sin convección forzada (la superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

- **Duración total de la prueba: 4 horas**

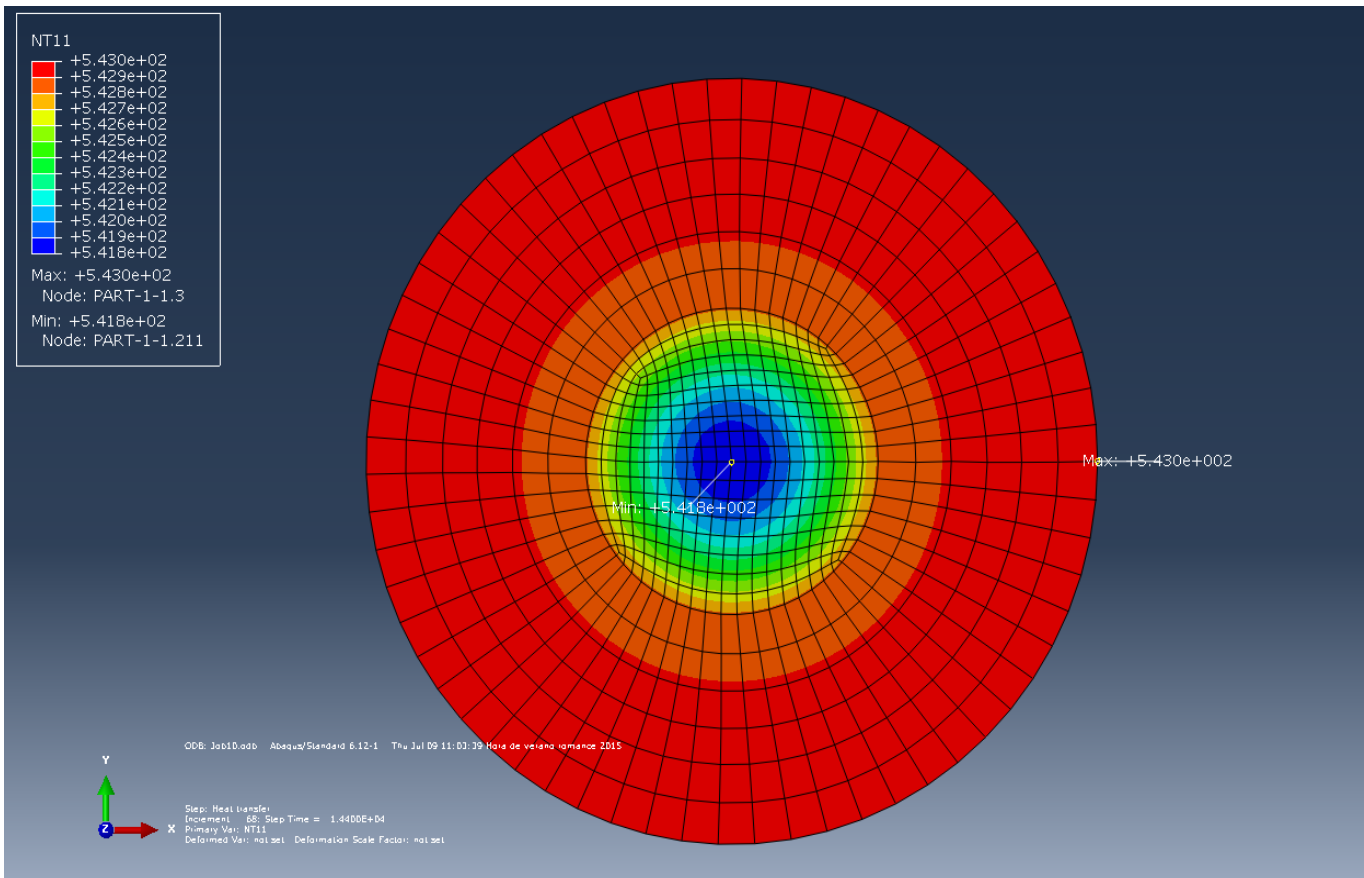


Fig. 3.17. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba..

En esta segunda prueba en la que se utilizó la zircona como material aislante, al cabo del tiempo previsto la temperatura interna es 268°C (541K) para una temperatura externa de 270°C (543K), véase la Fig. 3.17.

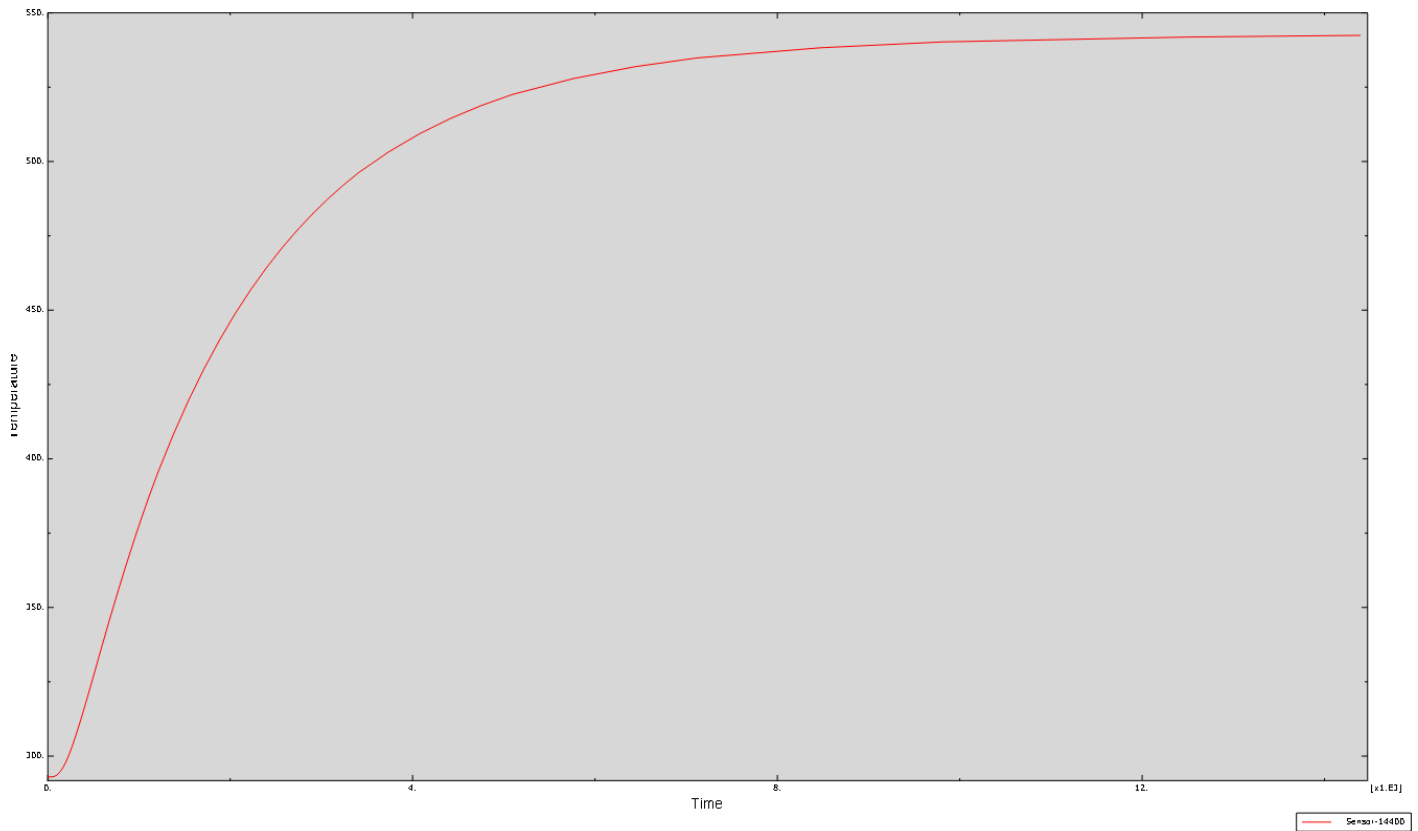


Fig. 3.18. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

De acuerdo con los datos representados en la Fig. 3.18, el sensor alcanza los 80°C (543K) en unos 900 segundos (15 minutos), por lo que se comprueba que la zircona funciona mejor que la poliimida en esta aplicación.

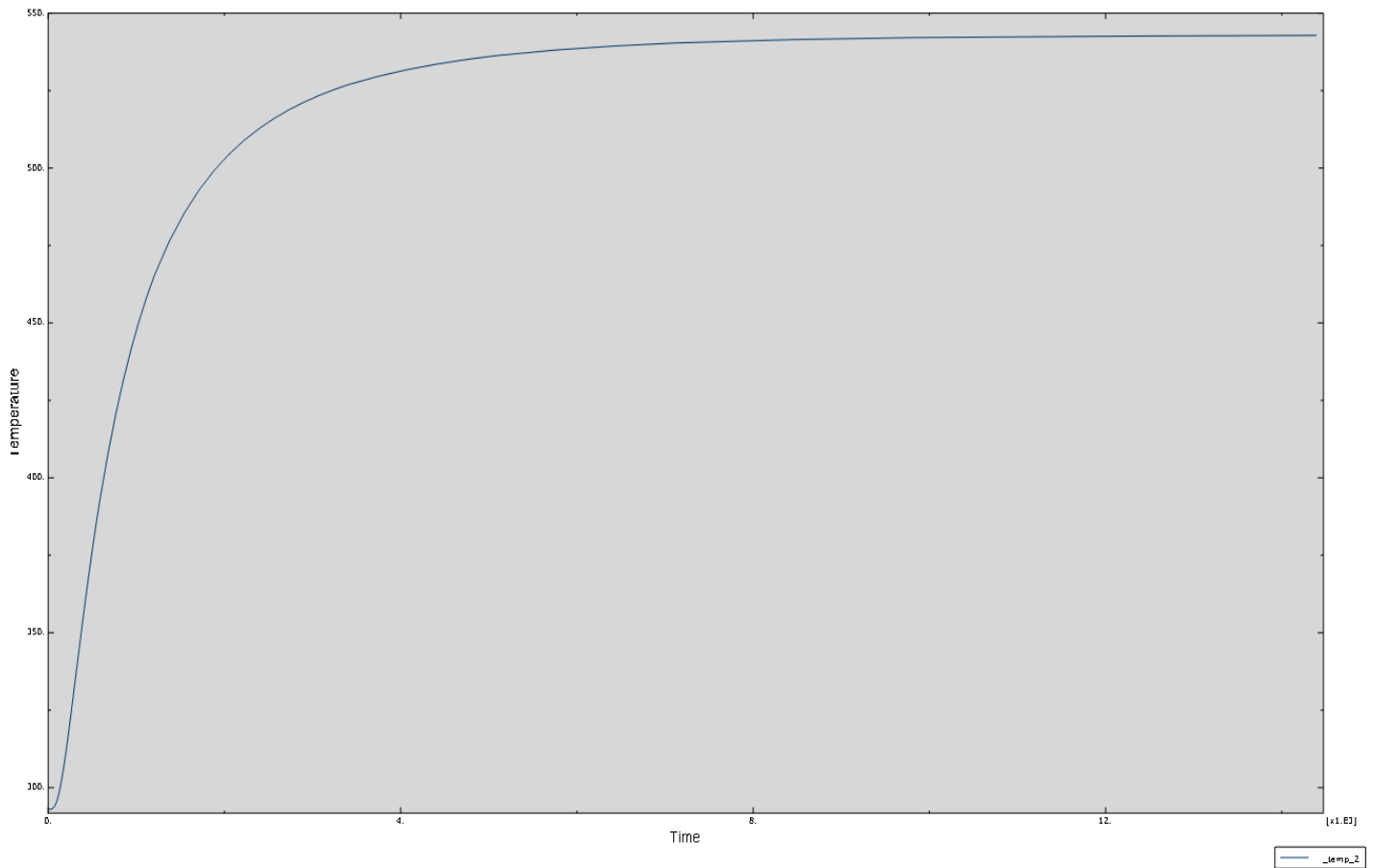


Fig. 3.19. Evolución con el tiempo de la temperatura de la pared interna del aislante.

Por otro lado, tomando ahora los datos representados en la Fig. 3.19, la pared interna del material aislante alcanza el régimen estable al cabo de unos 9500 segundos. Además, en la Fig. 3.20 se presenta la distribución de la temperatura en los tres materiales del conjunto al finalizar la prueba (4 horas a 270°C).

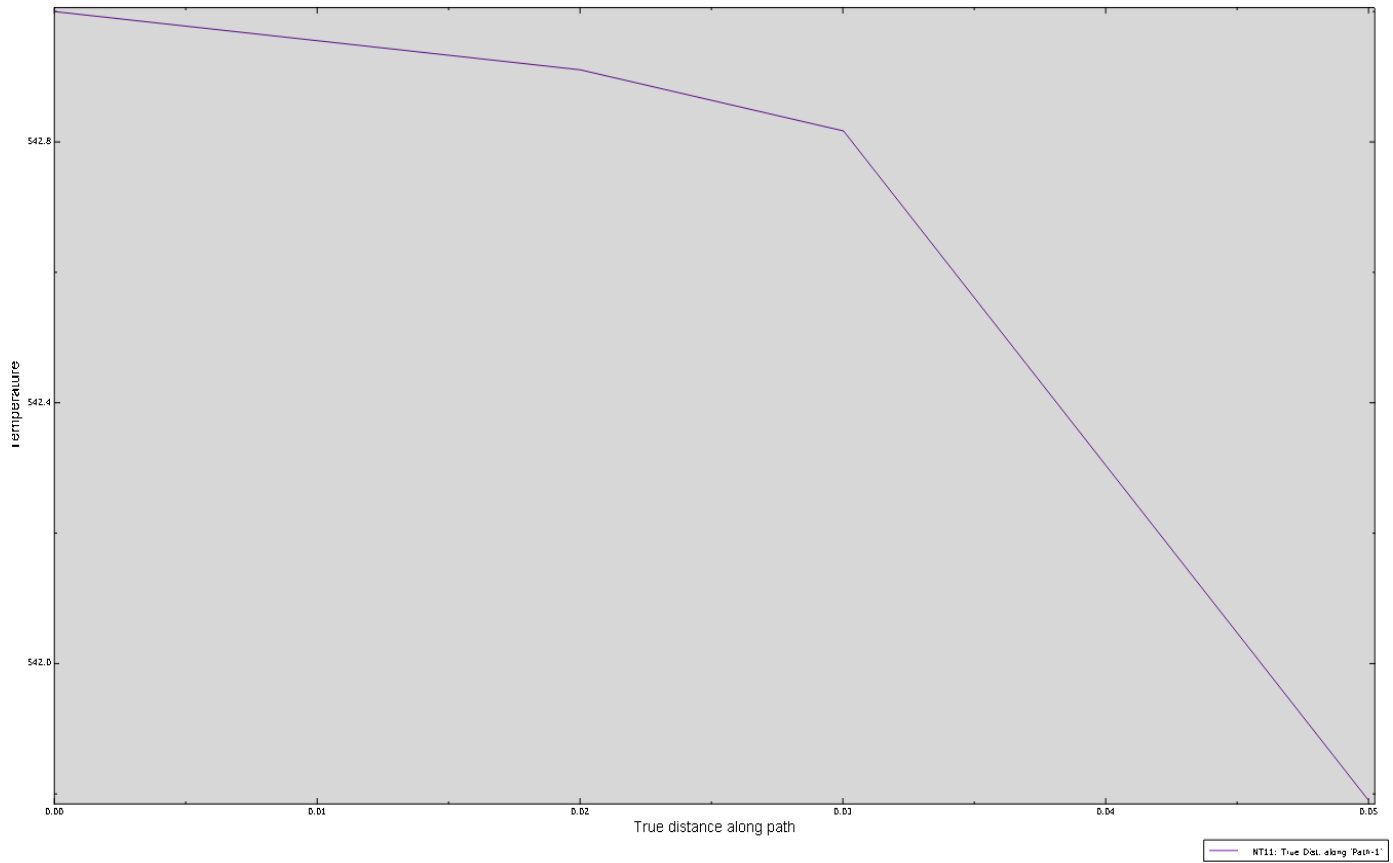


Fig. 3.20. Variación de la temperatura a lo largo del espesor del conjunto al cabo de las 4 horas de mantenimiento a 270°C.

b) Con convección forzada (h=100)

- **Duración total de la prueba: 4 horas**

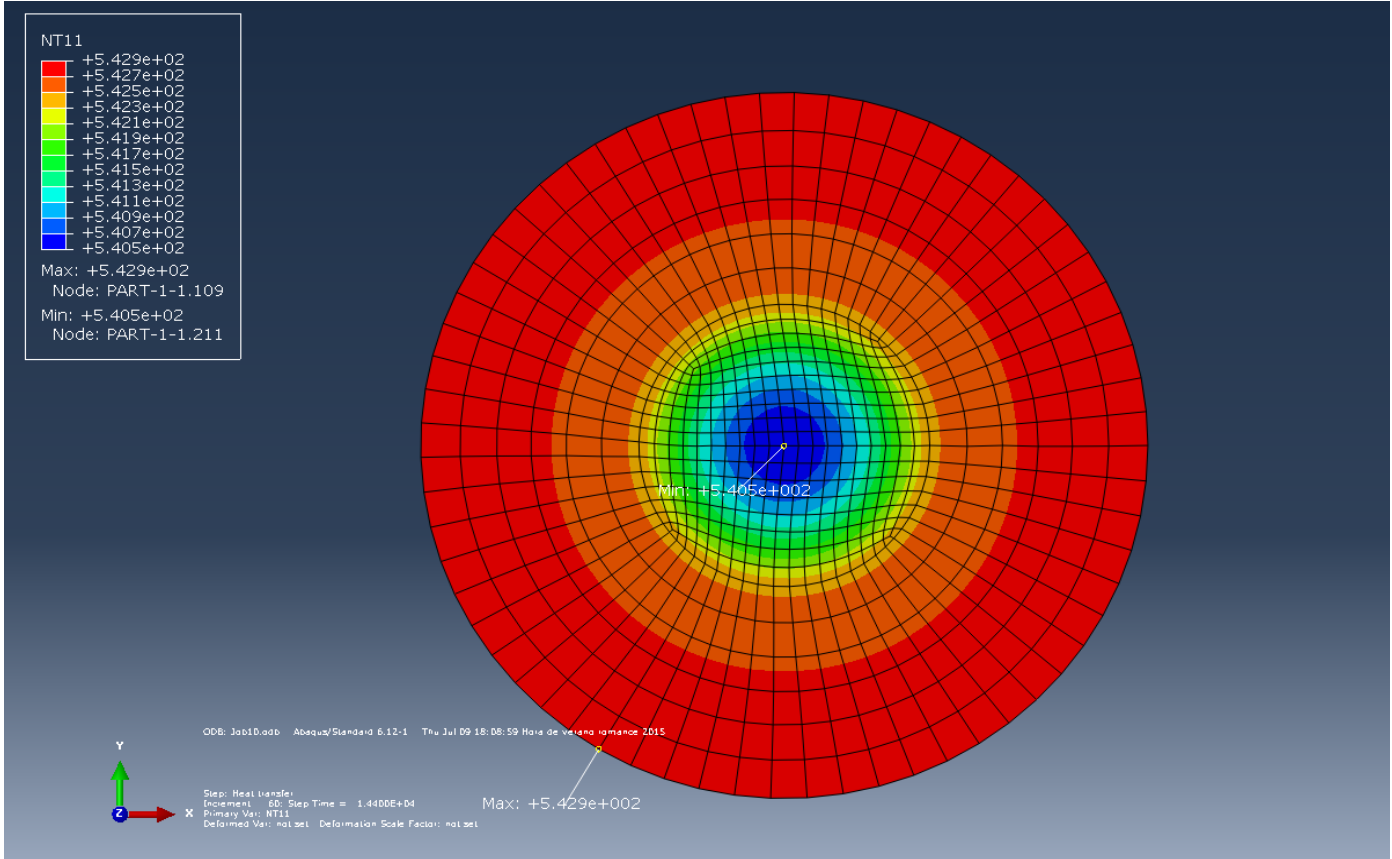


Fig.3.21. Temperatura nodal con convección al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

En la Fig. 3.21, los valores límite son 267°C (540K) en el interior para una temperatura exterior de 270°C (543K).

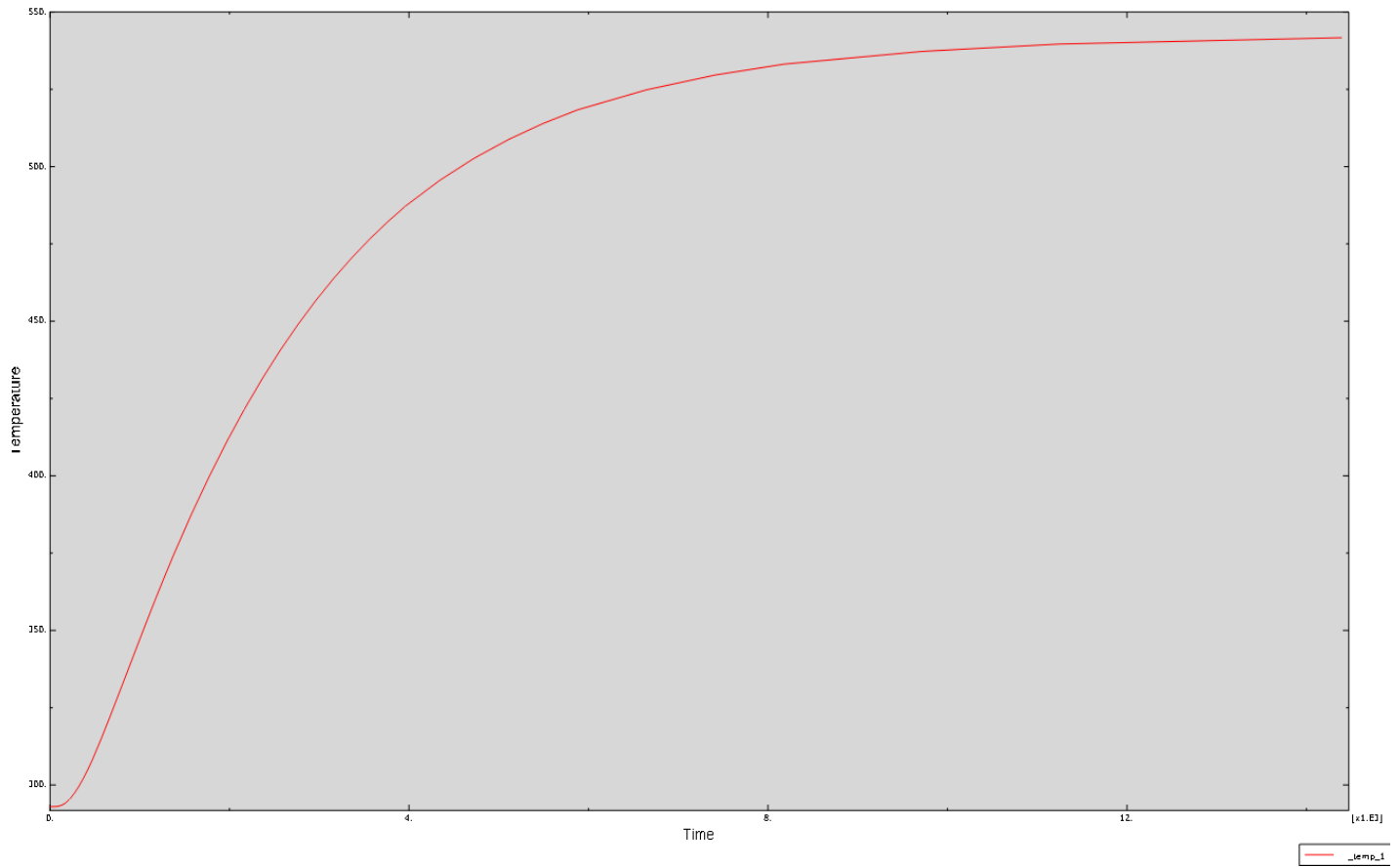


Fig. 3.22. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

En este caso se ha comprobado que el sensor alcanza ahora los 80°C al cabo de aproximadamente 1000 segundos, es decir en algo más de 16 minutos (Fig. 3.22).

PRUEBA 3

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Poliimida (20 mm de espesor)

a) Sin convección forzada (la superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

-Duración total de la prueba: 4 horas

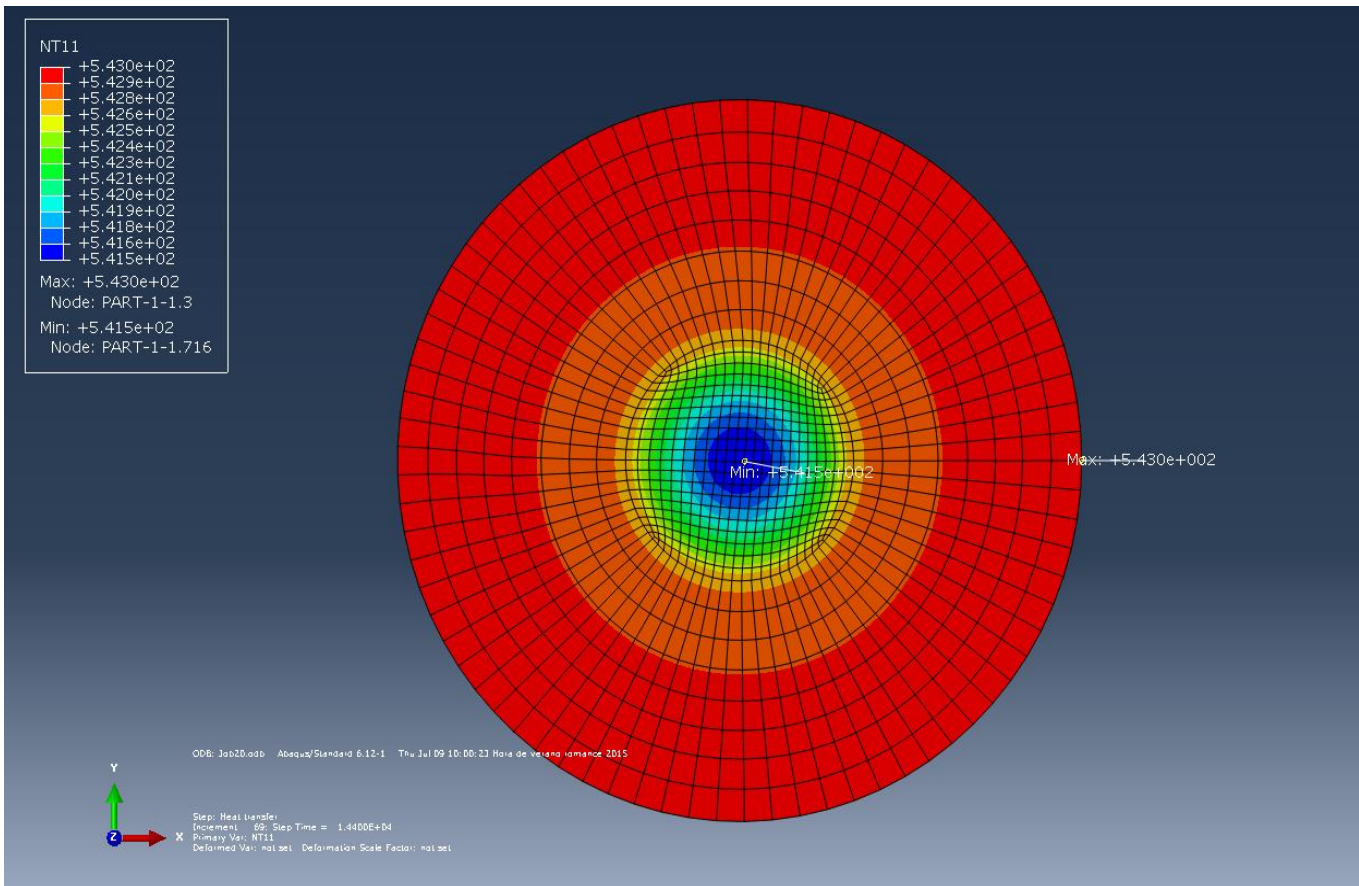


Fig. 3.23. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

Los valores límite al finalizar la prueba son ahora 269°C (542K) en el interior cuando la temperatura externa es 270°C (543K), véase la Fig. 3.23.

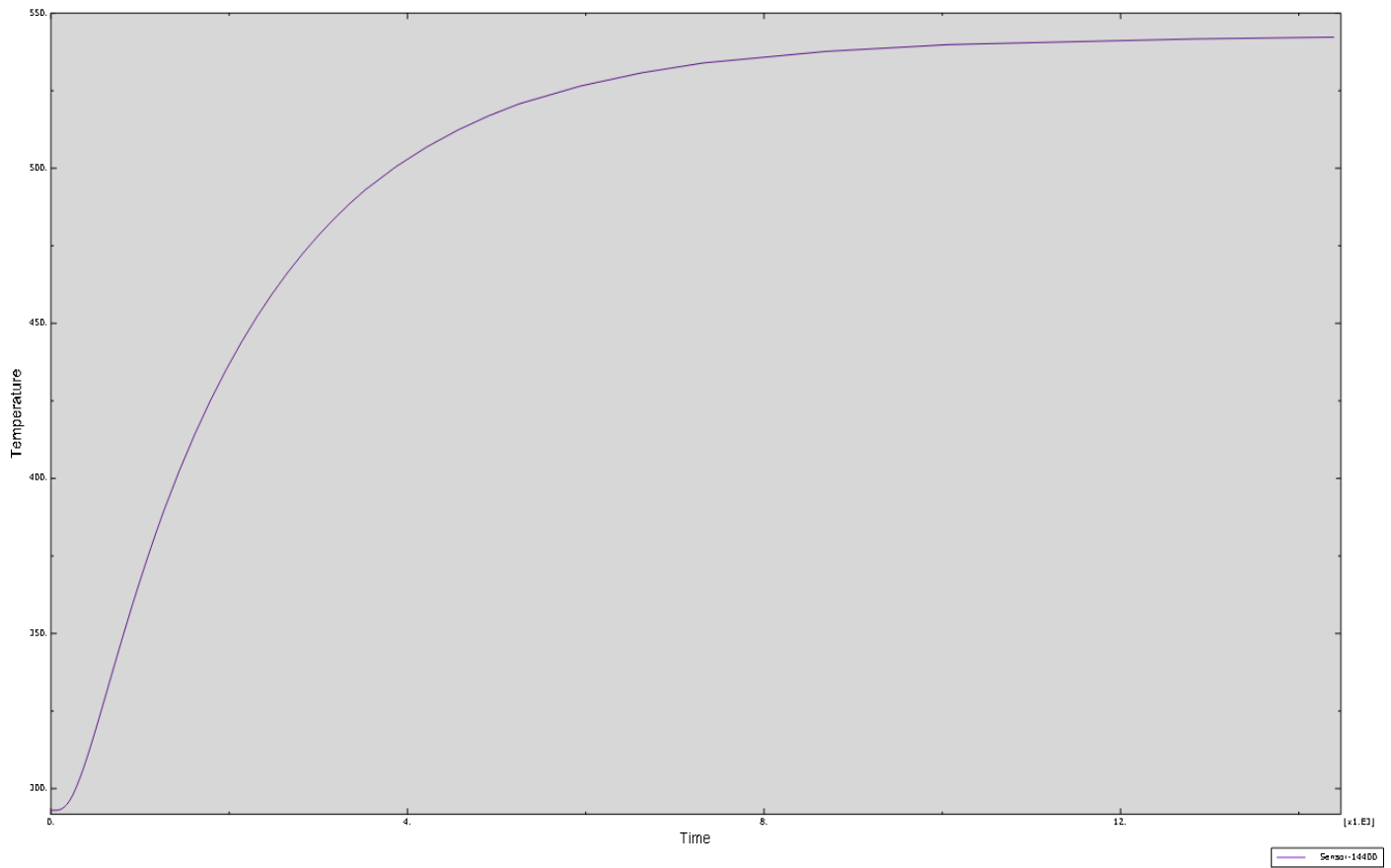


Fig. 3.24. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

En este caso el sensor alcanza los 80°C (353K) en aproximadamente 950 segundos, es decir, tras casi 16 minutos (Fig. 3.24).

b) Con convección forzada ($h=100$)

-Duración total de la prueba: 4 horas.

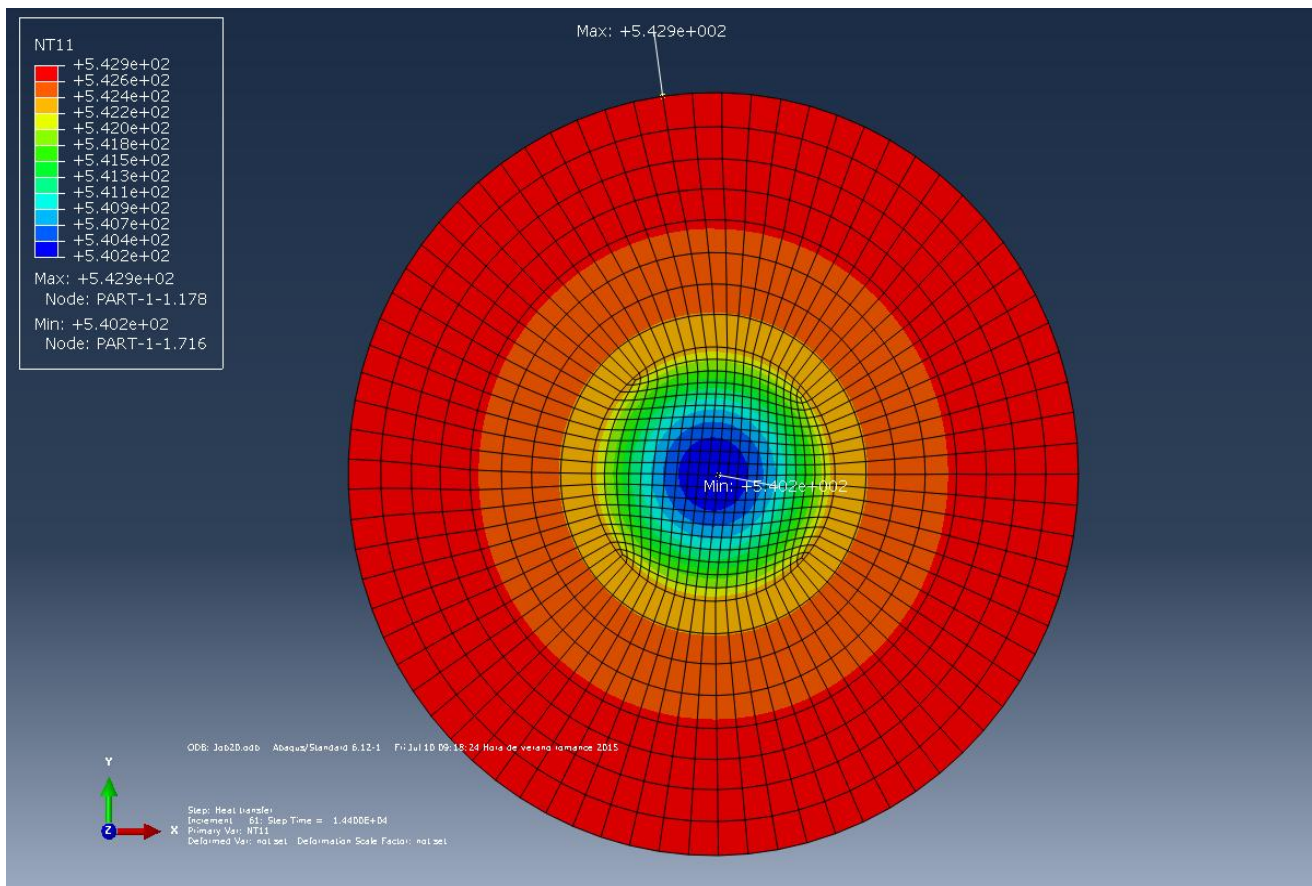


Fig. 3.25. Temperatura nodal con convección al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

Los valores límite al finalizar la prueba son ahora 267°C (540K) en el interior para una temperatura externa de 270°C (543K), véase la Fig. 3.25.

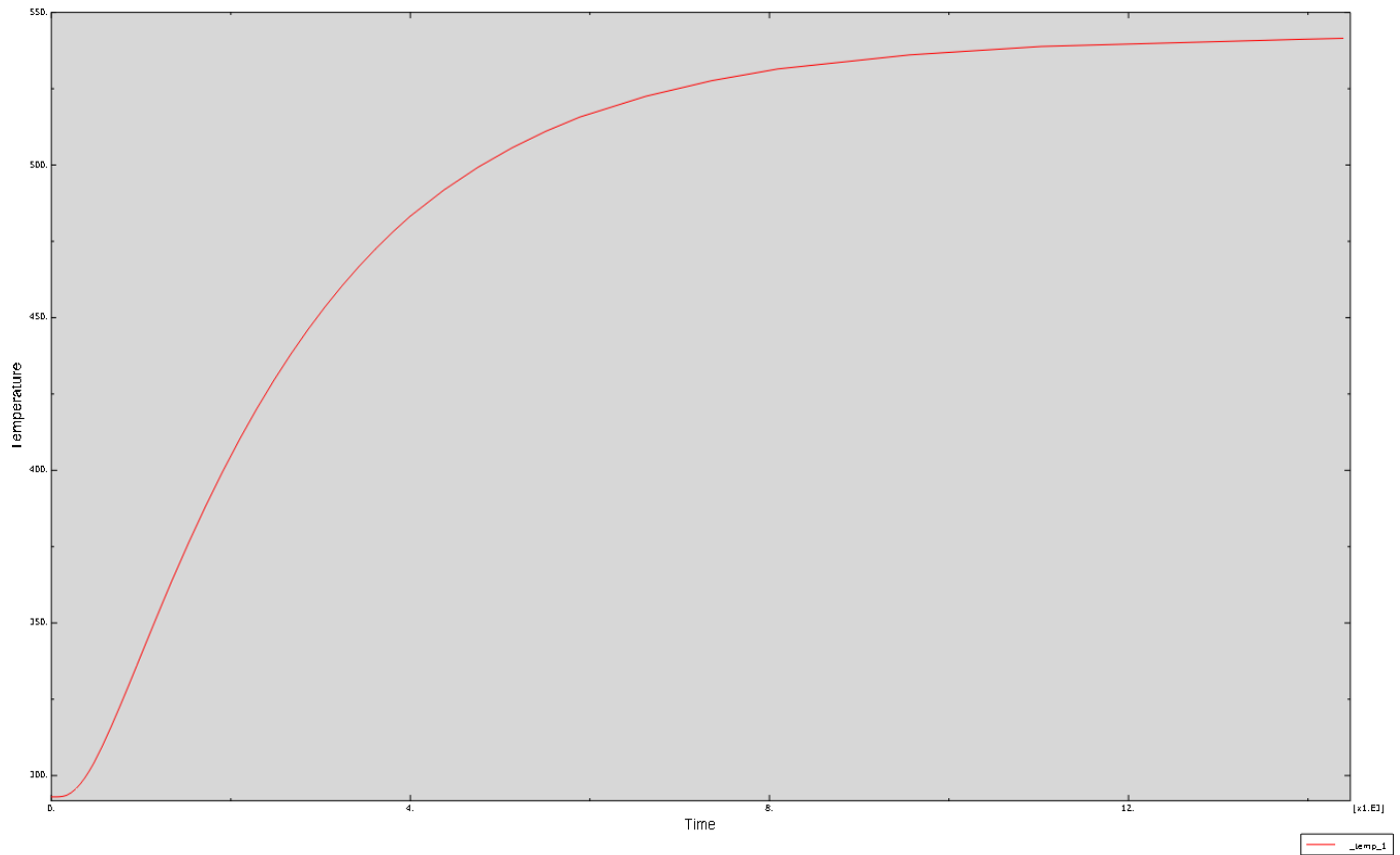


Fig. 3.26. Evolución de la temperatura del sensor con el tiempo de mantenimiento a 270°C.

En este caso el sensor alcanza los 80°C (353K) en aproximadamente 1200 segundos, es decir, 20 minutos (Fig. 3.26).

PRUEBA 4

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Zircona (20 mm de espesor)

a) Sin convección forzada (a superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

-Duración total de la prueba: 4 horas

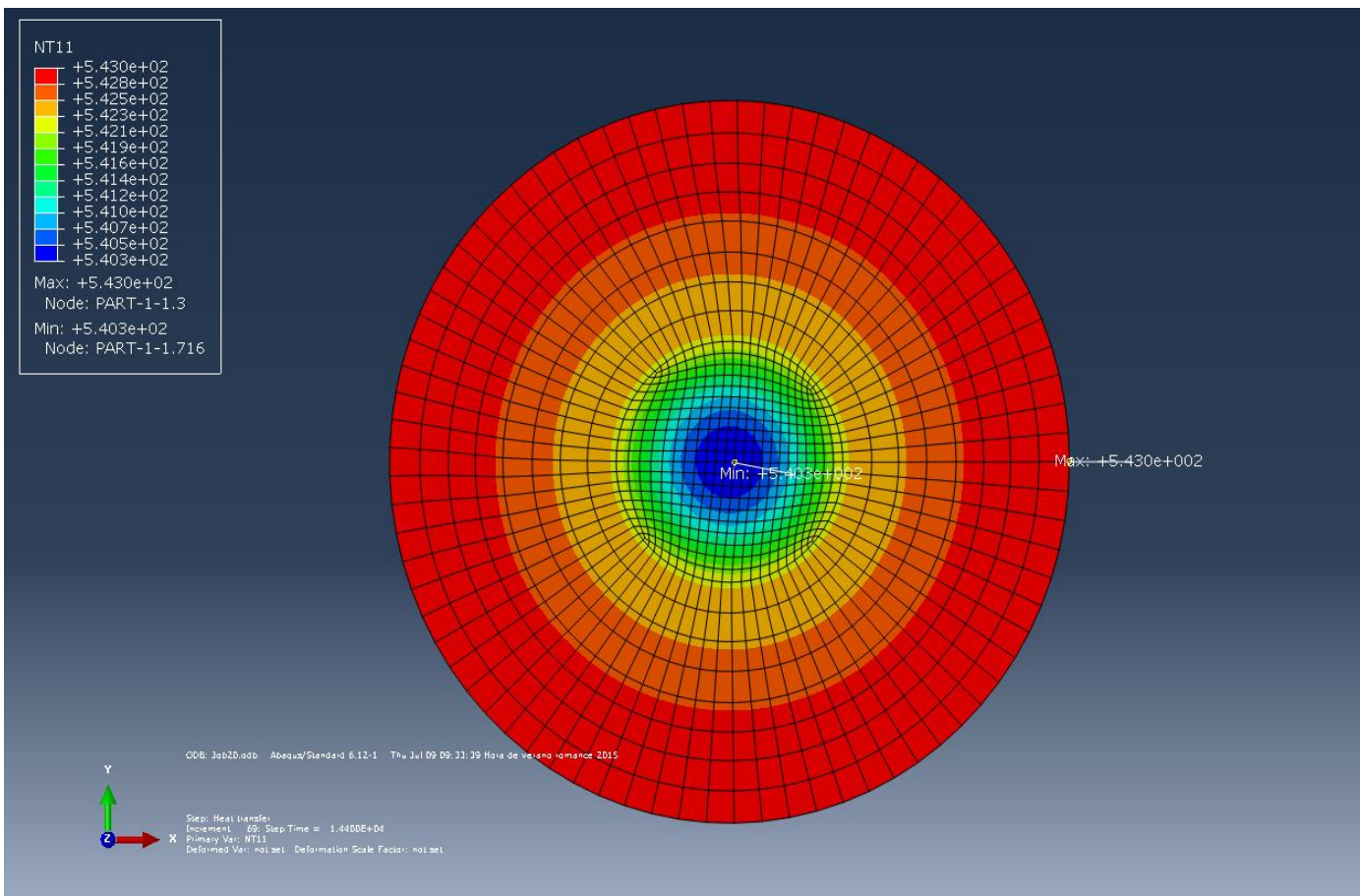


Fig. 3.27. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

Los valores límite al finalizar las 4 horas de la prueba son 267°C (540K) en el interior, y 270°C (543K) en el exterior (Fig. 3.27).

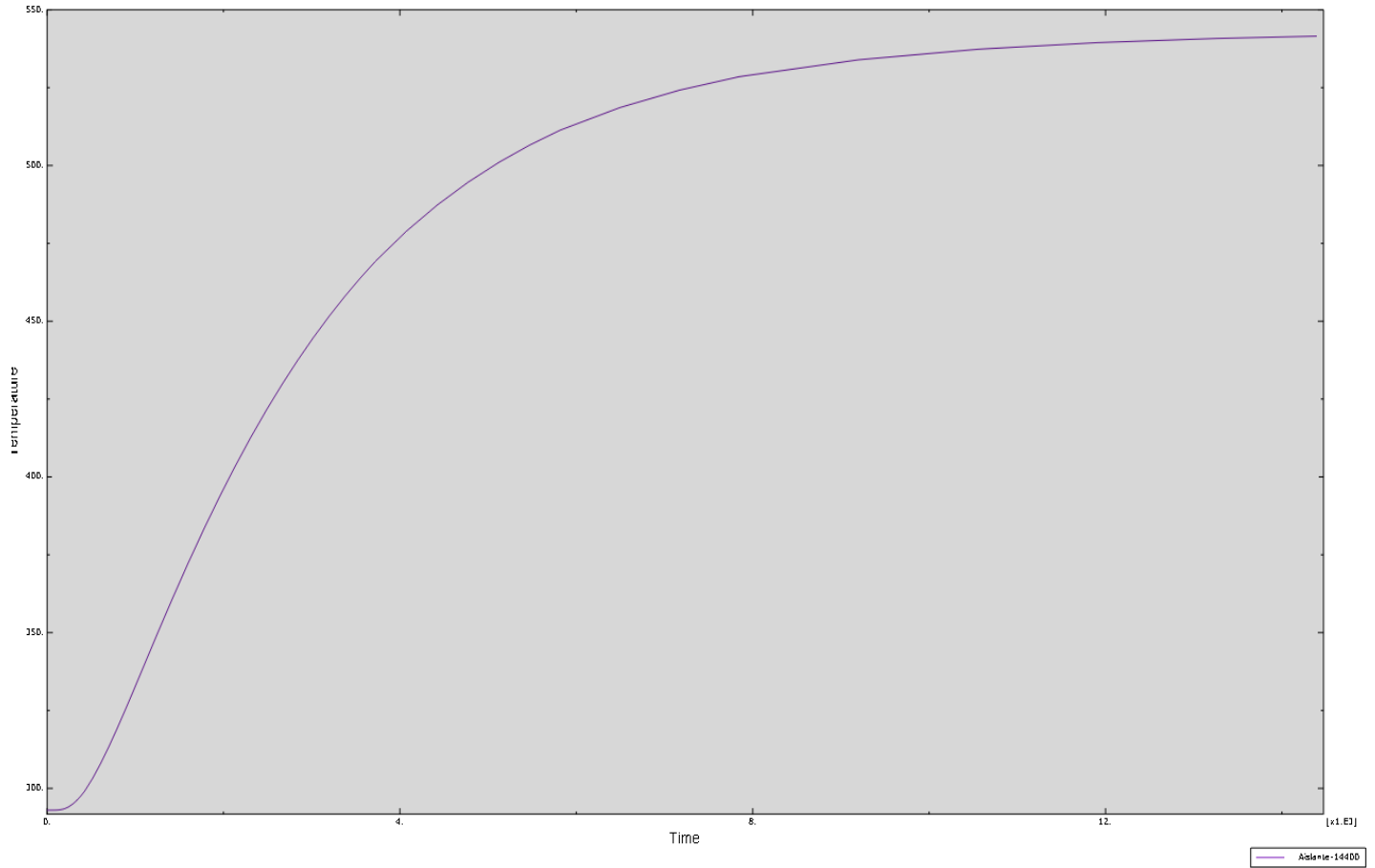


Fig. 3.28. Evolución de la temperatura del sensor durante el transcurso de la prueba.

En este caso, el tiempo que tarda el sensor en alcanzar los 80°C (353K) son unos 1400 segundos (más de 23 minutos), con lo que volvemos a comprobar que la zircona tiene una mejor capacidad aislante que la poliimida (Fig. 3.28).

b) Con convección forzada (h=100)

-Duración total de la prueba: 4 horas

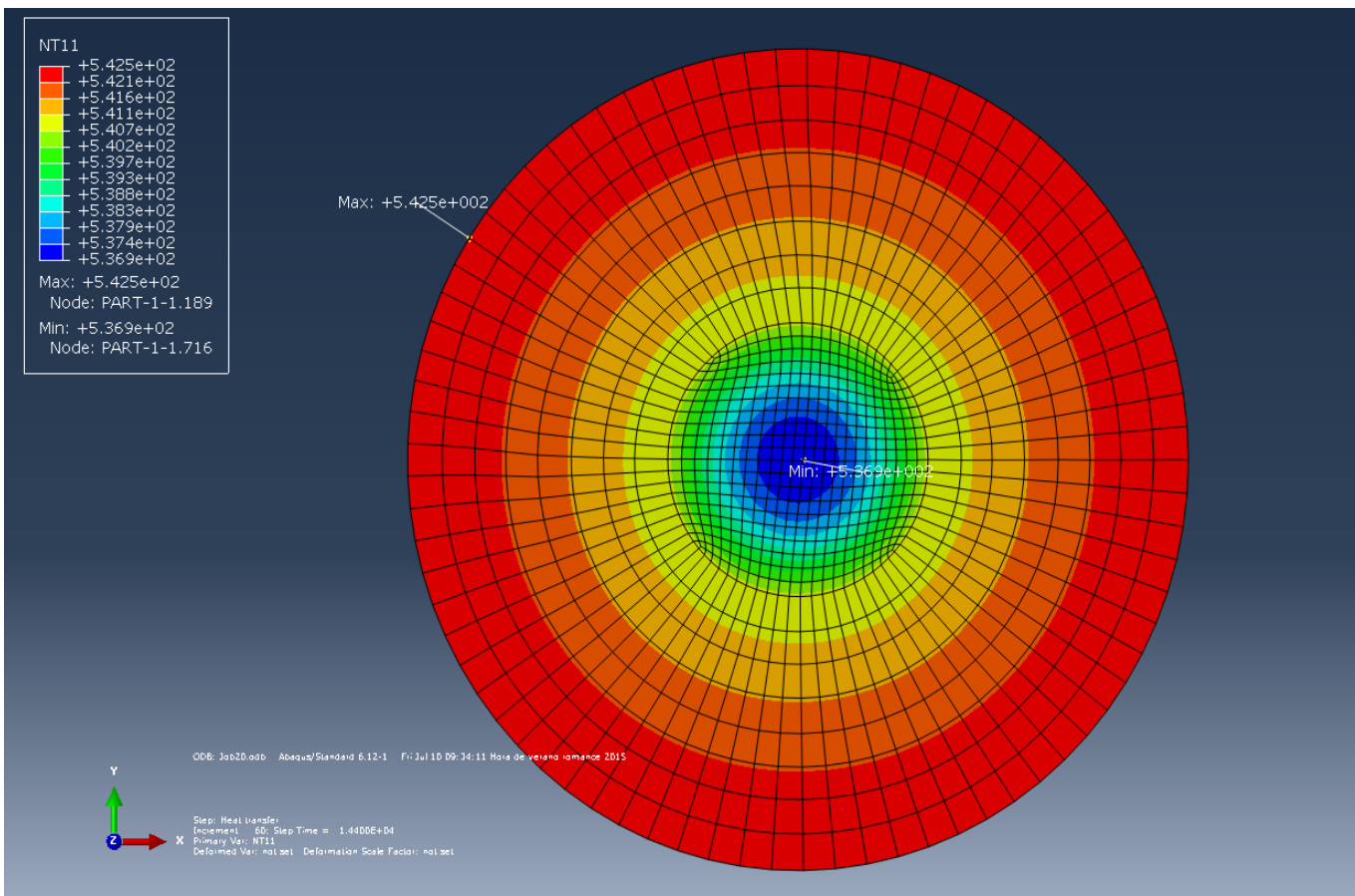


Fig. 3.29. Temperatura nodal con convección al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

Los valores límite serán 264°C (537K) en el interior y 270°C (543K) en el exterior (Fig. 3.29).

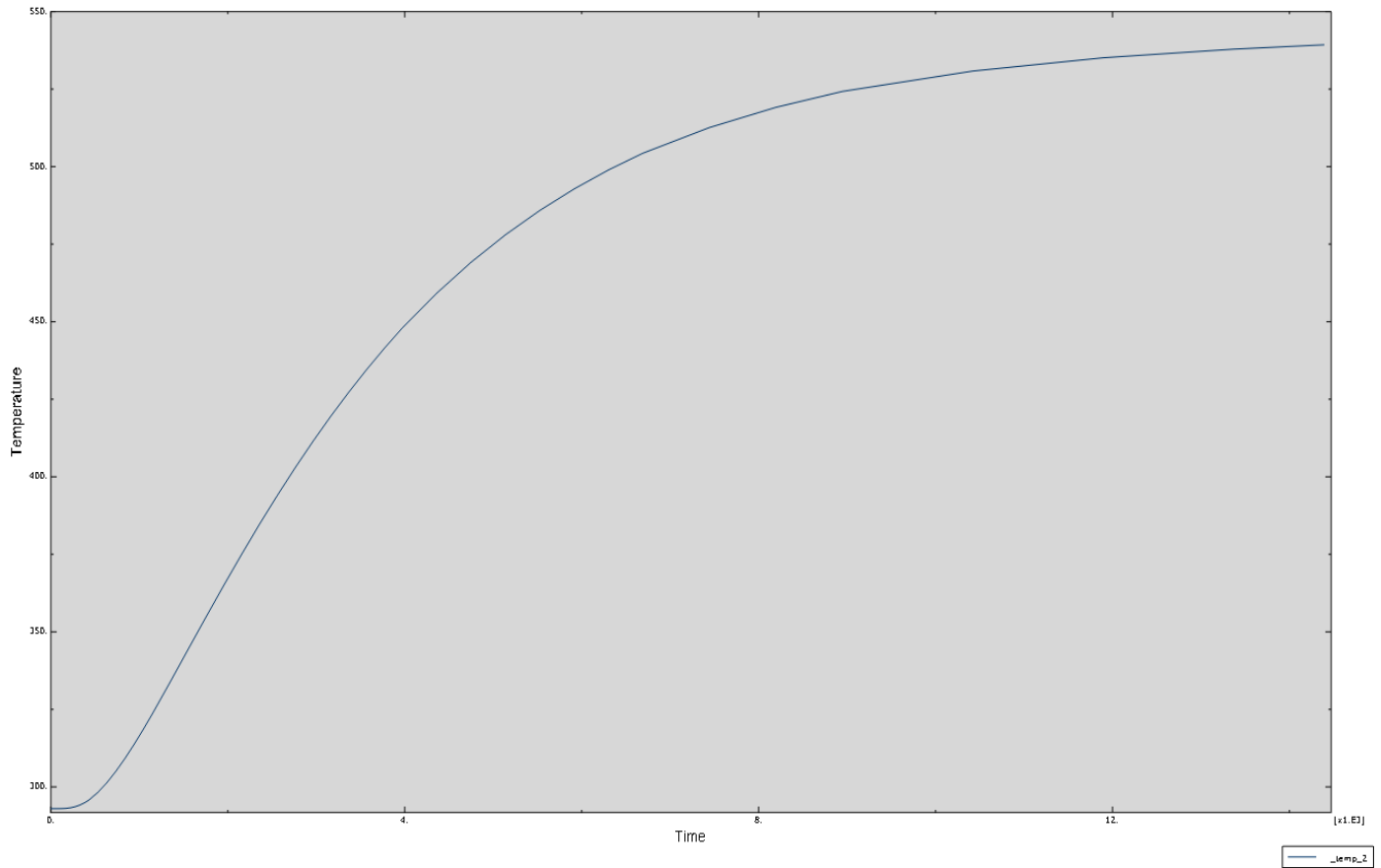


Fig. 3.30. Evolución de la temperatura del sensor con convección durante las 4 horas de la prueba.

En este caso el sensor alcanza los 80°C (353K) en aproximadamente 1750 s (más de 29 minutos).

PRUEBA 5

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Poliimida (30 mm de espesor)

a) **Sin convección forzada** (la superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

-Duración total de la prueba: 4 horas

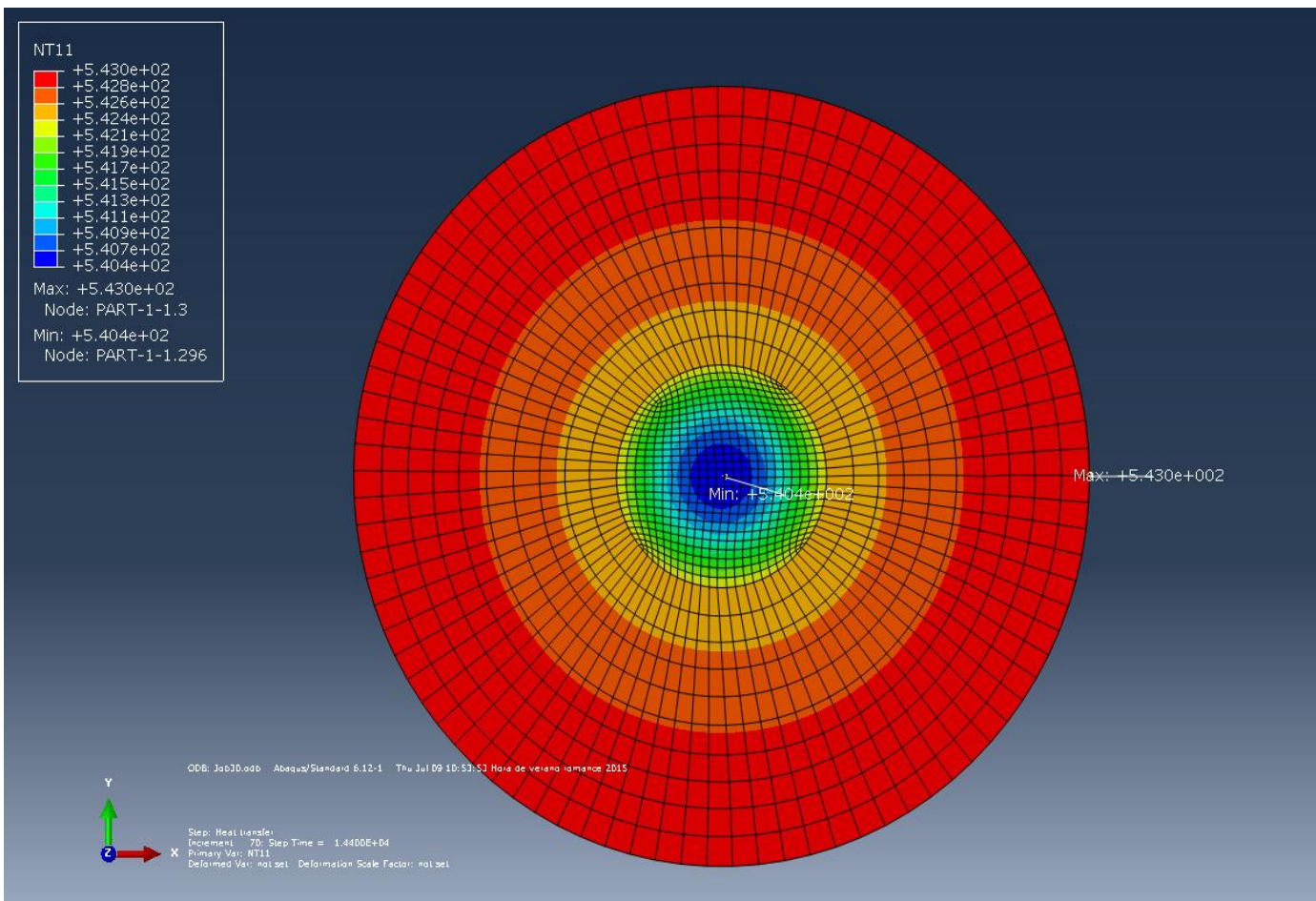


Fig. 3.31. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

Los valores límite son en este caso 267°C (540K) en el interior, y 270°C (543K) en el exterior (Fig. 3.31) al cabo de las 4 horas.

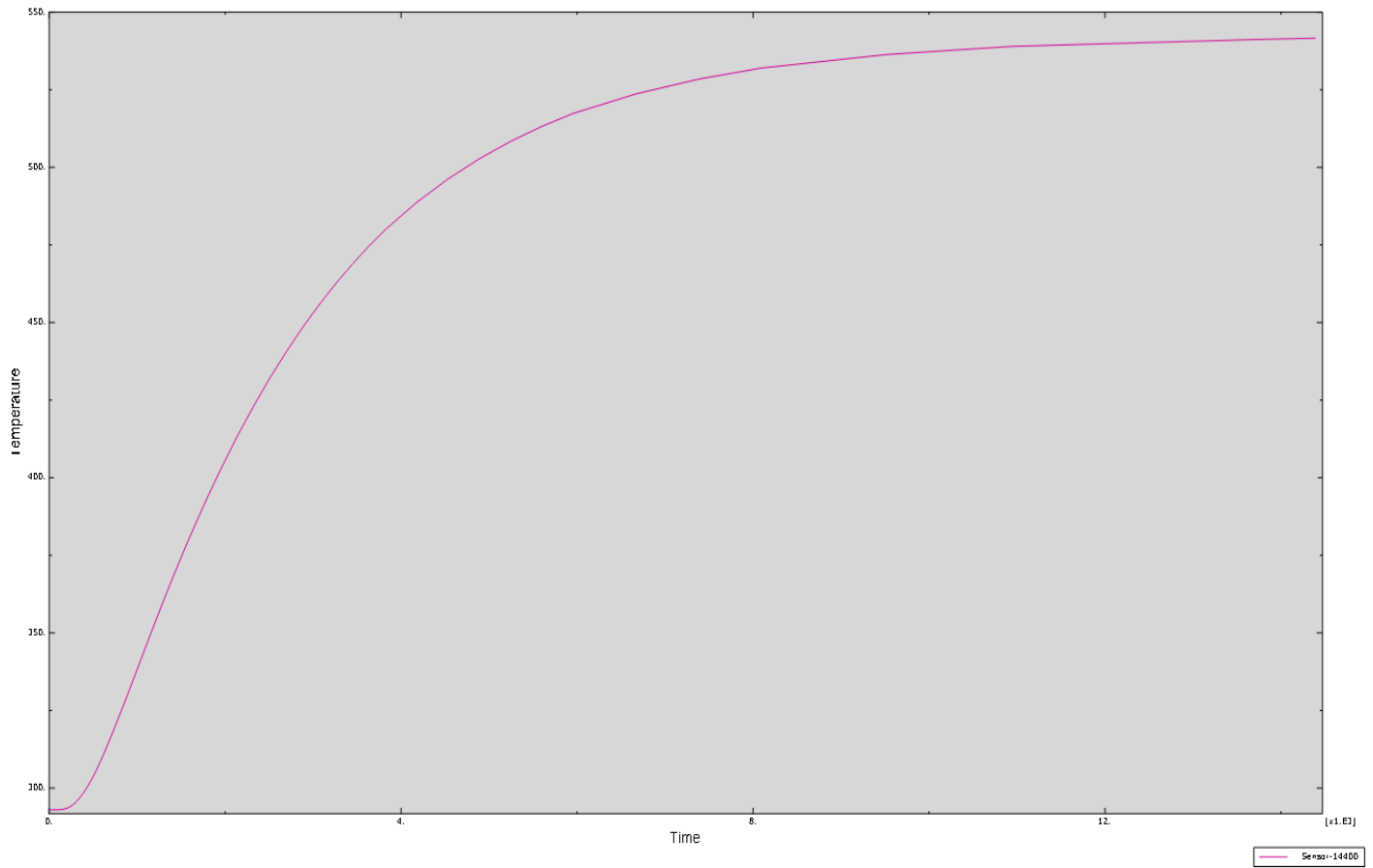


Fig. 3.32. Evolución de la temperatura del sensor durante las 4 horas de la prueba.

El sensor tarda aproximadamente 1300 s (más de 21 minutos) en alcanzar los 80°C (353K), véase la Fig. 3.32.

b) Con convección forzada (h=100)

-Duración total de la prueba: 4 horas

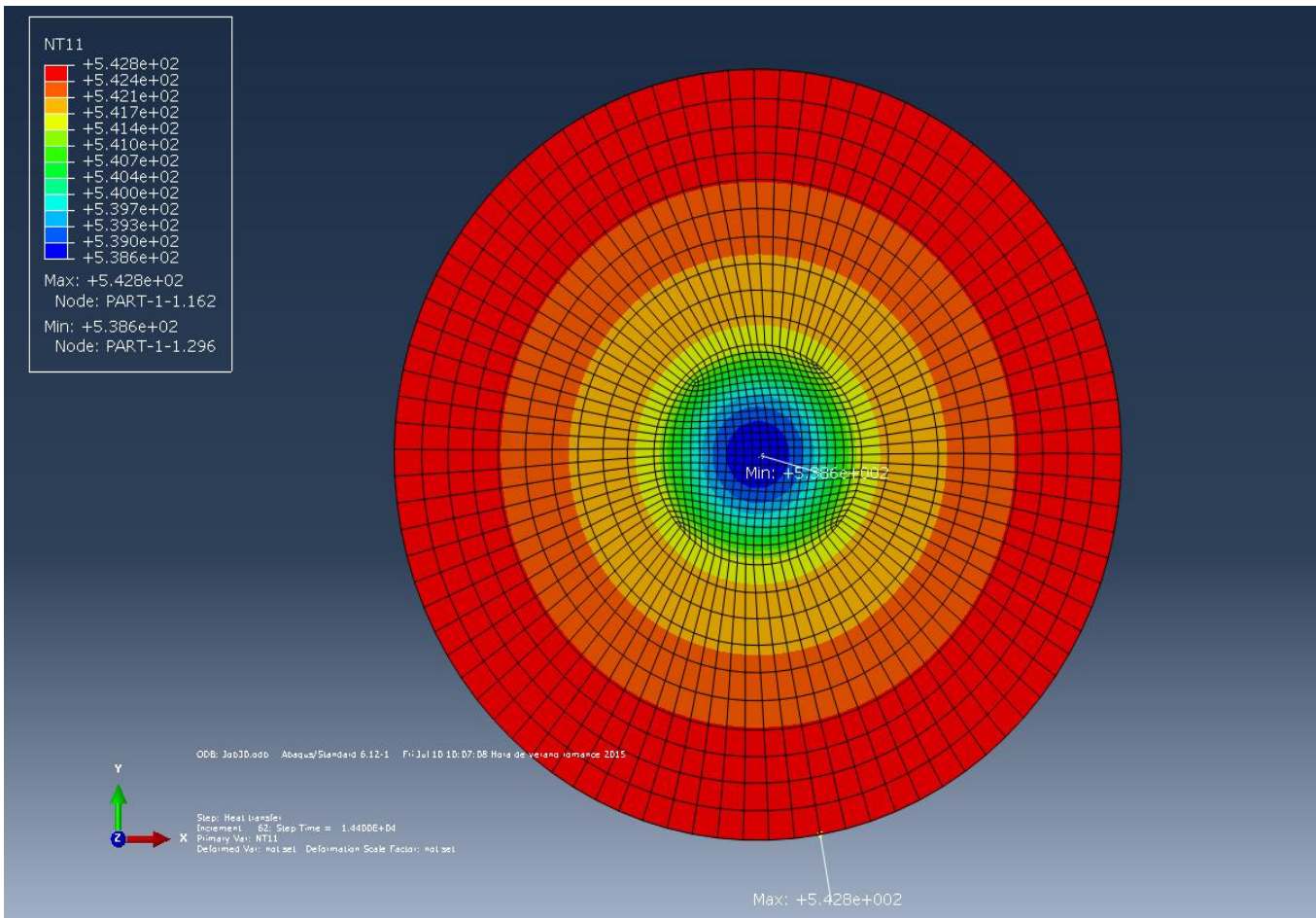


Fig. 3.33. Temperatura nodal con convección al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

En la Fig. 3.33, la temperatura limite interior al finalizar la prueba es 266°C (539K) y la exterior 270°C (543K).

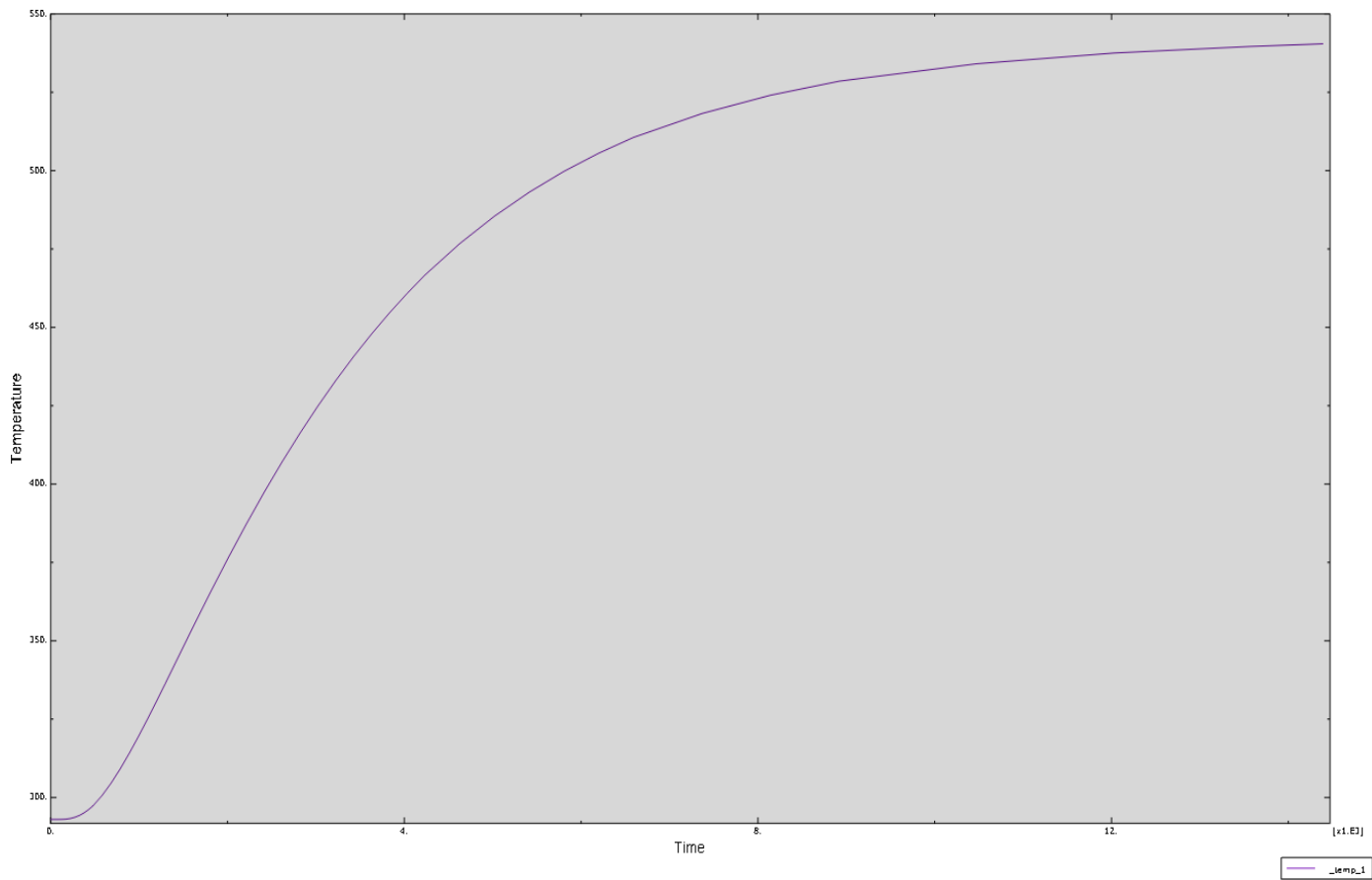


Fig. 3.34. Evolución de la temperatura del sensor con convección durante las 4 horas de la prueba.

El sensor tardaría en alcanzar los 80°C (353K) sobre 1650 segundos (27 minutos y medio), con lo que se vuelve a ver el efecto de la convección forzada (Fig. 3.34).

PRUEBA 6

- Cerámico: Macor (20 mm de espesor)
- Aislante: Zircona (30 mm de espesor)

a) Sin convección forzada (la superficie exterior de la cerámica alcanza los 270°C instantáneamente).

-Duración total de la prueba: 4 horas

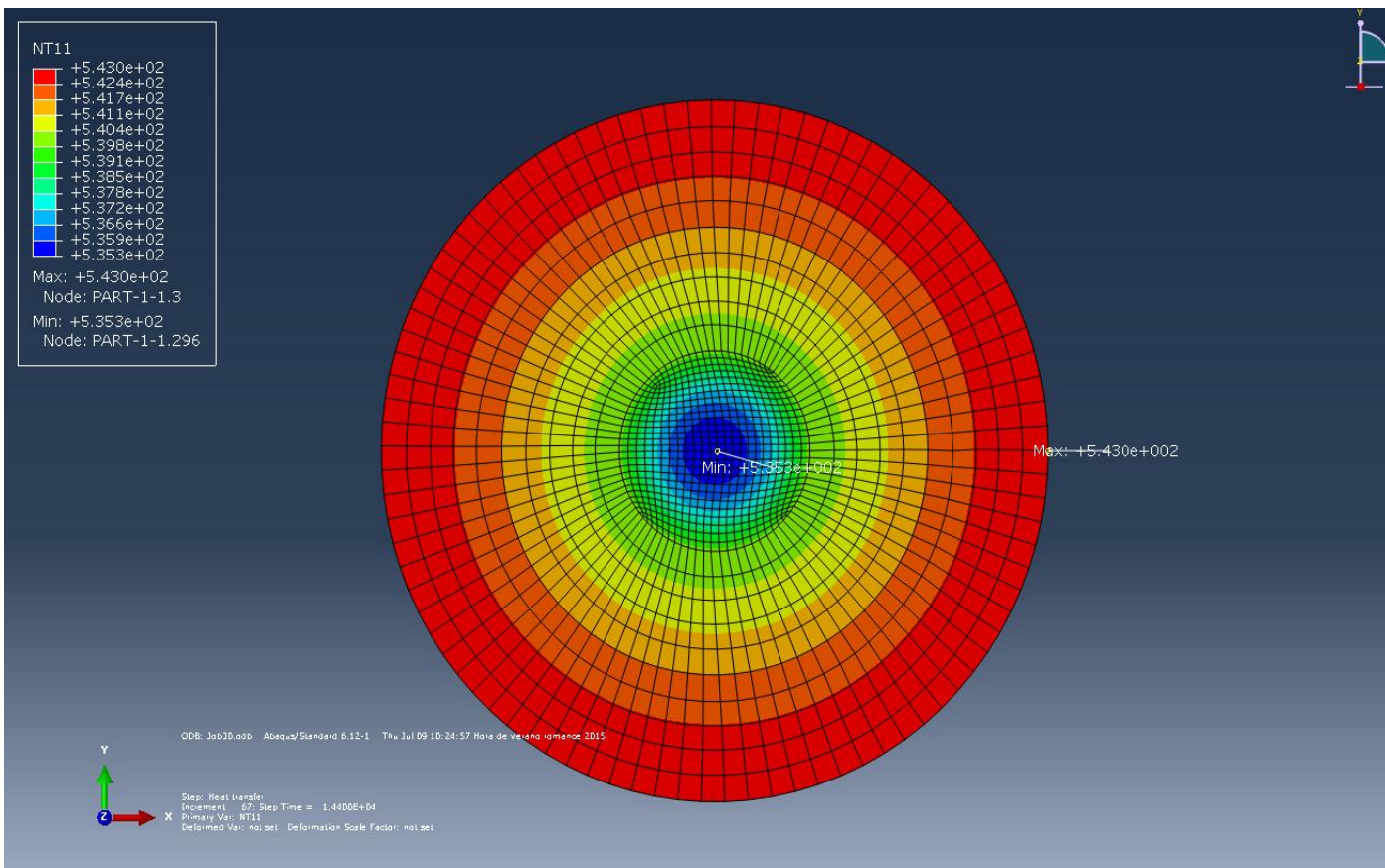


Fig. 3.35. Temperatura en los nodos al cabo de las 4 horas de duración de la prueba.

La temperatura límite en el interior al final de las 4 horas de la prueba sería 262°C (535K) para una temperatura exterior de 270°C (543K), véase la Fig. 3.35.

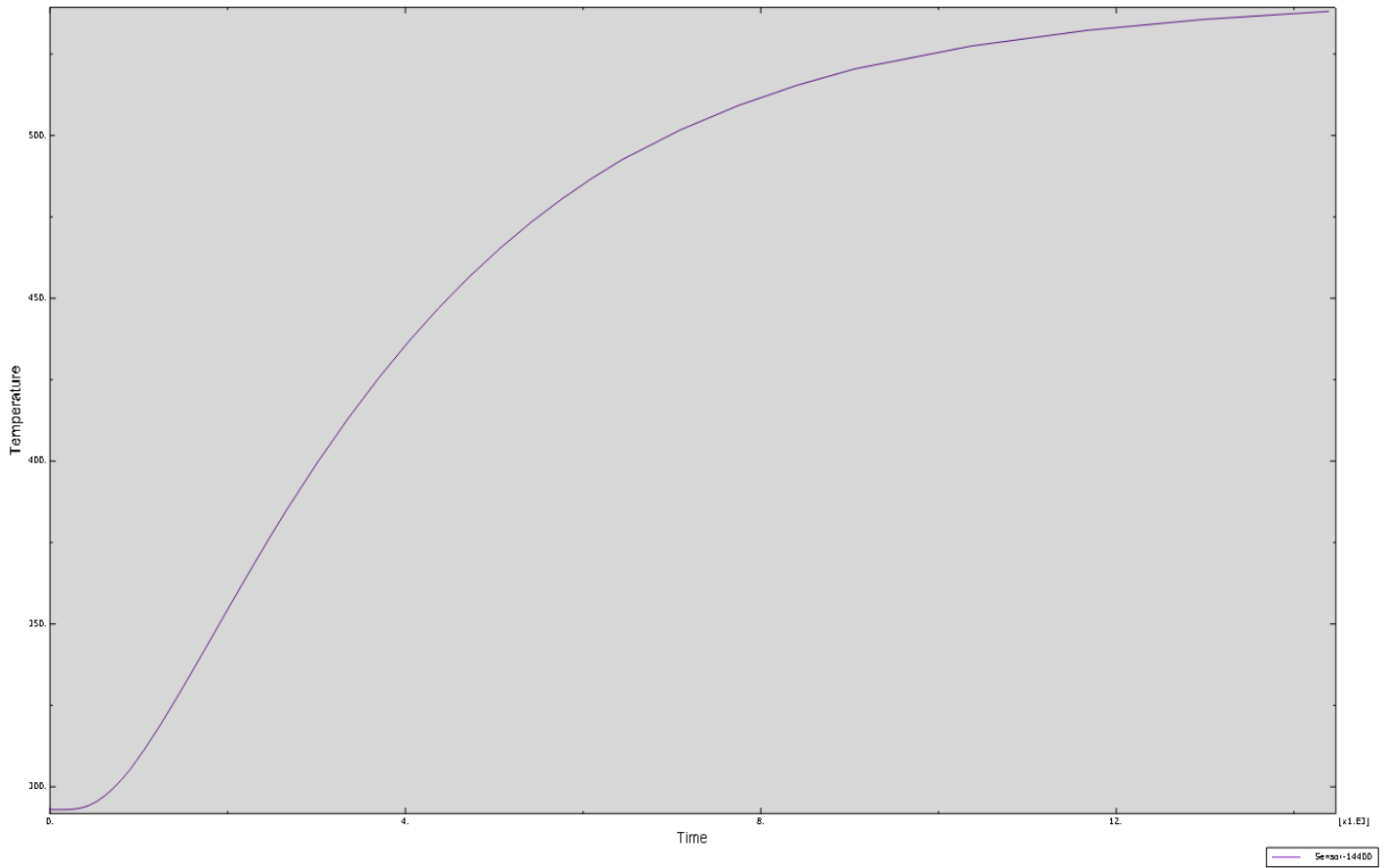


Fig. 3.36. Evolución de la temperatura del sensor durante las 4 horas de la prueba.

En este caso, de acuerdo con la Fig. 3.36, el sensor tarda aproximadamente 2000 segundos (más de 33 minutos) en alcanzar la temperatura límite de 80°C (353K).

b) Con convección forzada (h=100)

- Duración total de la prueba: 4 horas

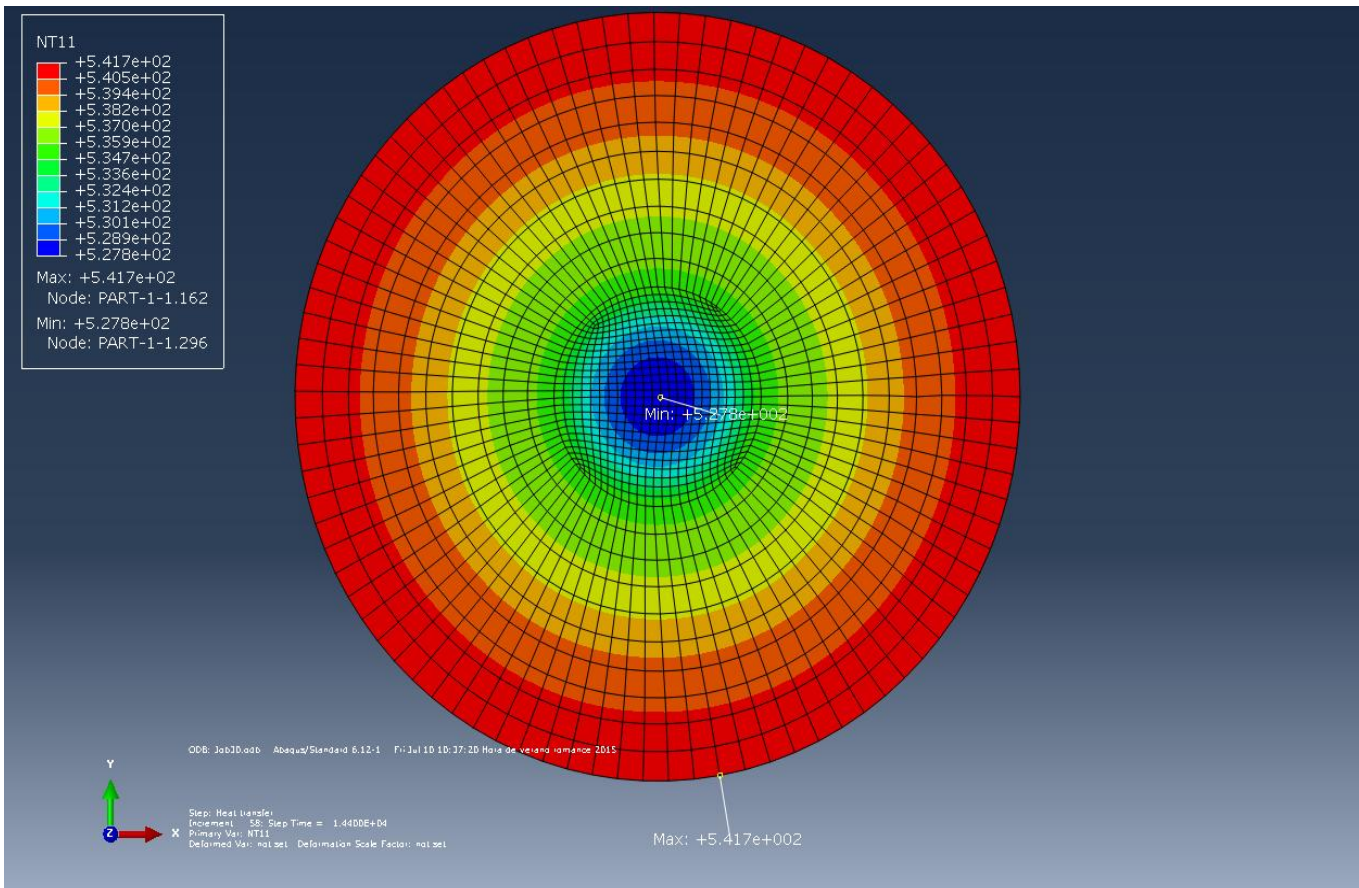


Fig. 3.37. Temperatura nodal con convección forzada al cabo de 4 horas de duración de la prueba.

En la Fig. 3.37 se aprecia que la temperatura interior es 255°C (528K) para una temperatura exterior de 269°C (542K) al cabo de las 4 horas.

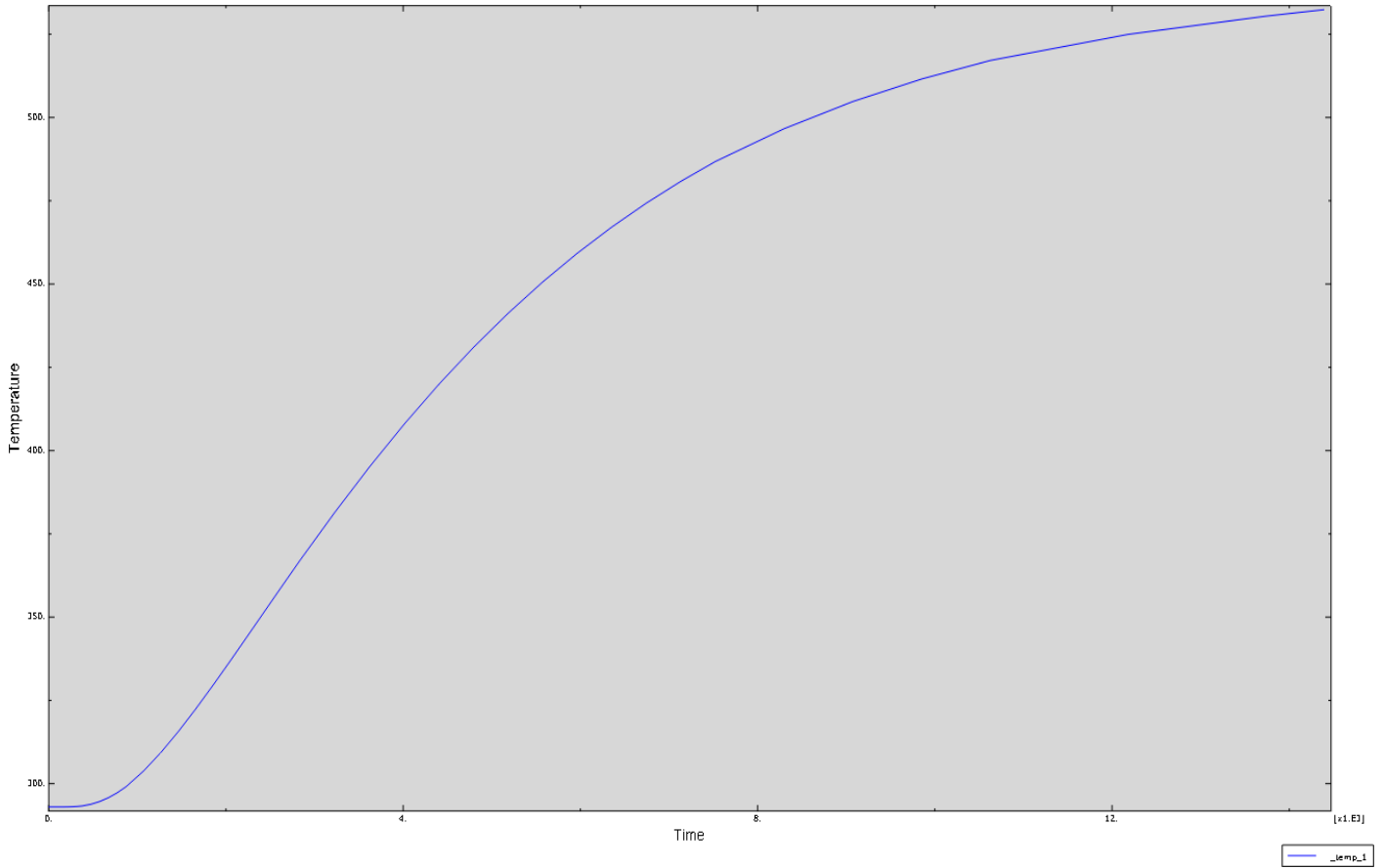


Fig. 3.38. Evolución de la temperatura del sensor con convección durante las 4 horas de la prueba.

De acuerdo con la Fig. 3.38, el sensor tarda en alcanzar los 80°C (353K) aproximadamente unos 2350 segundos (más de 39 minutos).

Hemos comprobado que el mejor material para comportarse como aislante es la zircona y que, en la condición más realista de convección forzada, puede utilizarse durante un tiempo mayor. Además, como la zircona es un material cerámico, no será necesario cubrirla con otra cerámica (Macor) sino que será preferible utilizar una capa de zircona de mayor espesor, ya que ésta actuará como aislante y, también, como cubierta protectora frente a las salpicaduras de acero.

PRUEBA 7

- Sensor: Polipropileno
- Aislante: Zircona (50 mm de espesor)

Con convección forzada ($h=100$)

- Duración total de la prueba: 8 horas

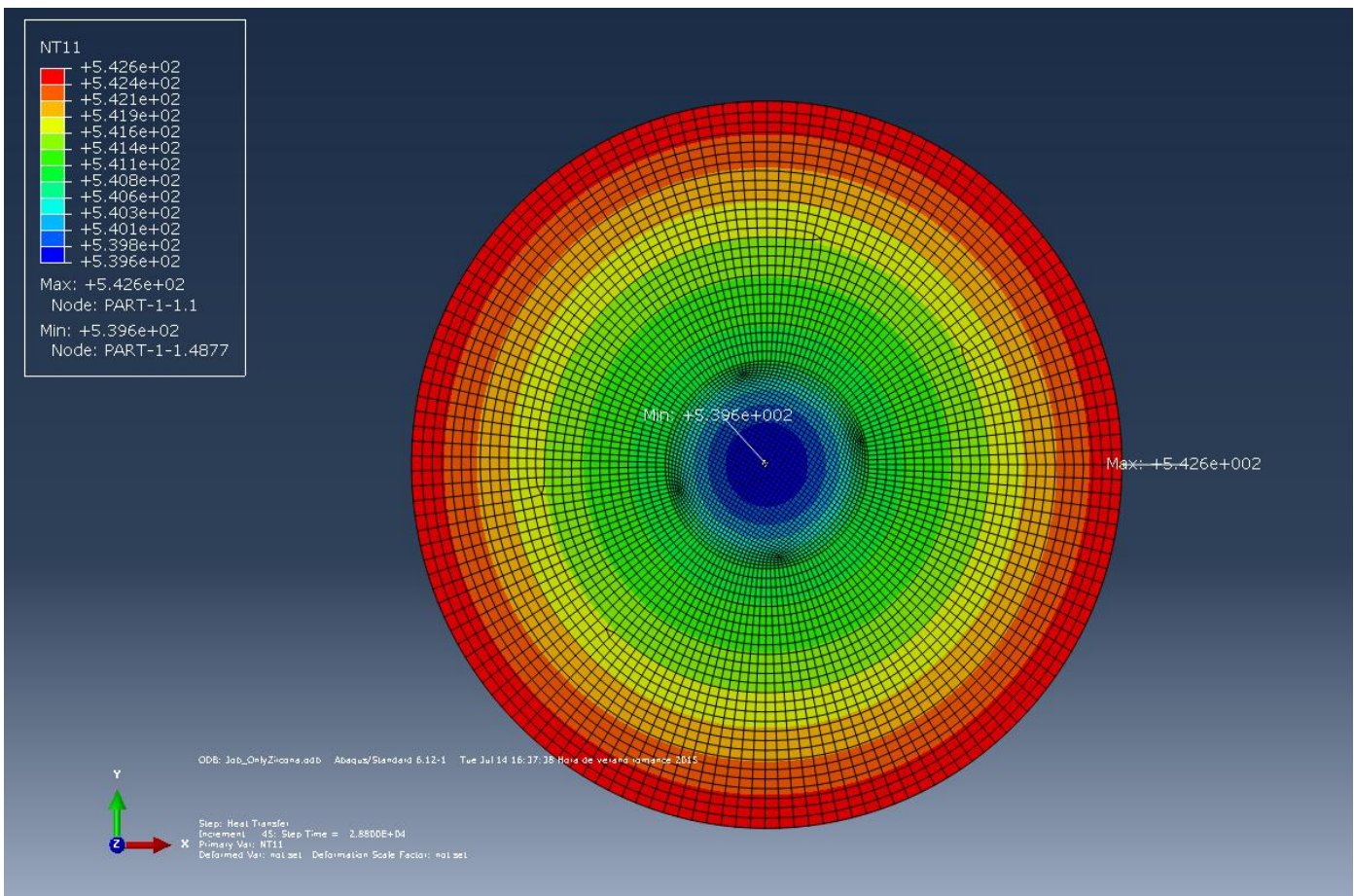


Fig. 3.39. Temperatura nodal con convección forzada al cabo de las 8 horas de prueba.

Como vemos en este caso hemos tenido que prolongar la prueba hasta las 8 horas, ya que la cara exterior de la zircona no llegaba a alcanzar los 270°C (543K) cuando se empleaban tiempos más cortos, como el que se había utilizado en las pruebas anteriores (4 horas).

En la Fig. 3.39 vemos que la temperatura interna al final de las 8 horas de la prueba alcanza 267°C (540K) cuando la temperatura externa es de 270°C (543K).

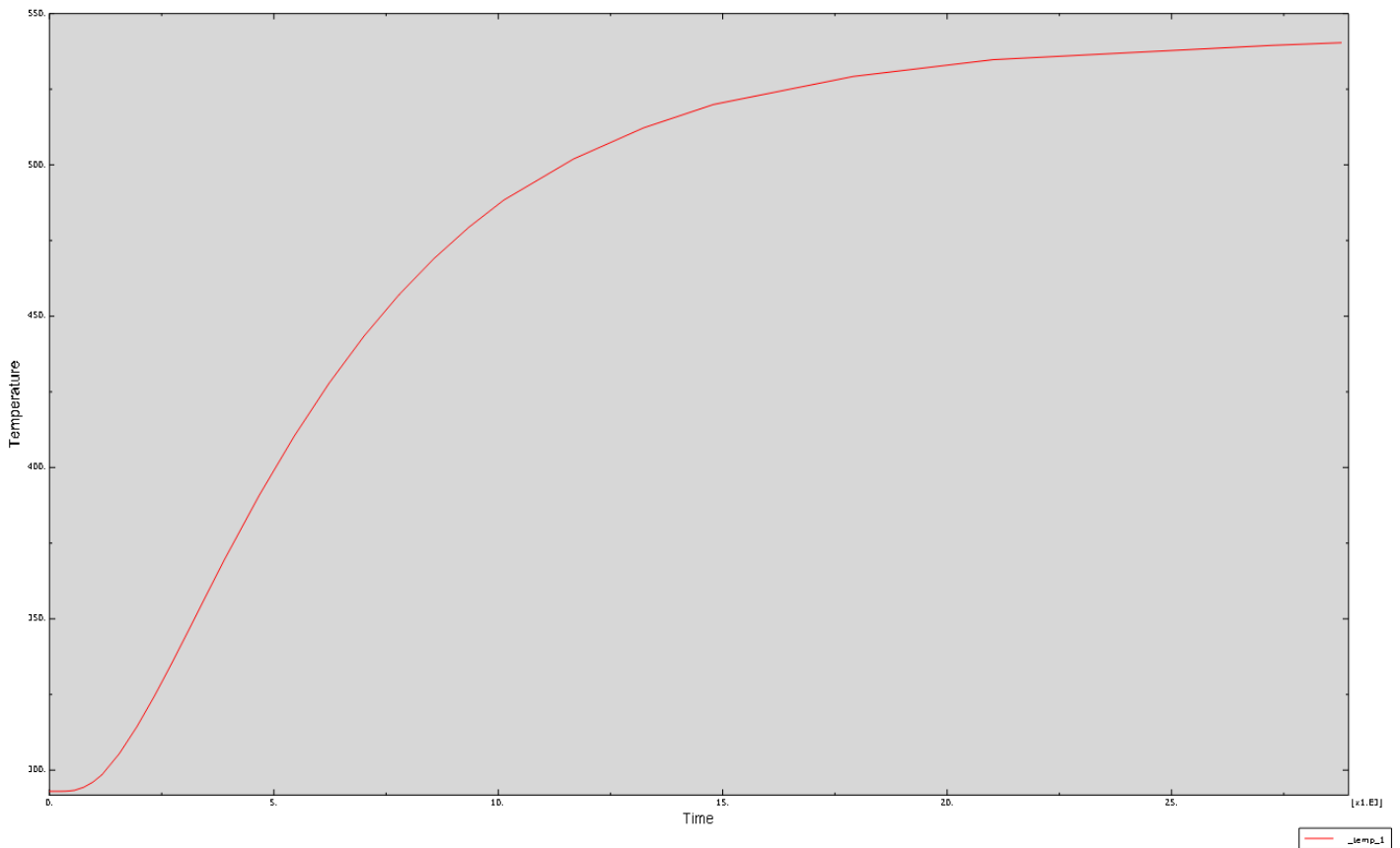


Fig. 3.40. *Evolución de la temperatura del sensor con convección durante las 8 horas de la prueba.*

En la Fig. 3.40 vemos como el sensor alcanzaría los 80°C (543K) en aproximadamente 3300 segundos (55 min.)

PRUEBA 8

- Sensor: Polipropileno
- Aislante: Zircona (100 mm de espesor)

Con convección forzada ($h=100$)

- Duración total de la prueba: 16 horas

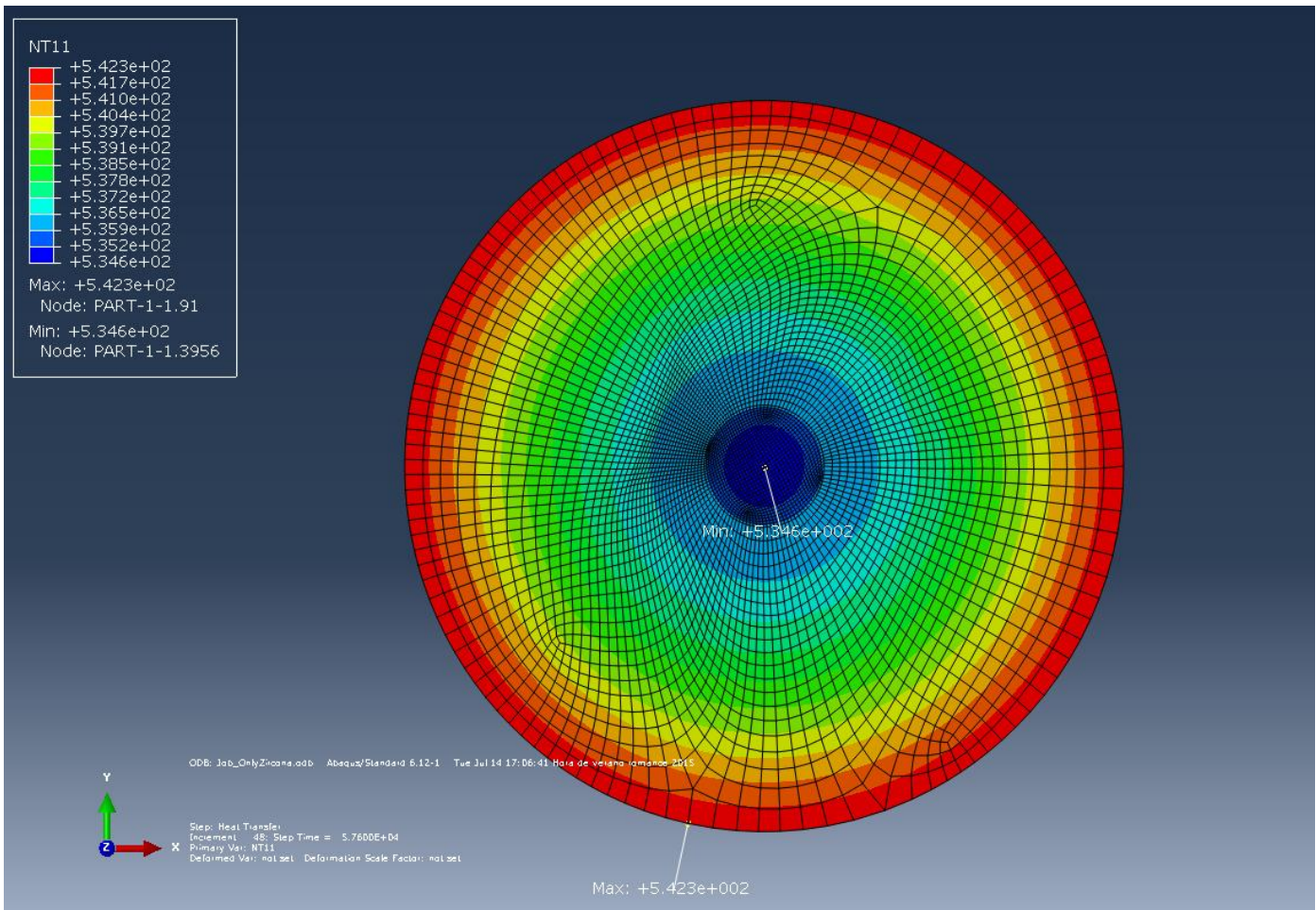


Fig. 3.41. *Temperatura nodal con convección forzada al cabo de 16 horas de prueba.*

En la Fig. 3.41 vemos que para una temperatura externa de unos 269°C (542K), se alcanza una temperatura interna de 262°C (535K) al cabo de un tiempo total de prueba de 16 horas.

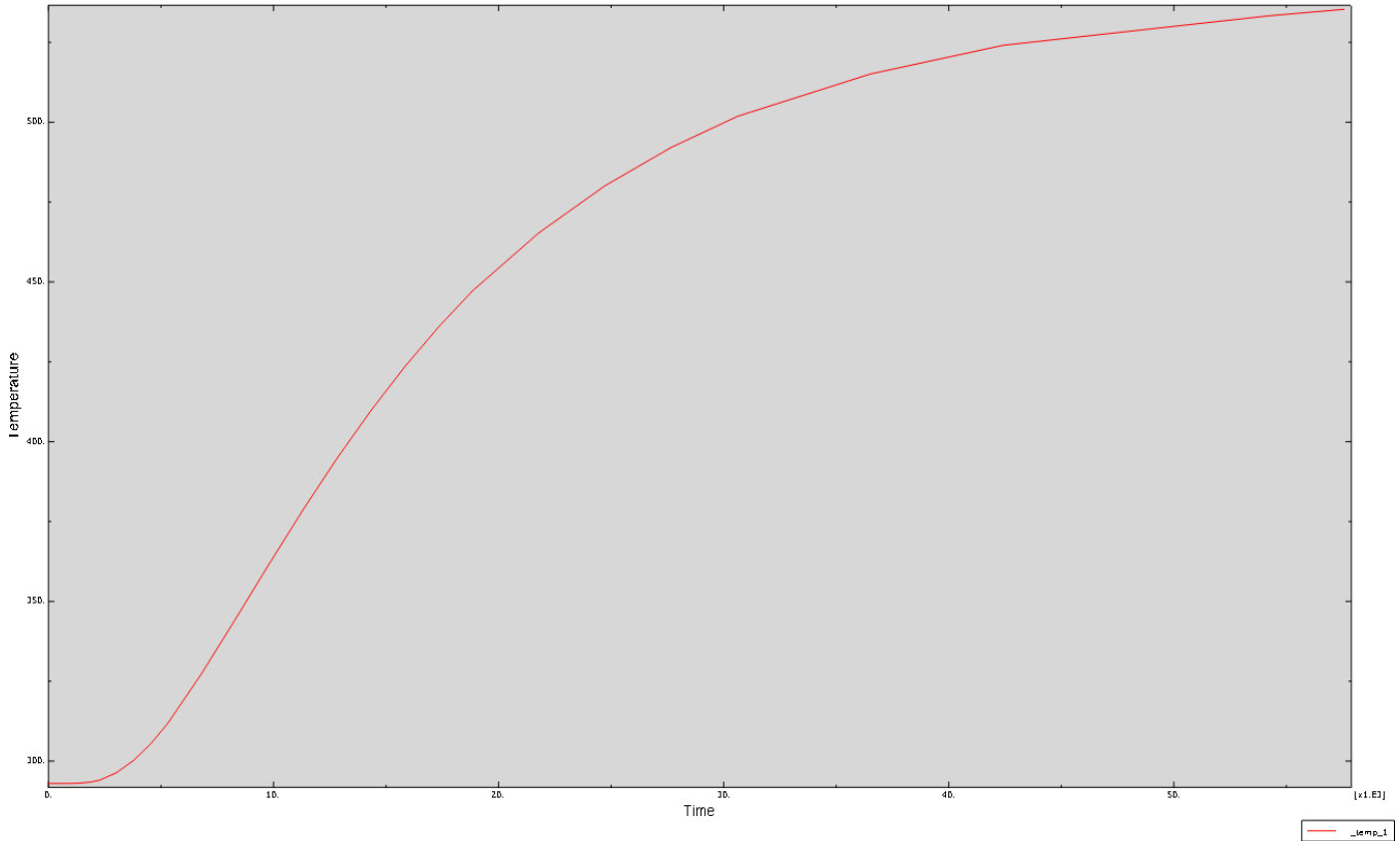


Fig. 3.42. Evolución de la temperatura del sensor con convección durante las 16 horas de prueba.

Con los resultados de la Fig. 3.42, se ha determinado que el sensor alcanza los 80°C (353K) en un tiempo aproximado de 8500 segundos (141 minutos, es decir, 2.36 horas).

La Tabla 3.7 resume y compara los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas. Esta tabla permite ver la influencia del tipo de material utilizado como aislante (poliimida o zircona) y la influencia del espesor de pared utilizado, además de diferenciar los cálculos realizados sin considerar la convección y considerándola.

ESPESOR (mm)	SIN CONVECCIÓN			CON CONVECCIÓN				
	10	20	30	10	20	30	50	100
Prueba 1 - Poliimida	10			14.2				
Prueba 2 - Zircona	15			16.7				
Prueba 3 - Poliimida		15.8			20			
Prueba 4 - Zircona		23.3			29.1			
Prueba 5 - Poliimida			21.7			27.5		
Prueba 6 - Zircona			33.3			39.1		
Prueba 7 - Zircona							55	
Prueba 8 - Zircona								141.7

Tabla 3.7. Tiempo necesario (en min) para que el sensor interno alcance la temperatura límite de 80°C.

El uso de la convección forzada en los cálculos es mucho más realista y se aproxima más a la situación real existente en un horno. En este caso, los tiempos de servicio seguro del sensor en una atmósfera a 270°C en el caso de utilizar un aislante de poliimida van desde 14.2 a 27.5 minutos en función del espesor utilizado, mientras que cuando se utiliza zircona como aislante, estos mismos tiempos se alargan hasta valores que van desde 16.7 a 39.1 minutos, para espesores idénticos a los anteriores.

Como cabría prever, la zircona tiene un comportamiento apreciablemente mejor que la poliimida en esta aplicación concreta (tienen una difusividad térmica menor) y, además, aguanta sin problemas temperaturas mucho mayores (superiores a los 1000°C) y también es más barata, por lo que sin duda constituye la mejor opción. Por otro lado, como la zircona es un material cerámico, no será necesario aplicar la protección con la cerámica Macor, que había propuesto ArcelorMittal. Además, es mejor utilizar solo zircona en vez de combinarla con Macor, como se pone de manifiesto al comparar los resultados de las pruebas 6 y 7 (el espesor total en ambas fue de 50 mm), lo que se justifica en virtud de la menor difusividad térmica de la zircona.

Además en la última prueba realizada, se ha comprobado que si se utiliza una capa aislante de zircona de 100 mm de espesor, el sensor podría realizar medidas durante más de 2 horas

(141.7 minutos) en un ambiente a 270°C, sin alcanzar los 80°C marcados como temperatura límite.

En la Fig.3.43 se puede apreciar el efecto que tienen los distintos espesores del material aislante zircona sometido a convección forzada, en el tiempo que tarda en transmitirse el calor, así se observa como a mayor espesor la gráfica se va tumbando y el tiempo en llegar a la temperatura de 80°C es mayor.

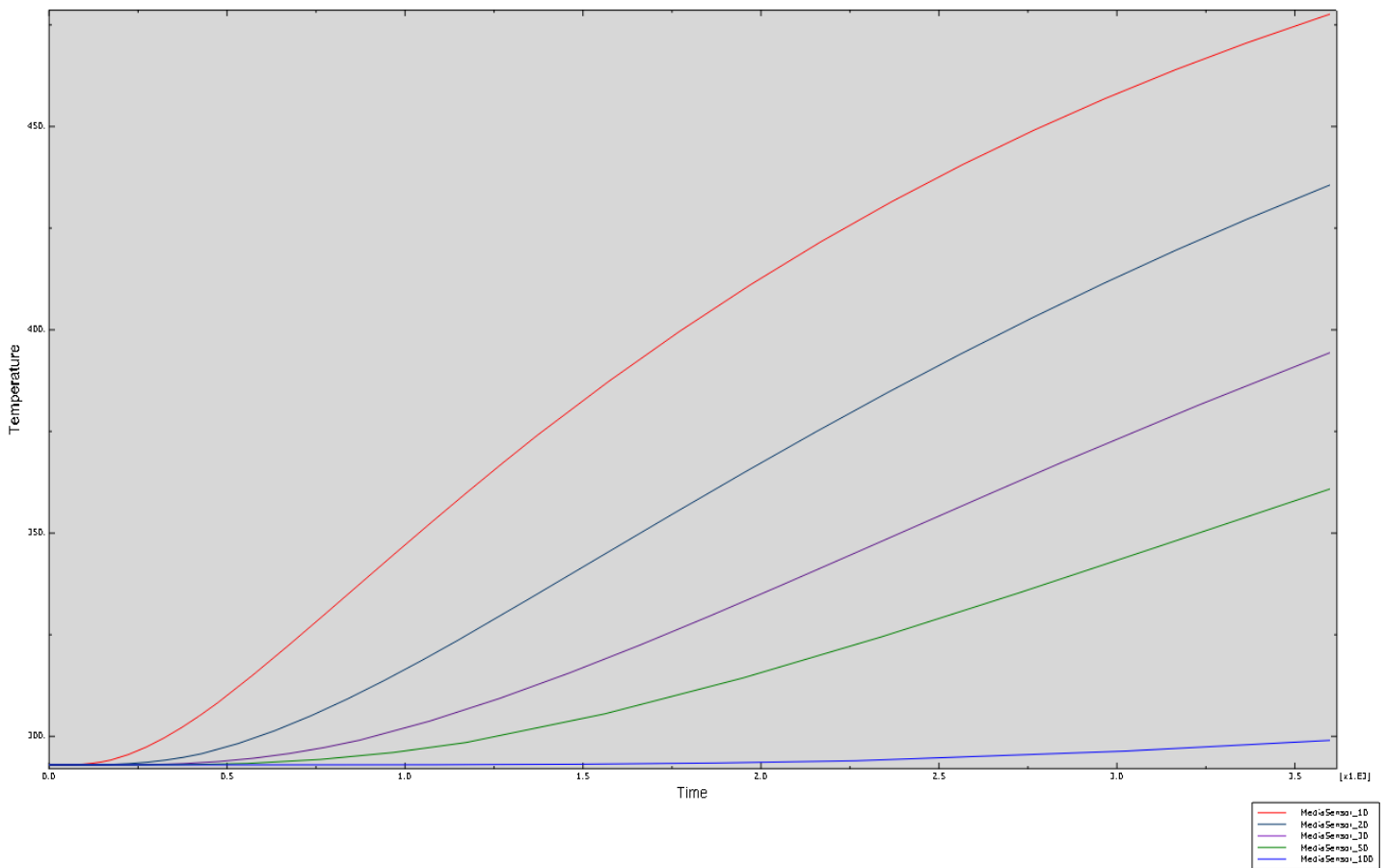


Fig. 3.43. Comparación de la evolución de la temperatura para los distintos espesores de zircona con convección forzada y tras 1 hora de duración de la prueba.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes extraídas durante el transcurso de la investigación se exponen a continuación:

- Se ha demostrado que los materiales idóneos para ser utilizados como aislantes térmicos para la protección de sensores situados en ambientes a alta temperatura son aquellos que tienen la menor difusividad térmica. A este respecto se comportan bien los polímeros y las cerámicas.
- Entre todos los polímeros, solo las poliimididas podrían utilizarse como aislantes en esta aplicación particular, ya que son las únicas que garantizan la estabilidad necesaria a temperaturas del orden de los 270°C. De cualquier manera, para trabajos a alta temperatura, son preferibles los materiales cerámicos y entre ellos destaca de manera especial la zircona (ZrO_2), que además posee una difusividad térmica inferior a la de las poliimididas, es un material más barato y aguanta temperaturas muy superiores.
- Se desea destacar también que la primera opción que se había tenido en cuenta en esta aplicación concreta, la de utilizar un sólido poroso, por ser éstos materiales los que tienen la menor conductividad térmica, no constituye una opción idónea, ya que es la difusividad térmica en vez de la conductividad térmica, la propiedad del material que se busca minimizar. En la aplicación concreta que se ha analizado, el uso de un material poroso no ofrece ninguna ventaja frente al uso del mismo material masivo.
- Se ha puesto de manifiesto también que el MEF es una herramienta numérica muy útil para la resolución de problemas de aislamiento térmico, para la selección de los materiales idóneos y para el cálculo de los espesores de pared necesarios.
- Aplicando la simulación numérica se ha demostrado que la mejor opción para la protección efectiva de los sensores en ambientes caracterizados por la existencia de altas temperaturas (hornos) consiste en rodear completamente el sensor con zircona. Se ha calculado que si se utiliza un recubrimiento de zircona de 50 mm de espesor, el funcionamiento del sensor podría prolongarse hasta casi una hora, siendo éste el tiempo necesario para que la temperatura del sensor alcance 80°C cuando éste se coloca en un ambiente a 270°C. Por otro lado, si se utilizara un recubrimiento de zircona de 100 mm de espesor, el funcionamiento del sensor se prolongaría más de dos horas bajo las mismas condiciones.

- Además, los cálculos realizados en este TFM podrían extenderse a la resolución de problemas tridimensionales y, por otro lado, la gran versatilidad del software ABAQUS utilizado en este trabajos garantiza un uso recurrente del mismo y su adaptación a otros cálculos de aislamiento térmico.

5. PRESUPUESTO

El presupuesto cuantifica económicamente el coste de la realización del proyecto.

1. Horas de ingeniería

En las horas de ingeniería se incluyen tanto el tiempo invertido en la búsqueda de documentación necesaria para el desarrollo del proyecto, así como el tiempo invertido en el aprendizaje de programas, el necesario para la realización de las diferentes pruebas, el necesario para la redacción de la memoria, y el tiempo invertido por los tutores.

Nº Horas	Concepto	Precio Hora €	Precio total €
30	Aprendizaje de software	15	450
160	Investigación y recopilación	15	2400
60	Realización de ensayos	15	900
40	Redacción de la memoria	15	600
10	Apoyo del profesor	80	800
Total			5150€

2. Amortizaciones

En este apartado se ha calculado el coste de amortización del ordenador y del software.

Nº Unidades	Concepto	Precio €	Amortización	Importe
1	Abaqus 6.12	35000	1%	350
1	Ordenador	1000	5%	50
Total				400€

3. Material fungible

En este apartado incluimos el material de oficina, cartuchos de impresora, hojas, etc.

El valor total de este apartado será de 160€.

4. Otros gastos

Se establece una partida de 100€ para gastos generales de electricidad, telefonía, etc.

5. Presupuesto total

Partida	Coste (€)
Horas de ingeniería	5150
Amortizaciones	400
Material fungible	160
Otros gastos	100
Total antes de beneficios e impuestos	5810
Beneficio industrial (6%)	348.6
Total antes de impuestos	6158.6
I.V.A (21%)	1293.3
Coste total del Proyecto €	7451.9
El coste total del proyecto asciende a SIETE MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA Y UNO CON NOVENTA CÉNTIMOS DE EURO.	
Gijón a 23 de julio de 2015.	

6. PLANIFICACIÓN

Tareas	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Recopilación de información						
Familiarización con software						
Realización de pruebas						
Memoria:						
Descripción del problema y objetivos						
Bases de partida						
Descripción del trabajo y resultados						
Conclusiones						
Presupuesto						
Planificación						

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Martín Domingo A . “Apuntes de transmisión de calor”. Universidad Politécnica de Madrid.

[2] Zeferino A. da Fonseca Lopes . “El método de los elementos finitos: una introducción”.

[3] Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L. “The Finite Element Method”. (4th ed.).McGraw-Hill,New York, 1989.

[4] Martínez-Pañeda E. y Betegón C. “Modeling damage and fracture within strain-gradient plasticity”. International Journal of Solids and Structures. Vol . 59, pp. 208-215.

[5] Martínez-Pañeda E. y Niordson C.. “The role of Geometrically Necessary Dislocations in the fracture process of metallic materials”. 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials. Karlsruhe (Alemania). 2015.

[6] Martínez-Pañeda E. y Gallego R. “Numerical analysis of quasi-static fracture in functionally graded materials”. International Journal of Mechanics and Materials in Design. Vol 10, 2014.

[7] Periago Esparza F. “Fundamentos matemáticos del método de los elementos finitos”.

[8] Ashby M.F. “Materials Selection in mechanical Design”, Pergamon Press. 1992.

[9] Belzunce Varela F.J. y Viña Olay J.A. “Ciencia de los materiales”. Universidad de Oviedo.

[10] Materials Selector 1986. Materials Engineering, Penton Publication, 1985 .

