



UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA

Escuela Politécnica Superior. Ferrol

TRABAJO FIN DE GRADO



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Título:

**APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA
ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL
INDUSTRIALES**

Autora:

BEGOÑA LOUREIRO DOPICO

Fecha: **Febrero 2016**



UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA

Escuela Politécnica Superior. Ferrol

TRABAJO FIN DE GRADO



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Título:

**APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA
ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL
INDUSTRIALES**

Autora:

BEGOÑA LOUREIRO DOPICO

Tutores:

**RUTH GUTIÉRREZ FERNÁNDEZ
ALBERTO SOUTO MARTÍNEZ**

Fecha: **Febrero 2016**

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a SGL Carbon La Coruña S.A. la oportunidad de realizar con ellos este trabajo fin de grado y el trato recibido, tanto a nivel personal como profesional, por parte de toda la plantilla. Ha sido una experiencia única que, sin lugar a dudas, me ha hecho crecer como persona y como futura profesional del mundo de la ingeniería.

Gracias a mi tutora de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol, Ruth Gutiérrez Fernández, por haber tutelado y supervisado con detalle todos los progresos y haber marcado las directrices de mi trabajo.

Por último, pero no por ello menos importante, agradecer especialmente a mi tutor en SGL Carbon, Alberto Souto Martínez, la atención y dedicación que ha mostrado durante mi estancia en la empresa, respondiendo amable y pacientemente cualquiera de las múltiples dudas surgidas durante todo este tiempo. Sin su constante apoyo y ayuda este trabajo no habría sido posible.

ÍNDICE

MEMORIA

| | |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1 - Introducción a la empresa | 15 |
| 1.2 - Descripción del proceso de fabricación..... | 16 |
| 1.2.1 - Descripción de los hornos de cocción..... | 20 |
| 1.3 – Objetivos del proyecto..... | 23 |
| 1.4 – Alcance del proyecto..... | 24 |
| 2 – DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN | 25 |
| 2.1 – Geometría del faldón | 26 |
| 2.2 - Descripción de las Condiciones de Funcionamiento | 27 |
| 3 – ANÁLISIS DE MATERIALES..... | 32 |
| 3.1 - Materiales actuales | 33 |
| 3.1.1 - Acero S-235-JR..... | 33 |
| 3.1.2 - Acero AISI 304..... | 33 |
| 3.2 - Materiales propuestos..... | 34 |
| 3.2.1 - Acero AISI 309..... | 34 |
| 3.2.2 - Acero AISI 316..... | 34 |
| 3.2.3 - Acero AISI 310..... | 35 |
| 3.2.4 - Silicona Soudal® HTN | 35 |
| 4 – CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS | 36 |
| 4.1 - Introducción al Método de los Elementos Finitos | 37 |
| 4.2 - Software utilizado | 38 |
| 4.3 – Tipos de Análisis: Lineal y No Lineal..... | 39 |
| 4.4 – Modelización y Análisis por Elementos Finitos | 43 |
| 4.4.1 – Diseño Inicial. Modelización y cálculo del faldón del horno completo | 43 |
| 4.4.2 – Diseño Inicial. Modelización y cálculo de una subestructura de faldón. | 53 |
| 4.4.3 - Introducción de mejoras de diseño. | 59 |
| 4.4.3.1 – Diseño 1: Introducción de elemento dilatador..... | 60 |
| 4.4.3.2 – Diseño 2: Disminución de la altura del dilatador..... | 67 |
| 4.4.3.4 – Diseño 3: Mejora de silicona en el Diseño 1..... | 73 |
| 4.4.3.4 – Diseño 4: Mejora de silicona en el Diseño 2..... | 80 |
| 4.4.3.5 – Comparación de resultados de las propuestas de diseño | 85 |
| 4.4.4 – Introducción de mejoras de Material | 87 |
| 4.4.4.1 –Material 1: Sustitución de AISI 304 por AISI 309 | 88 |
| 4.4.4.2 – Material 2: Sustitución de AISI 304 por AISI 316 | 89 |
| 4.4.4.3 – Material 3: Sustitución de AISI 304 por AISI 310 | 90 |
| 4.4.4.4 – Comparación de Resultados | 91 |
| 4.4.5 – Conclusiones | 95 |
| 5 – INSTALACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO 3 EN SGL CARBON | 97 |

ÍNDICE

PRESUPUESTO

| | |
|---|------------|
| 6 - PRESUPUESTO..... | 101 |
| 6.1 - Coste de instalación de las propuestas | 102 |
| 6.2 - Plazo de recuperación de la inversión | 104 |

PLANOS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

| | |
|--|----|
| Figura 1. 1: Esquema de un horno de arco eléctrico..... | 16 |
| Figura 1. 2: Fases del proceso de producción de los electrodos de grafito | 17 |
| Figura 1.3: Patio de hornos de solera móvil para la cocción de electrodos de grafito..... | 18 |
| Figura 1.4: Tipos de hornos de grafitación. Hornos Acherson (izq.) vs. Hornos LWG (dcha.) | 19 |
| Figura 1. 5: Sección de un <i>nipple</i> y los correspondientes extremos de los electrodos..... | 19 |
| Figura 1. 6: Horno de solera móvil para la cocción de electrodos de grafito | 20 |
| Figura 1. 7: Planta del horno y distribución de pilares..... | 20 |
| Figura 1. 8: Perfil IPN y UPN. | 21 |
| Figura 1. 9: Representación de pilares simples y dobles en los planos originales del horno | 21 |

CAPÍTULO 2 – DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1: Planos originales del perfil del faldón y planta del zambullidor | 26 |
| Figura 2. 2: Instalación de termopares en la cara interior del faldón (izq) y sonda utilizada en la medición de la temperatura del agua de la junta (dcha.)..... | 28 |
| Figura 2. 3: Detalle y representación de las tres direcciones X, Y, Z del faldón..... | 29 |
| Figura 2. 4: Variación de la temperatura en la dirección transversal del faldón (Eje X) | 29 |
| Figura 2. 5: Variación de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Z). [Parte superior - Termopar Inferior (T1)] | 30 |
| Figura 2. 6: Variación de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Z). [Termopar Inferior (T1) – Junta de Agua]..... | 30 |
| Figura 2.7: Temperatura de la zona del faldón en contacto con la junta de agua..... | 31 |
| Figura 2. 8: Variación total de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Y). | 31 |

CAPÍTULO 3 – ANÁLISIS DE MATERIALES

| | |
|--|----|
| Tabla 3. 1: Propiedades mecánicas del acero al carbono S-235-JR..... | 33 |
| Tabla 3. 2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304..... | 33 |
| Tabla 3. 3: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 309..... | 34 |
| Tabla 3. 4: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316..... | 34 |
| Tabla 3. 5: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 310..... | 35 |
| Tabla 3. 6: Propiedades de la silicona | 35 |

CAPÍTULO 4 – CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS

| | |
|---|----|
| Tabla 4. 1: Parámetros de convergencia para el análisis no lineal de la subestructura. | 57 |
| Tabla 4. 2: Límites de fluencia para los materiales de la subestructura de faldón..... | 55 |
| Tabla 4. 3: Parámetros de convergencia de la malla para el modelo del Diseño 1. | 62 |
| Tabla 4. 4: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 1. | 62 |
| Tabla 4. 5: Parámetros de convergencia para el Diseño 2. | 68 |
| Tabla 4. 6: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 2. | 68 |
| Tabla 4. 7: Parámetros de convergencia para el análisis del Diseño 3. | 76 |
| Tabla 4. 8: Límite de fluencia para los materiales del Diseño 3..... | 76 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Tabla 4. 9: Parámetros de convergencia para el Diseño 4. | 81 |
| Tabla 4. 10: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 4 | 81 |
| Tabla 4. 11: Tensiones de fluencia y rotura de los materiales propuestos..... | 87 |
| | |
| Figura 4. 1: Ejemplo de discretización de un sólido. | 37 |
| Figura 4. 2: Curva de esfuerzo-deformación de un material con modelo lineal, bilineal y la de un material real. | 41 |
| Figura 4. 3: Modelización de la geometría del faldón completo. | 43 |
| Figura 4. 4: Modelización final del faldón completo..... | 44 |
| Figura 4. 5: Modelo completo del faldón..... | 44 |
| Figura 4.6: Ventanas de Introducción de Tipo y Tamaño de Elementos Finitos..... | 45 |
| Figura 4.7: Visualización de la unificación de nodos en el faldón completo..... | 46 |
| Figura 4. 8: Introducción de las propiedades mecánicas del material..... | 47 |
| Figura 4. 9: Ventana de introducción del tipo de material (lineal o no lineal). | 47 |
| Figura 4. 10: Asignación del material y espesor a la geometría correspondiente. | 47 |
| Figura 4. 11: Asignación del material, sección y orientación de la propiedad de los elementos línea/curva. | 48 |
| Figura 4. 12: Creación del tipo de sección de propiedades para elementos línea. | 48 |
| Figura 4. 13: Representación de las distintas propiedades asignadas al modelo del faldón completo. | 49 |
| Figura 4. 14: Campo de tensiones de Von Mises [MPa] obtenidas tras el análisis lineal del faldón completo. | 51 |
| Figura 4. 15: Detalle del campo de tensiones de Von Mises [MPa] del faldón completo. | 51 |
| Figura 4. 16: Estructura deformada y desplazamientos [mm] obtenidos tras el análisis lineal del faldón completo. | 52 |
| Figura 4. 17: Subestructura de faldón..... | 53 |
| Figura 4. 18: Creación de la geometría de la subestructura de faldón. | 53 |
| Figura 4. 19: Mallado de la geometría de la subestructura del faldón. | 54 |
| Figura 4. 20: Restricciones de movimiento en la subestructura del faldón..... | 54 |
| Figura 4. 21: Tensiones de Von Mises [MPa] obtenidas en el análisis lineal de la subestructura de faldón | 55 |
| Figura 4. 22: Introducción de parámetros de análisis no lineales para la subestructura de faldón. | 56 |
| Figura 4. 23: Introducción de propiedades del material no lineal para la subestructura de faldón. | 56 |
| Figura 4. 24: Campo de tensiones de Von Mises [MPa] en la subestructura de faldón. | 57 |
| Figura 4. 25: Deformada y campo de desplazamientos resultante en la subestructura de faldón [mm]..... | 58 |
| Figura 4.26: Deformada y campo de desplazamientos [mm] en la dirección Y de la subestructura del faldón | 58 |
| Figura 4. 27: Dilatador..... | 60 |
| Figura 4. 28: Diseño 1 instalado sobre subestructura de faldón | 60 |
| Figura 4. 29: Creación de la geometría del Diseño 1..... | 61 |
| Figura 4. 30: Mallado de la geometría del Diseño 1. | 61 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 4. 31: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada para el Diseño1. | 62 |
| Figura 4. 32: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 35% de la carga térmica aplicada para el Diseño 1. | 63 |
| Figura 4. 33: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada para el Diseño 1. | 64 |
| Figura 4. 34: Comparación de las zonas de fluencia en el modelo frente a las zonas de rotura reales del dilatador para el Diseño 1..... | 65 |
| Figura 4. 35: Evolución de la tensión [MPa] de Von Mises en el dilatador del Diseño 1. | 65 |
| Figura 4. 36: Desplazamientos longitudinales [mm] en el modelo del Diseño 1 (Eje Y). | 66 |
| Figura 4. 37: Desplazamientos sufridos por uno de los nodos en fluencia frente a la aplicación de carga en el Diseño1. | 66 |
| Figura 4. 38: Diseño 2 instalados sobre subestructura de faldón..... | 67 |
| Figura 4. 39: Creación de la geometría del Diseño 2..... | 67 |
| Figura 4. 40: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2..... | 69 |
| Figura 4. 41: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2..... | 69 |
| Figura 4. 42: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2..... | 70 |
| Figura 4. 43: Evolución de la tensión [MPa] en función de la temperatura para los nodos que entran en fluencia. | 71 |
| Figura 4. 44: Campo de desplazamientos [mm] en el Diseño 2..... | 71 |
| Figura 4. 45: Desplazamientos [mm] en la dirección longitudinal del dilatador del Diseño 2 (Eje Y)..... | 72 |
| Figura 4. 46: Creación de la geometría del Diseño 3..... | 73 |
| Figura 4. 47: Malla del dilatador del modelo del Diseño 3 y contorno de la geometría sobre la que se elimina la soldadura..... | 73 |
| Figura 4. 48: Malla del faldón del modelo del Diseño 3..... | 74 |
| Figura 4. 49: Unificación de nodos interiores del modelo del Diseño 3 y representación de bordes libres..... | 74 |
| Figura 4. 50: Pletina colocada bajo el dilatador del Diseño 3. | 75 |
| Figura 4. 51: Propiedades del modelo del Diseño 3..... | 75 |
| Figura 4. 52: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el faldón para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3. | 77 |
| Figura 4. 53: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3. | 77 |
| Figura 4. 54: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3. | 78 |
| Figura 4. 55: Detalle de los elementos de las zonas consideradas críticas en el Diseño 3. | 78 |
| Figura 4. 56: Evolución de la tensión de Von Mises [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 3..... | 79 |
| Figura 4. 57: Evolución de la tensión de Von Mises [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 3..... | 79 |
| Figura 4. 58: Creación de la geometría del Diseño 4..... | 80 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 4. 59: Mallado de la geometría del Diseño 4. | 80 |
| Figura 4. 60: Unificación de nodos en el Diseño 4. | 81 |
| Figura 4. 61: Tensiones resultantes de Von Mises [MPa] en el Diseño 4 | 82 |
| Figura 4. 62: Tensión de Von Mises [MPa] para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 4..... | 82 |
| Figura 4. 63: Tensión de Von Mises [MPa] para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 4..... | 83 |
| Figura 4. 64: Evolución de tensiones [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 4. | 84 |
| Figura 4. 65: Desplazamientos longitudinales [mm] en el Diseño 4 | 84 |
| Figura 4. 66: Comparación de la evolución de las tensiones [MPa] en los diferentes diseños frente a la temperatura..... | 85 |
| Figura 4. 67: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada diseño..... | 85 |
| Figura 4. 68: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35% (a), 50% (b), 75% (c) y 100% (d), respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 309. | 88 |
| Figura 4. 69: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35%, 50%, 75% y 100%, respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 316..... | 89 |
| Figura 4. 70: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35%, 50%, 75% y 100%, respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 310..... | 90 |
| Figura 4. 71: Comparación de tensiones de Von Mises [MPa] para el 35% de carga térmica aplicada en los distintos materiales. | 91 |
| Figura 4. 72: Comparación de tensiones de Von Mises [MPa] para el 100% de carga térmica aplicada en los distintos materiales. | 92 |
| Figura 4. 73: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada material. | 93 |
| Figura 4. 74: Gráfico comparativo de tensiones de Von Mises [MPa] y llegada al límite de fluencia para cada material..... | 93 |
| Figura 4. 75: Comparación de tensión frente a temperatura para cada una de los diseños y materiales propuestos en el proyecto. | 95 |
| Figura 4. 76: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada propuesta | 95 |

CAPÍTULO 5 – INSTALACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO 3 EN SGL CARBON S.A

| | |
|---|-----|
| Figura 5. 1: Perfil estructural que actúa como dilatador | 98 |
| Figura 5. 2: Pletina soldada a la chapa del horno | 98 |
| Figura 5. 3: Colocación de lana de roca en el interior del dilatador | 99 |
| Figura 5. 4: Instalación de la tapa del dilatador | 99 |
| Figura 5. 5: Sellado de las juntas entre la pletina y el tramo de faldón con silicona | 100 |

CAPÍTULO 6 - PRESUPUESTO

| | |
|--|-----|
| Tabla 6. 1: Tabla de presupuestos para la instalación de la propuesta de diseño 3 en los hornos de cocción | 102 |
| Tabla 6. 2: Tabla de presupuestos para la instalación de la propuesta de cambio de material 3 en los hornos..... | 103 |
| Tabla 6. 3: Costes de mantenimiento y plazo de recuperación de la inversión para la propuesta de diseño 3..... | 105 |
| Tabla 6. 4: Costes de mantenimiento y período de retorno de la inversión para la propuesta de material 3 | 106 |
| Tabla 6. 5: Comparación de los períodos de retorno de las inversiones para cada propuesta | 107 |

1 - INTRODUCCIÓN

1.1 - Introducción a la empresa

Los electrodos de grafito artificial son un estándar en la producción de acero en hornos eléctricos. El grafito artificial posee una alta conductividad eléctrica y elevada resistencia al choque térmico que lo hacen imprescindible para este uso. Entre los principales fabricantes se encuentra **SGL Group**, cuyo mercado abarca, no sólo la producción de electrodos de grafito, sino también fibras de carbono y materiales compuestos.

SGL Carbon AG nace en 1992 de la fusión entre Great Lakes Carbon y SIGRI/Germany, empresas inmersas hasta la época en la producción de carbón y derivados. La sede central se encuentra en Wiesbaden (Alemania) y la compañía está gestionada de la siguiente forma:

- **Board of Management/Consejo de Administración:** Proporciona la dirección estratégica general.
- **Business Units/Unidades de Negocio:** Son las responsables del desarrollo y ejecución de la estrategia y planes operativos del grupo.
- **Legal Entities/Personas Jurídicas:** Proporcionan las infraestructuras y servicios requeridos por las Unidades de Negocio (Business Units).
- **Corporate Functions/Funciones Corporativas:** Proporcionan el apoyo necesario al Consejo de Administración y los servicios requeridos por las Unidades de Negocio y las Personas Jurídicas.

En general, la dirección de SGL Group se basa en el liderazgo y gestión por objetivos principales, donde además es de vital importancia la implantación de la **metodología Six Sigma**, que permite satisfacer de manera rápida y eficiente la demanda de los clientes gracias a que hace posible la realización de mejoras en los procesos, consiguiendo reducir o eliminar los defectos o fallos existentes en cada uno de ellos.

Esta metodología Six Sigma se caracteriza por 5 etapas concretas, identificadas por sus siglas en inglés (DMAIC) como:

- **Define/Definir:** Consiste en concretar los posibles problemas o defectos del proceso y evaluarlos, centrándose siempre en las necesidades y exigencias del cliente.
- **Measure/Medir:** El objetivo principal de esta etapa es entender el funcionamiento del problema o defecto.
- **Analyze/Analizar:** Se trata de determinar las causas reales de los problemas detectados.
- **Improve/Mejorar:** Consiste en mejorar el proceso según lo analizado en las etapas anteriores
- **Control/Controlar:** Implica realizar un seguimiento o control del proceso una vez aplicadas las medidas correctoras.

Dentro de este grupo se encuentra **SGL Carbon La Coruña**, empresa para la cual se realiza este proyecto, dedicada exclusivamente a la fabricación de los electrodos de grafito que, junto con los procedentes de otras plantas situadas en Alemania, Austria, Polonia, Malasia y EE.UU, serán utilizados en acerías de todo el mundo.

1.2 - Descripción del proceso de fabricación

Como se ha mencionado con anterioridad, SGL Carbon La Coruña se dedica exclusivamente a la fabricación de electrodos de grafito que se utilizarán en los **hornos de arco eléctrico** de las acerías para la fusión de metales.

Estos hornos están compuestos principalmente de cuatro partes, representadas en la figura 1.1:

- **Armazón:** Formado por las paredes del horno (refractarias) y la cimentación.
- **Hogar:** Sería el lecho refractario que bordea la cimentación
- **Bóveda o cubierta:** Es de aspecto esférico o de sección cónica y cubre el horno con material refractario. Esta bóveda se construye generalmente con hormigón refractario para poder soportar los grandes choques térmicos
- **Electrodos:** Un horno típico de corriente alterna tiene tres electrodos de grafito, de sección circular y con acoplamientos roscados, de tal forma que a medida que se desgastan se pueden sustituir.

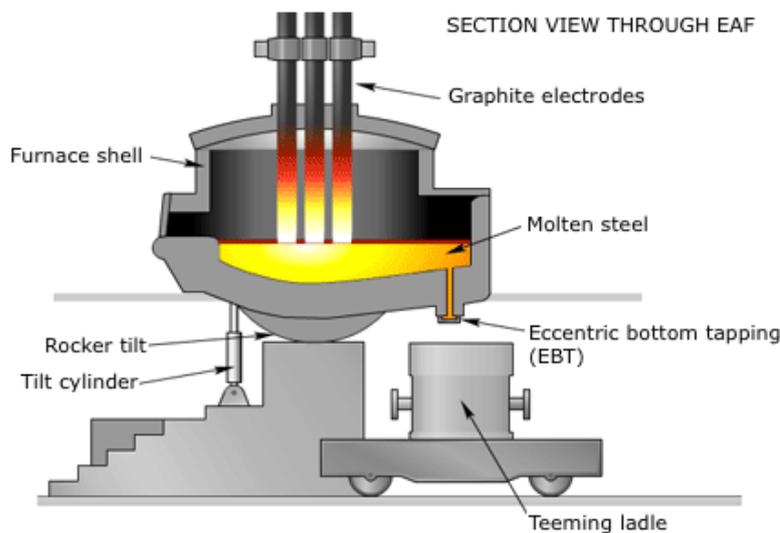


Figura 1. 1: Esquema de un horno de arco eléctrico

Para la fusión del metal, principal objetivo de estos hornos, se genera un arco eléctrico entre el material cargado y el electrodo de tal forma que la carga se calienta, tanto por la corriente que pasa a través de la carga como por la energía radiante generada por el arco.

El hecho de que se utilice el grafito como material para los electrodos se debe a sus propiedades como semiconductor. A temperatura ambiente, su conductividad es moderada, pero ésta aumenta a medida que el grafito va aumentando su temperatura.

Además del aumento de la conductividad con la temperatura, también se incrementa considerablemente la resistencia mecánica, por lo que es el material más adecuado para resistir los esfuerzos a los que se somete el electrodo al introducirlo en el horno. Otra de las ventajas de este material es su elevado punto de fusión, idóneo para su aplicación en altos hornos.

INTRODUCCIÓN.

Descripción del proceso de fabricación.

La principal materia prima para la producción de electrodos es el **coque de petróleo**, un residuo carbonoso obtenido en el proceso de coquización.

La mayor parte del coque producido es el denominado **coque esponja** debido a su porosidad característica. Éste se destina mayormente a la producción de ánodos para la fabricación de aluminio primario, combustiones en plantas de cemento y electrodos de pequeñas dimensiones.

Sin embargo, para la producción de electrodos para hornos de gran tamaño, como los utilizados en las acerías para la fusión de metales, se requiere un coque especial denominado **“coque aguja”** que permite obtener un electrodo con menor resistividad eléctrica (resistencia eléctrica específica del material), un menor coeficiente de expansión térmica y, además, mejora la homogeneidad del producto, ya que durante la extrusión del electrodo crudo, permite que todo el material quede alineado en la misma dirección, longitudinal al electrodo.

La otra materia prima es la **brea** de alquitrán o de hulla, que se obtiene en plantas carboquímicas que procesan el alquitrán extraído de los gases de los hornos de coquización de hulla utilizados en la siderurgia.

La fabricación de un electrodo de grafito conlleva una serie de fases, ver figura 1.2, desde la llegada de las materias primas descritas con anterioridad a la planta, hasta el proceso de logística y distribución de los mismos.

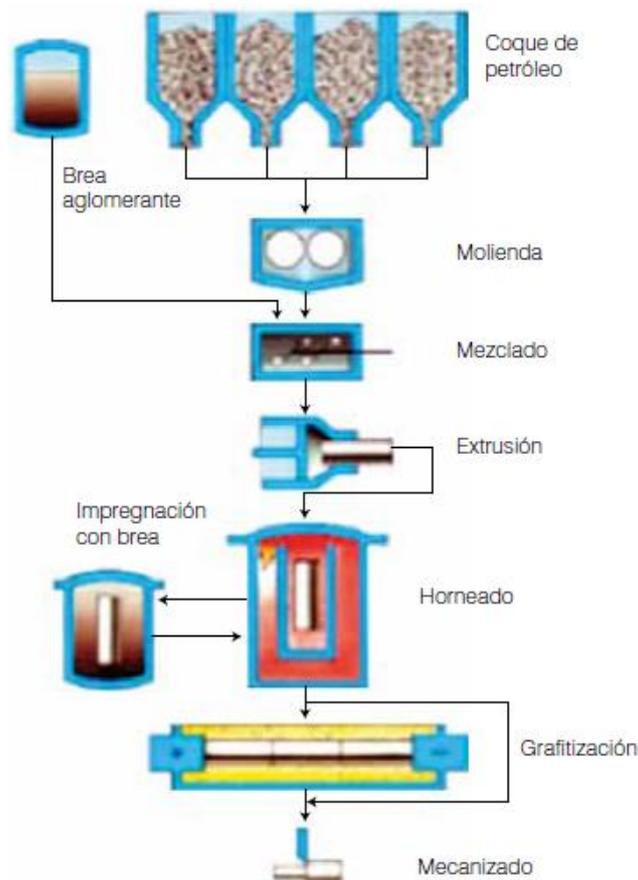


Figura 1. 2: Fases del proceso de producción de los electrodos de grafito

INTRODUCCIÓN.

Descripción del proceso de fabricación.

A continuación se describen, brevemente, las diferentes secciones de la planta y las principales tareas allí realizadas:

- **Sección de Crudos:** En esta primera fase, el coque se tritura, se tamiza, se vuelve a moler y se clasifica según el tamaño de grano. Posteriormente se añade una cantidad determinada de brea y aditivos, mezclándose bajo distintas condiciones de temperatura y dando lugar a la pasta que posteriormente se introducirá en la prensa, a partir de la cual se extruirán los denominados “electrodos crudos” con distintas longitudes y diámetros.
- **Sección de Cocción:** El objetivo de introducir los electrodos crudos en los hornos de cocción, representados en la figura 1.3, es incrementar la temperatura del electrodo hasta los **800 grados** centígrados mediante distintas curvas de calentamiento, provocando la **coquización de la brea**, la eliminación de las materias volátiles y dejando un cuerpo sólido, no deformable, de carbón amorfo.

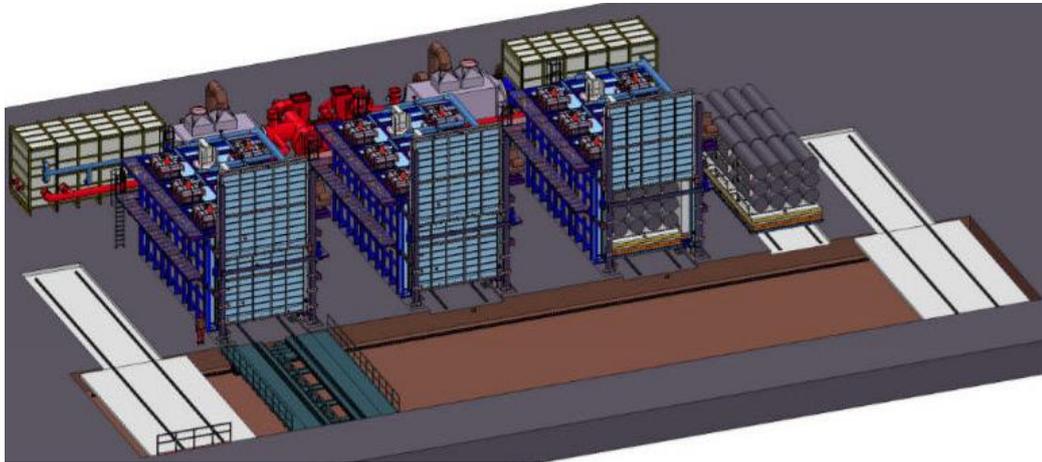


Figura 1. 3: Patio de hornos de solera móvil para la cocción de electrodos de grafito.

- **Sección de Impregnación:** La impregnación es la fase posterior a la cocción del electrodo. Consiste en introducir los electrodos en un autoclave en el que, una vez introducido el producto en el interior, se hace el vacío y, posteriormente, se llena de brea y se somete a una presión elevada, provocando que la brea se introduzca en el electrodo y rellene las porosidades del mismo, mejorando así la **densidad del electrodo** y otras propiedades.
- **Sección de Recocción:** Tiene lugar en los hornos de cocción mencionados anteriormente. En este caso, el electrodo se somete a una curva de calentamiento que permite que se alcancen los **750 grados**, algo menos que en el proceso de cocción, durante un tiempo inferior a la duración de la primera cocción. Como consecuencia, se eliminan los componentes más volátiles de la brea introducida en la impregnación, produciéndose la coquificación de la misma, de manera que se obtiene un producto de mayor calidad, mejores características y densidad más elevada.

INTRODUCCIÓN.

Descripción del proceso de fabricación.

- **Sección de Grafitación:** Es aquí, en la fase de grafitación, donde los electrodos son sometidos a una temperatura de unos **3000 grados** centígrados para formar una **estructura cristalina** de grafito.

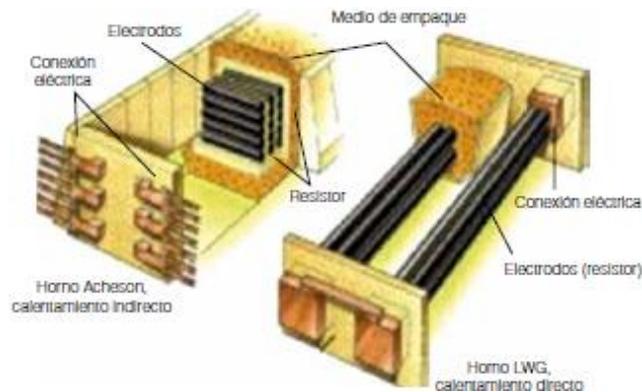


Figura 1. 4: Tipos de hornos de grafitación. Hornos Acheson (izq.) vs. Hornos LWG (dcha.)

En la figura 1.4 se pueden observar los dos tipos de hornos de grafitación más comunes en la industria. En los hornos más antiguos, del tipo **Acheson**, los electrodos se empaquetan dentro de una mezcla de coque y arena, y el calentamiento se produce mediante la resistencia de contacto de dicha mezcla.

En los hornos más modernos, llamados **LWC** (Length-Wise Graphitization) o de grafitación longitudinal, los cuales están implantados en SGL Carbon La Coruña, el calentamiento se produce por el **paso directo de electricidad a través del electrodo**, que se disponen en hileras y tapados con un lecho de coque metalúrgico que realizará la función de aislante frente a la atmósfera exterior.

La implantación de estos hornos en la planta ha supuesto una considerable reducción del tiempo requerido para el proceso de grafitación.

- **Sección de Mecanizado:** Finalmente, los electrodos son sometidos a procesos de mecanizado tales como refrentado y torneado según las dimensiones y diámetros deseados por el cliente y siempre respetando las tolerancias requeridas. En los hornos de arco eléctrico, se utilizan varios **electrodos roscados** entre sí mediante unas piezas denominadas **nipples** (ver figura 1.6). Esto implica que se mecanice en los extremos de los electrodos unas roscas interiores para asegurar una adecuada unión de los electrodos entre sí.

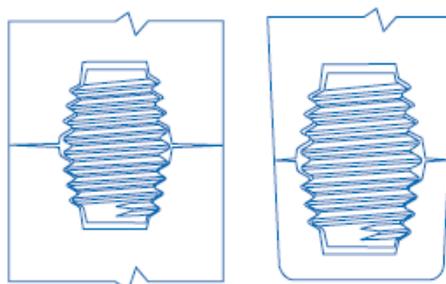


Figura 1. 5: Sección de un *nipple* y los correspondientes extremos de los electrodos

INTRODUCCIÓN.

Descripción de los hornos de cocción.

1.2.1 - Descripción de los hornos de cocción.

Una vez comentadas cada una de las secciones existentes en la planta, nos centraremos en aquella en la que los faldones, objeto de estudio en este proyecto, están instalados, es decir, los hornos de cocción y recocción. Estructuralmente, son hornos de construcción metálica con recubrimiento interior en paredes, puerta y bóveda de materiales refractarios.

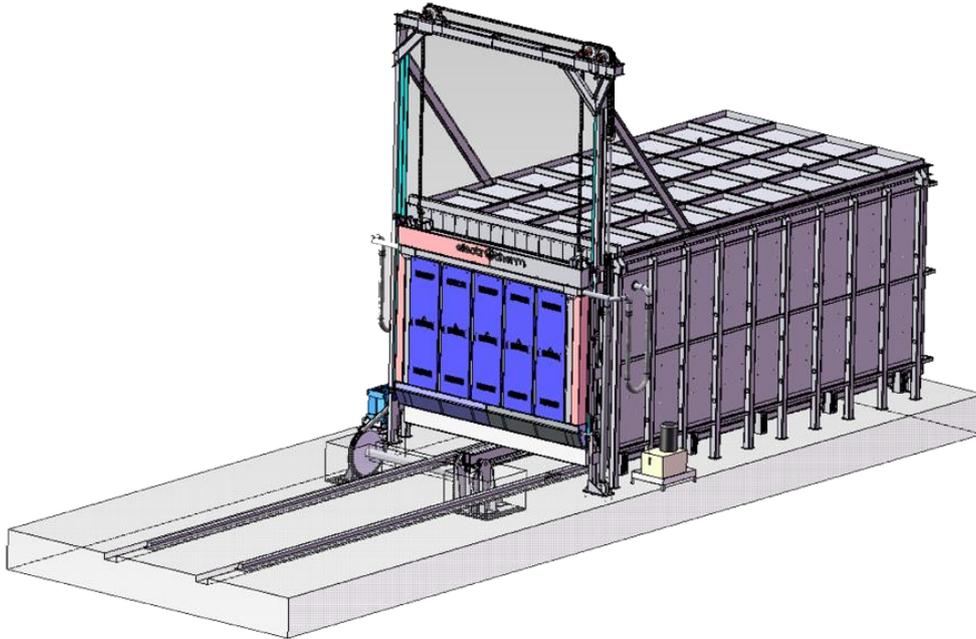


Figura 1. 6: Horno de solera móvil para la cocción de electrodos de grafito

En cuanto a las dimensiones, la planta de dichos hornos es de sección rectangular, cuya longitud se aproxima a los 18 metros y una anchura que ronda los 6,5 m. Estos hornos alcanzan una altura de 7 metros, siendo el techo de los mismos en forma abovedada.

Consta de 30 pilares, cuya distribución se puede ver en la figura 1.7, separados entre sí una distancia de aproximadamente 1,5 metros y que, por norma general, son de sección IPN 260.

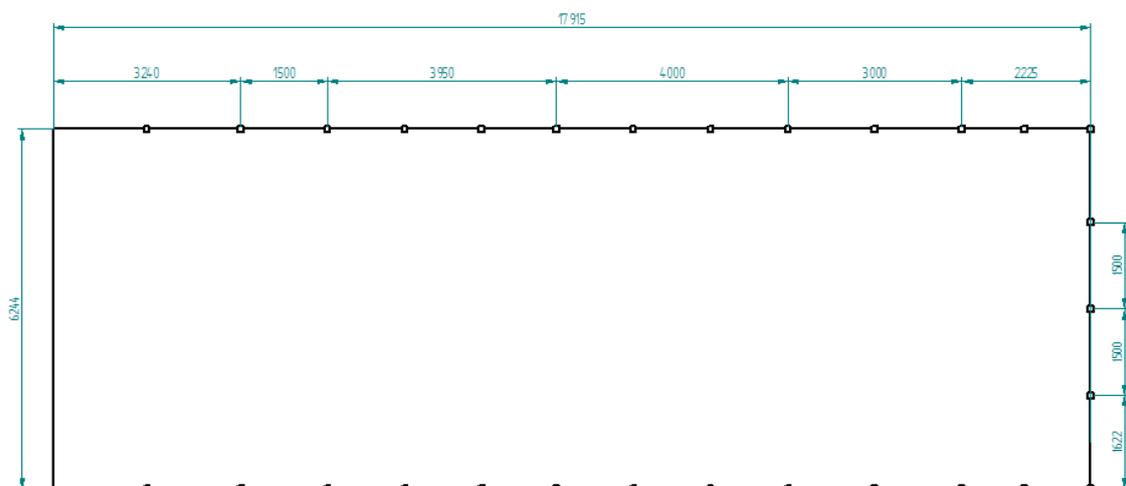


Figura 1. 7: Planta del horno y distribución de pilares

INTRODUCCIÓN.

Descripción de los hornos de cocción.

Sin embargo, distribuidos uniformemente a lo largo de los laterales del horno, existen ciertos pilares dobles, es decir, en lugar de ser un pilar IPN, están formados por dos perfiles UPN equivalentes a los pilares IPN enfrentados, anclados a la misma cimentación y libres en toda su altura. En las figuras 1.8 y 1.9 se muestran los perfiles IPN y UPN mencionados, así como la representación de los pilares dobles.

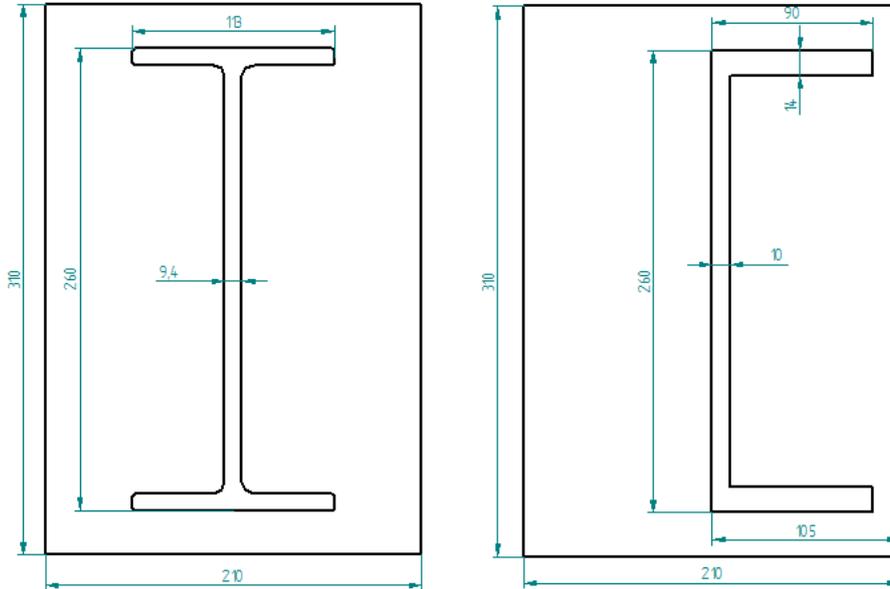


Figura 1. 8: Perfil IPN y UPN.

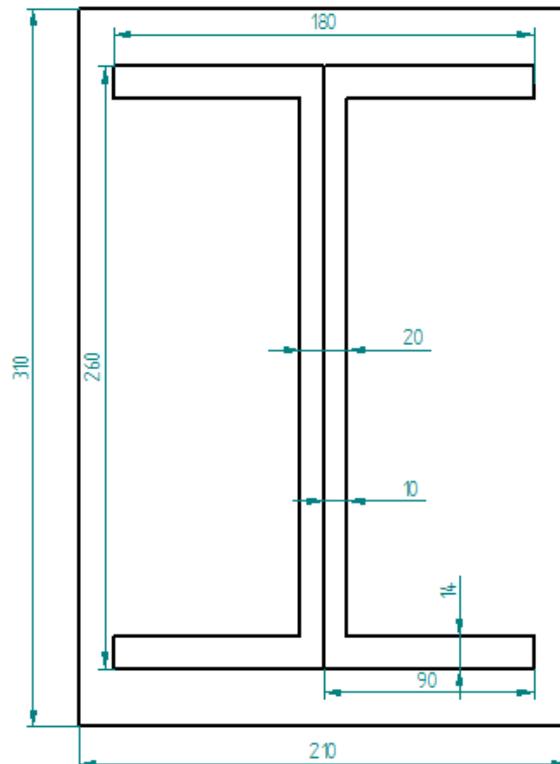


Figura 1. 9: Composición de pilar doble

INTRODUCCIÓN.

Descripción de los hornos de cocción.

Estos pilares tienen la función de permitir el movimiento de la estructura del horno, debidas a la dilatación del material.

Además, la estructura está arriostrada mediante 18 correas de distintas dimensiones y diferentes perfiles, principalmente UPN y perfiles angulares.

Estos hornos están destinados a la cocción y recocción de electrodos mediante el método de solera móvil.

Sobre las soleras, intercambiables entre todos los hornos, se colocan los electrodos en posición vertical, de manera que se ocupa completamente la superficie de la solera. Debido a que durante la cocción de los electrodos se alcanza su fase plástica, es necesario introducirlos en unos recipientes cilíndricos tapados en el fondo y abiertos en la parte superior, denominados "cassettes", y rellenarlos de un árido inerte de tal forma que no exista contacto entre el electrodo y el metal del recipiente, para facilitar su posterior extracción y evitar su deformación.

En cada una de las cocciones, la solera se llena de electrodos en el exterior del horno, cada uno introducido en su correspondiente *cassette* y, posteriormente, se transporta la solera mediante un carro que se desplaza sobre unos raíles hasta el horno en el que se vaya a realizar la cocción. Debido a que la solera es móvil e intercambiable entre hornos, la parte inferior de los mismos es completamente abierta, cerrándose únicamente una vez introducida la solera con los electrodos en el interior del horno y mediante la introducción de los faldones, objeto de estudio de este proyecto, en la junta de agua de la solera, consiguiéndose así el sellado y la estanqueidad del horno.

Una vez introducida la solera en el interior del horno, se calientan los electrodos según unas rampas de temperatura, denominadas *codes* hasta alcanzar los 800 °C si se trata de una cocción, o 750 °C en caso de tener que realizar una recocción. Para seguir estas curvas de temperatura, existen una serie de **quemadores de gas natural** instalados a lo largo de todo el horno.

Cada horno está dividido en tres zonas numeradas del 1 al 3, siendo la zona 1 la más próxima a la puerta del horno, la zona 2 la intermedia y la zona 3 la más alejada de la entrada al horno, en las cuales se instalan una serie de **termopares** independientes para poder controlar la temperatura que se alcanza en cada zona y así regular la potencia de los quemadores para conseguir controlar la temperatura en el interior asegurando la mejor calidad de electrodo posible.

Además, para conseguir repartir el calor a lo largo de todo el horno, existe un **ventilador de recirculación** por cada zona, que mueve el aire del interior para homogeneizar la temperatura.

1.3 – Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es disponer de un modelo de elementos finitos capaz de reproducir los procesos de rotura observados en los faldones del horno.

Para ello se realiza una simulación del proceso de calentamiento en los faldones, considerándose las temperaturas reales obtenidas tras un estudio experimental así como los materiales de las distintas partes que intervienen en el proceso de dilatación y contracción del faldón y restricciones de movimiento.

Con este modelo contrastado con los resultados experimentales resultantes en los hornos se abordan los cambios y mejoras propuestos en posteriores capítulos.

La mejor propuesta se instalará en uno de los hornos y se observará si el comportamiento real se corresponde con el comportamiento simulado.

1.4 – Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto se centra en identificar las causas de rotura y fallo de los faldones correspondientes a los hornos de solera móvil de la planta e introducir las medidas de mejora necesarias para conseguir reducirlas o eliminarlas. Estas medidas de mejoras pasarán por hacer cambios en el diseño de los faldones y en el material.

Se intentará conseguir además que el nuevo modelo propuesto sea de menor coste, tanto en fabricación como en mano de obra, y con un montaje más rápido y simple que el actual.

2 – DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN

2.1 – Geometría del faldón

En la figura 2.1 se puede observar la geometría original de los faldones instalados en los hornos de cocción.

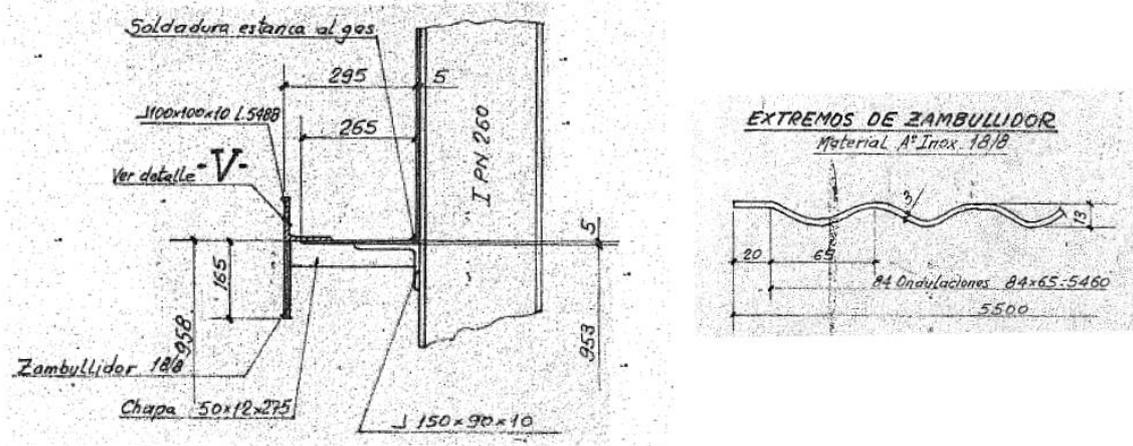


Figura 2. 1: Planos originales del perfil del faldón y planta del zambullidor

Los faldones están formados por diferentes perfiles y chapas metálicas que, si analizamos desde el interior hasta el exterior del faldón, serían:

- **Angular Interior:** Se trata de la parte del faldón que se encuentra en contacto directo con el interior del horno. Es un perfil angular de dimensiones 100x100x10 mm de acero al carbono S-235-JR.
- **Zambullidor:** Es la parte fundamental del faldón. Es una chapa ondulada de acero inoxidable AISI304 refractario, soldada a la parte inferior del angular interior, de manera que es el elemento que está en contacto con el agua de la junta de cierre permitiendo así la total estanqueidad del interior del horno.
- **Pletina:** Es el elemento de unión entre los angulares interior y exterior y, además, se encarga de sujetar el material refractario que recubre las paredes del horno. Es una pletina de acero al carbono S-235-JR de 5 mm de espesor.
- **Angular Exterior:** Al igual que el angular interior, se trata de un perfil angular de dimensiones 150x90x10 mm de acero al carbono S-235-J.
- **Chapa del Horno:** Es una chapa de acero al carbono S-235-JR que se coloca soldada a la armadura del horno y cuya función principal es cubrir las paredes del horno por el exterior, protegiendo así el material refractario y evitando el escape de presión, calor y cualquier tipo de producto volátil generado que pudiese filtrarse a través del recubrimiento de las paredes.

2.2 - Descripción de las Condiciones de Funcionamiento

Durante el proceso de cocción y recocción de los electrodos, en el interior de los hornos se tienen una serie de condiciones habituales:

- **Presión Controlada:** Durante la cocción, la temperatura se incrementa a lo largo del tiempo y siguiendo una curva de calentamiento predeterminada. Acompañado al incremento de esta temperatura va una presión, que debe ser ajustada según el punto de la curva en la que se encuentre y por lo tanto debe estar controlada en todo momento.

El control de la presión se realiza mediante dos manómetros, que registran la presión existente en el interior del horno. Con los datos registrados, se obtiene un valor medio a partir del cual se controla el grado de apertura de una válvula de mariposa que se encuentra en la chimenea del horno.

- **Emisión de Productos Volátiles:** Como resultado del calentamiento del electrodo y, consecuentemente, los materiales que lo componen, se producen una serie de reacciones que tienen como resultado final la emisión de productos volátiles que conviene conducir hacia la chimenea del horno, donde son constantemente quemados, produciéndose finalmente la emisión de CO₂ y agua únicamente.

Para evitar la variación incontrolada de la presión y el escape de cualquier tipo de producto volátil, es necesaria la estanqueidad del horno, que se conseguirá mediante una **junta de agua**.

Esta junta de agua pertenece a la solera móvil sobre la que se colocan los electrodos para su posterior cocción, y el elemento estructural que permite el cierre de esta junta de agua es lo que nosotros denominaremos **faldón**.

El faldón se introduce en el agua de la junta, de manera que los productos generados durante la cocción, quedan confinados en el interior del horno y son dirigidos hacia la chimenea, que actúa como incinerador.

Obtención de Condiciones de Funcionamiento para el posterior análisis

Durante la cocción, la temperatura en el interior del horno se incrementa gradualmente siguiendo una curva de calentamiento predeterminada durante la cual se alcanzan hasta 750 u 800 °C, dependiendo de si se va a realizar una recocción o una cocción de electrodos, respectivamente.

El incremento de la temperatura se consigue gracias a la existencia de 12 quemadores, 4 quemadores por cada zona del horno. Los quemadores se controlan mediante un PID, mecanismo de control por realimentación cuya función es calcular la desviación o error entre el valor de temperatura deseado y el valor medido dentro del horno, de tal forma que se ajusta la potencia en función de la curva de calentamiento correspondiente a la cocción.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN
Descripción de las condiciones de funcionamiento

En el caso de la cocción, este calentamiento se realiza durante, aproximadamente, entre 7 y 12 días. En las recocciones, la duración del calentamiento es sensiblemente inferior al de las cocciones.

Para conocer la temperatura que se alcanza en cada punto del faldón, se han recolectado los datos experimentalmente, tarea que se ha llevado a cabo de la siguiente forma:

Se han instalado 6 termopares, ver figura 2.2, colocados en dos zonas distintas de uno de los hornos y a diferentes alturas del faldón para cubrir la mayor superficie posible. Se considera Termopar 1 (T1) al colocado en la zona inferior del faldón, Termopar 2 (T2) al intermedio y Termopar 3 (T3) al situado en la parte superior del mismo.

Además se han tomado las medidas de temperatura transversalmente, abarcando así las tres direcciones del faldón y conociendo por lo tanto el campo y distribución de temperaturas.

También se tiene una temperatura constante de aproximadamente 50 grados centígrados hasta cierta altura del faldón, que se correspondería con la temperatura de la junta de agua.

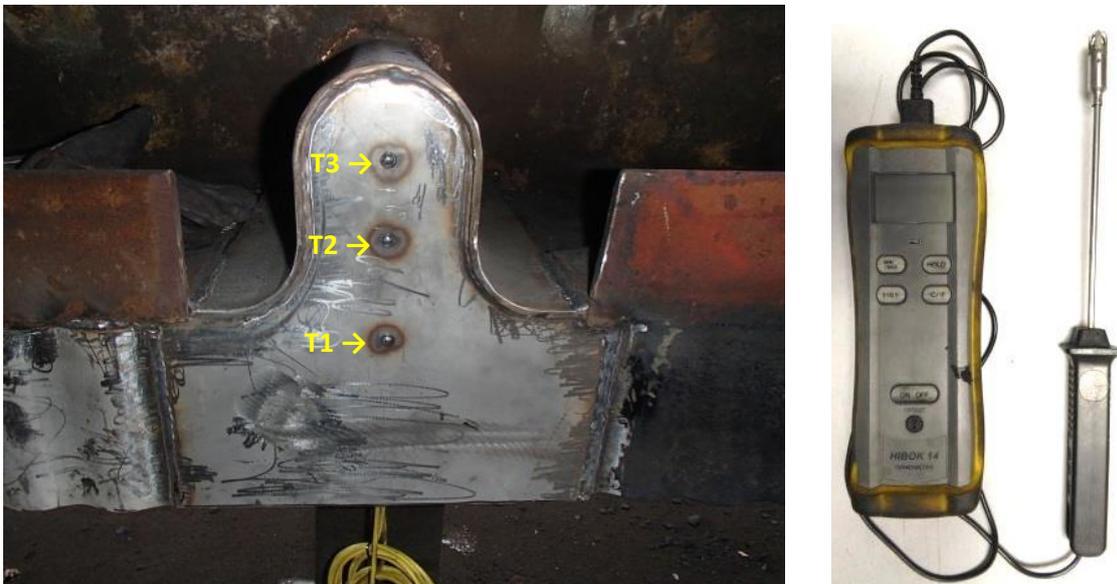


Figura 2. 2: Instalación de termopares en la cara interior del faldón (izq) y sonda utilizada en la medición de la temperatura del agua de la junta (dcha).

Conocidos los valores de temperatura en los puntos predeterminados en los que se ha realizado de toma de datos y donde se han instalado los termopares, podemos obtener una serie de gradientes, que asumiremos lineales, puesto que los termopares se han colocado a una distancia muy corta entre sí, y que nos permitirán suponer la variación de la temperatura en el espacio. En la dirección transversal del faldón, es decir, desde el interior hacia el exterior del horno, también se asumen lineales debido a que los resultados de las mediciones resultaron aproximadamente lineales.

Estos valores de temperatura en cada punto del espacio nos serán de utilidad a la hora de introducir las cargas actuantes sobre el faldón.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN
Descripción de las condiciones de funcionamiento

Además, tendremos que suponer una temperatura media de funcionamiento de este elemento estructural para poder definir las características de los materiales a una determinada temperatura, puesto que no podremos suponer las mismas propiedades que a temperatura ambiente.

Las variaciones de temperatura en el faldón se representan según las tres direcciones del espacio (X, Y, Z), que se pueden ver en la imagen 2.3.

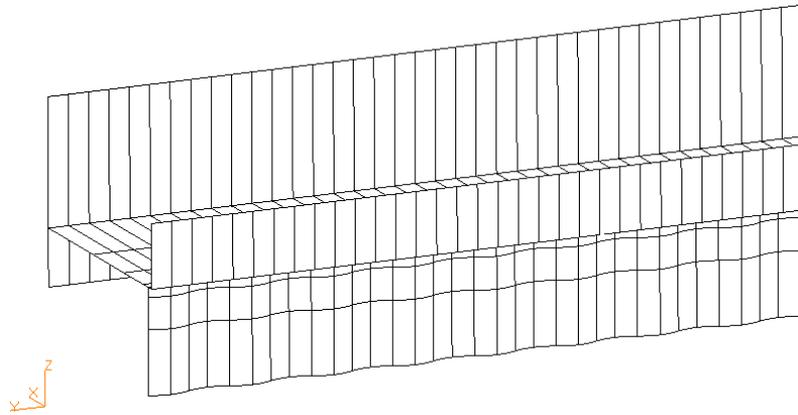


Figura 2. 3: Detalle y representación de las tres direcciones X, Y, Z del faldón.

Para el campo de temperaturas en la dirección transversal del faldón, eje X según el sistema de referencia considerado, se tiene la expresión descrita en la ecuación 2.1, representada en la figura 2.4.

Gradiente Transversal $\rightarrow T_x = -1,04 \cdot X + 460 \text{ [}^\circ\text{C]}$ [Ec. 2.1]

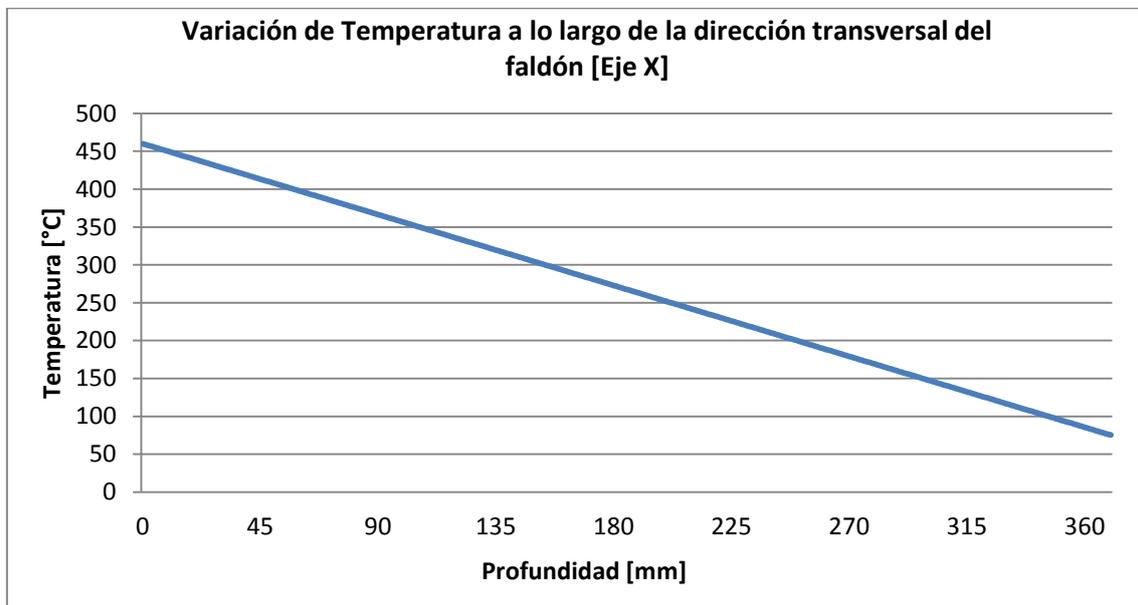


Figura 2. 4: Variación de la temperatura en la dirección transversal del faldón (Eje X)

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN
Descripción de las condiciones de funcionamiento

Tomando los valores recogidos por los termopares durante la cocción, podemos obtener la aproximación lineal descrita en la ecuación 2.2 de la variación de la temperatura desde la parte superior de la cara interna del faldón y el termopar inferior (Termopar 1). En la figura 2.5 se representa esta distribución de temperaturas.

$$\text{Gradiente Vertical Superior} \rightarrow T_{Z_1} = 2,93 \cdot Z + 254 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

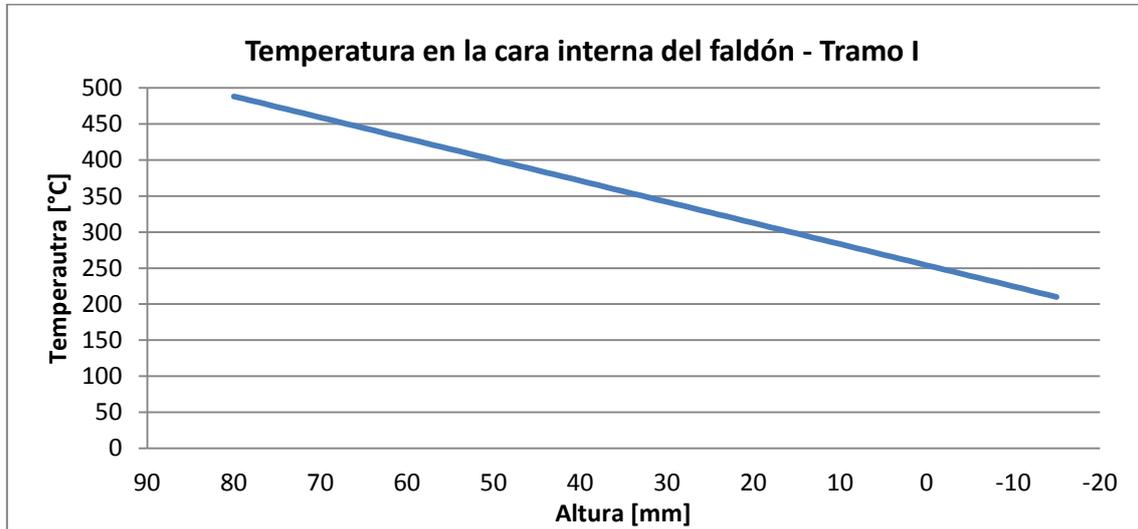


Figura 2. 5: Variación de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Z). [Parte superior – T1]

Para obtener el gradiente térmico sobre la zona del faldón comprendida entre el termopar inferior (T1) y la junta de agua, se vuelven a extrapolar los datos recogidos durante las cocciones. La ecuación 2.3 y la figura 2.6 representan la distribución de temperatura en esta zona.

$$\text{Gradiente Vertical Intermedio} \rightarrow T_{Z_2} = 3,22 \cdot Z + 254 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

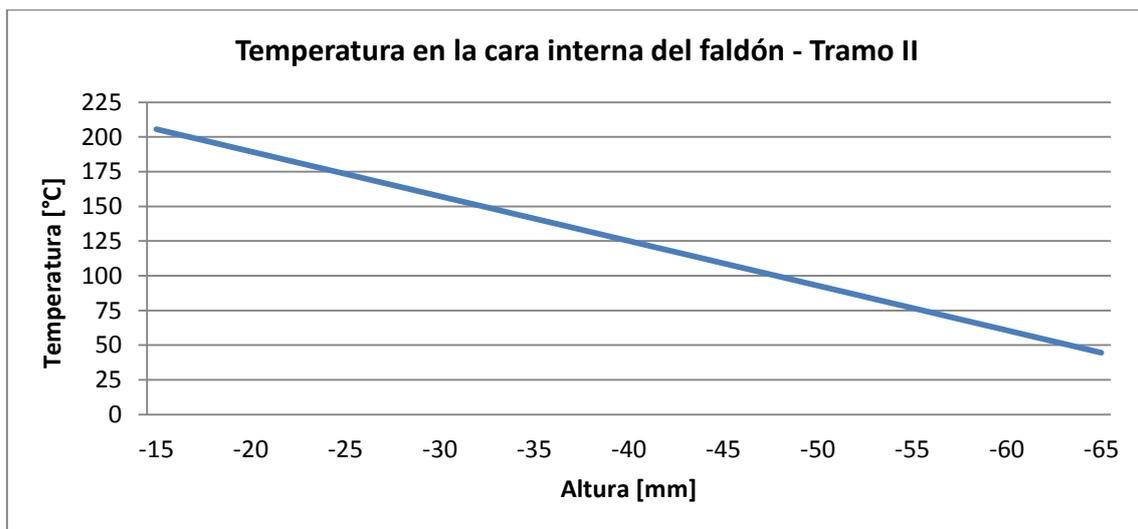


Figura 2. 6: Variación de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Z). [T1 – Junta de Agua]

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FALDÓN
Descripción de las condiciones de funcionamiento

Con la sonda de temperatura mostrada en la figura 2.2 se mide la temperatura del faldón que se encuentra en contacto con la junta de agua, resultando una temperatura constante (Ecuación 2.4) representada en la figura 2.7.

$$\text{Temperatura Inferior} \rightarrow T_{AGUA} = cte = 50 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

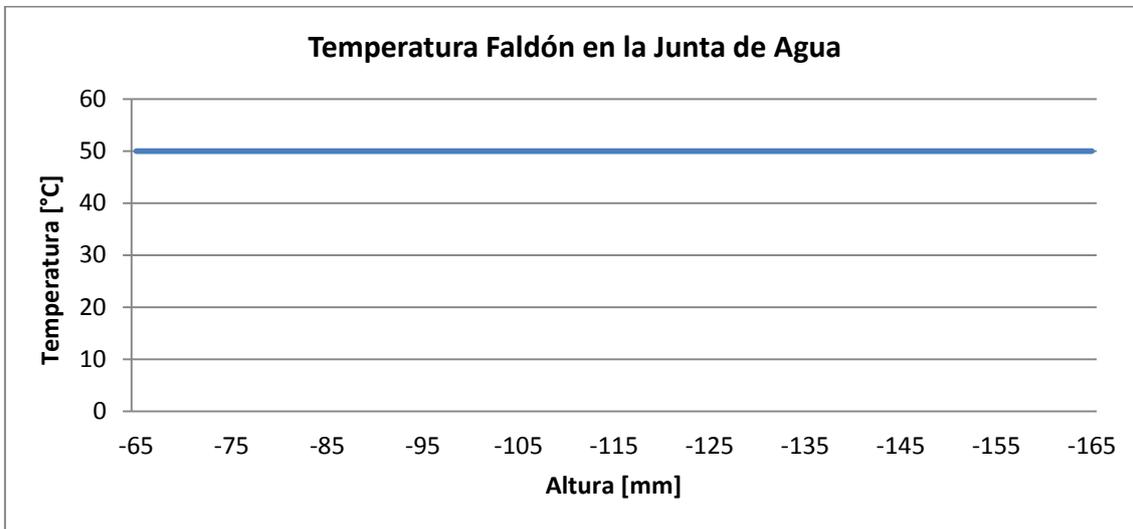


Figura 2.7: Temperatura de la zona del faldón en contacto con la junta de agua.

Extrapolando los datos de temperatura recogidos por los termopares, podemos obtener la distribución de temperaturas completa en la cara interna del faldón, de manera que tendríamos la aproximación lineal representada en la figura 2.8.

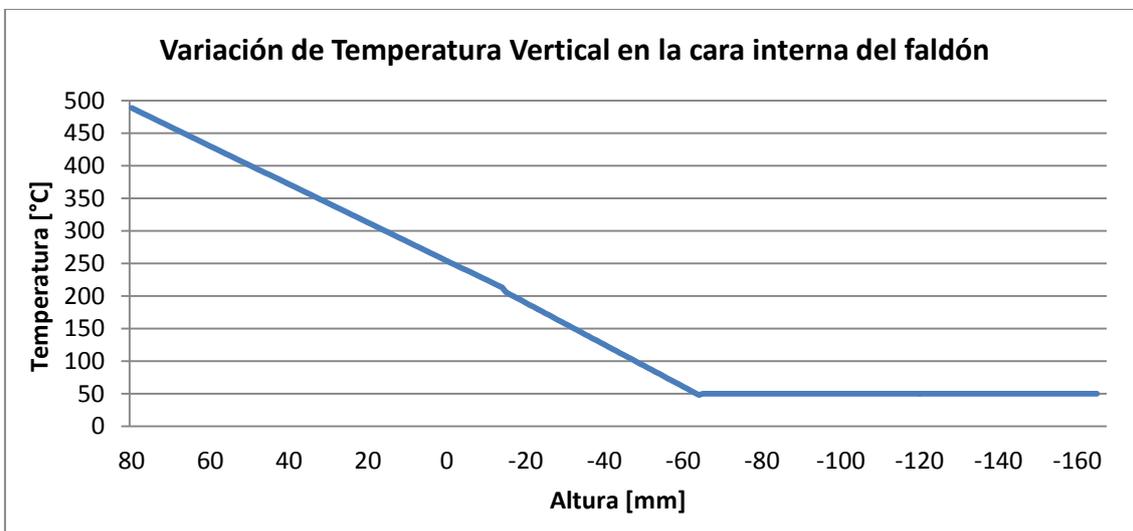


Figura 2. 8: Variación total de temperatura en la cara interna del faldón (Eje Y).

Como se aprecia en las gráficas mostradas en las figuras anteriores, la temperatura máxima en el faldón es de aproximadamente 500 °C y se correspondería con la temperatura alcanzada en el punto más alto de la cara interna del faldón, en el eje Z del mismo. La temperatura, tanto en el eje Z como en el Y, siguen una distribución que se puede aproximar por un gradiente lineal, puesto que la variación tiene lugar de forma suave y progresiva.

3 - ANÁLISIS DE MATERIALES

3.1 - Materiales actuales

Los principales materiales que componen el faldón son un acero al carbono (S-235-JR) y un acero inoxidable (AISI304).

3.1.1 - Acero S-235-JR

El acero S-235-JR, acero al carbono-manganeso, es un producto laminado en caliente, lo que provoca una mejora considerable de las propiedades mecánicas del mismo. Este acero se utilizará en prácticamente todo el faldón, exceptuando el zambullidor que irá introducido en la junta de agua. Las principales características de este tipo de acero se recogen en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Propiedades mecánicas del acero al carbono S-235-JR

| Propiedades Mecánicas del Acero al Carbono S235JR | |
|--|-------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 7.85 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 210000 |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.3 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 1.2 · 10 ⁻⁵ |
| <i>Tensión de Fluencia</i> [N/mm ²] | 235 |
| <i>Tensión de Fluencia a 300 °C</i> [N/mm ²] | 235 |
| <i>Tensión de Rotura</i> [N/mm ²] | 360 |
| <i>Tensión de Rotura a 300 °C</i> [N/mm ²] | 360 |

3.1.2 - Acero AISI 304

El acero inoxidable AISI 304, correspondiente a la línea de aceros inoxidables austeníticos cromo-níquel y con bajo contenido en carbono. Es un material de excelente resistencia en una amplia variedad de medios corrosivos, incluyendo productos de petróleo caliente y gases de combustión. Tiene además unas buenas características para la soldadura.

Este acero se utiliza en el zambullidor que irá introducido en la junta de agua, de manera que sus características inoxidables evitarán la posible corrosión debida al contacto continuo de esta parte con el agua. Además tiene propiedades refractarias, es decir, se comporta bien ante temperaturas elevadas en lo que se refiere a las dilataciones del material debidas a la temperatura. Las características de este material se recogen en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304

| Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable AISI304 | |
|--|-------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 8.03 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 187500 |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.3 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 1.79 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Tensión de Fluencia</i> [N/mm ²] | 205 |
| <i>Tensión de Fluencia a 300 °C</i> [N/mm ²] | 140 |
| <i>Tensión de Rotura</i> [N/mm ²] | 515 |
| <i>Tensión de Rotura a 300 °C</i> [N/mm ²] | 433 |

3.2 - Materiales propuestos

A lo largo de este proyecto se irán desarrollando e introduciendo mejoras de diseño que implicarán también cambios en los materiales de construcción de las distintas partes del faldón. Los materiales que se propondrán y sobre los cuales se irán desarrollando las propuestas de mejora son los aceros inoxidables de las series AISI 309, 310 y 316, así como una silicona resistente a altas temperaturas.

3.2.1 - Acero AISI 309

El acero inoxidable AISI 309, cuyas propiedades se exponen en la tabla 3.3, se suele utilizar para aplicaciones a temperaturas elevadas. Su alto contenido en cromo-níquel proporciona una resistencia superior a temperatura ambiente que el acero inoxidable austenítico AISI 304, además de ofrecer una resistencia a la corrosión similar.

Tabla 3. 3: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 309.

| Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable AISI309 | |
|--|-------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 8.03 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 200000 |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.3 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 1.76 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Tensión de Fluencia</i> [N/mm ²] | 290 |
| <i>Tensión de Fluencia a 300 °C</i> [N/mm ²] | 212 |
| <i>Tensión de Rotura</i> [N/mm ²] | 621 |
| <i>Tensión de Rotura a 300 °C</i> [N/mm ²] | 501 |

Este tipo de acero inoxidable de alta aleación generalmente exhibe una excelente resistencia a las temperaturas elevadas junto con una resistencia a la deformación por movimiento longitudinal y el ataque del medio.

3.2.2 - Acero AISI 316

El acero inoxidable AISI 316, ver tabla 3.4, es un acero más resistente a la corrosión que otros aceros al cromo-níquel cuando se expone a muchos tipos de sustancias químicas corrosivas. Se caracteriza por su buena maquinabilidad y soldabilidad.

Tabla 3. 4: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316.

| Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable AISI316 | |
|--|-------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 8.03 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 200000 |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.3 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 1.62 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Tensión de Fluencia</i> [N/mm ²] | 290 |
| <i>Tensión de Fluencia a 300 °C</i> [N/mm ²] | 159 |
| <i>Tensión de Rotura</i> [N/mm ²] | 579 |
| <i>Tensión de Rotura a 300 °C</i> [N/mm ²] | 500 |

3.2.3 - Acero AISI 310

El acero inoxidable AISI 309, ver tabla 3.5, pertenece también a los aceros refractario cromo-níquel, resistiendo éste mayor temperatura que los aceros 304 y 316. Es un acero de bajo carbono resistente a la corrosión, con una alta ductilidad y soldable.

Tabla 3. 5: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 310

| Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable AISI310 | |
|--|-------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 8.03 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 200000 |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.3 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 1.71 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Tensión de Fluencia</i> [N/mm ²] | 314 |
| <i>Tensión de Fluencia a 300 °C</i> [N/mm ²] | 239 |
| <i>Tensión de Rotura</i> [N/mm ²] | 624 |
| <i>Tensión de Rotura a 300 °C</i> [N/mm ²] | 519 |

3.2.4 - Silicona Soudal ® HTN

Las siliconas son polímeros inorgánicos derivados del polisiloxano, constituido por una serie de átomos de silicio y oxígeno alternados. En este proyecto, la silicona que se utilizará será Soudal® HT-N, resistente a la temperatura y reticulable en contacto con la humedad ambiental.

Este material se caracteriza por ser resistente a altas temperaturas en continuo (hasta 280°C) y sus propiedades se muestran en la tabla 3.6.

Presenta ciertas ventajas, como pueden ser:

- Sistema de curado neutro por acción de la humedad ambiental
- Buena adherencia sobre metales y la mayor parte de los materiales de construcción.
- Buena resistencia a los agentes atmosféricos y rayos UV
- Resistente en continuo hasta 280 °C.

Tabla 3. 6: Propiedades de la silicona

| Propiedades de la Silicona | |
|--|----------------------------|
| <i>Densidad</i> [Kg/mm ³] | 1.18 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Módulo Elástico</i> [N/mm ²] | 1.1 |
| <i>Coefficiente de Expansión Térmica</i> [°C ⁻¹] | 2 – 2.6 · 10 ⁻⁶ |
| <i>Coefficiente de Poisson</i> | 0.4 |

4 – CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 - Introducción al Método de los Elementos Finitos

El Método de los Elementos Finitos, desde el punto de vista de la ingeniería, tiene como concepto más importante el de la discretización del dominio en estudio. Esta discretización llevará consigo obtener una solución discreta aproximada.

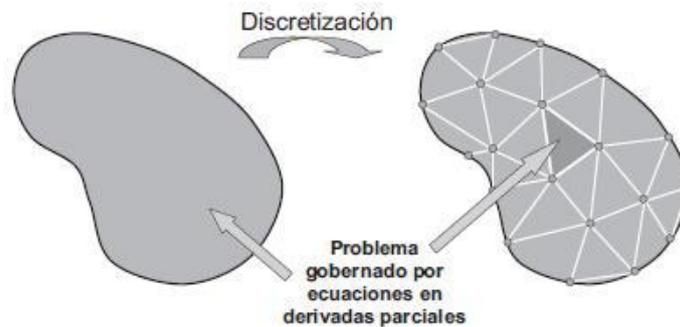


Figura 4. 1: Ejemplo de discretización de un sólido.

En necesario establecer esta relación a nivel local, es decir, sobre cada elemento, de manera que la unión de los comportamientos de todos los elementos reproduzca el comportamiento del dominio total. Los pasos fundamentales a la hora de aplicar el Método de los Elementos Finitos son:

- Realizar la discretización del dominio. Sustituir el dominio continuo por uno discreto, que reproduzca de manera aproximada el anterior. Ello implica la numeración de elementos y nodos.
- Sobre cada elemento se define una variación de los desplazamientos. En este paso asignamos al dominio un número finito de grados de libertad, puesto que en el medio continuo tiene infinitos.
- Se calculan las matrices elementales de rigidez y de carga, que dependerán de las características del material y de las coordenadas de los nodos de los elementos definidos en la discretización.
- Se ensamblan las matrices elementales para obtener la matriz de rigidez global \mathbf{K} a medida que estas se van calculando.
- Se calcula el vector de cargas, el cual sólo depende de las cargas exteriores y de una serie de funciones de interpolación definidas para cada análisis. Al igual que \mathbf{K} , se hace ensamblando los resultados de cada nodo, por lo que ambas se van generando simultáneamente.
- Se aplican las condiciones de contorno en desplazamientos y se resuelve el sistema de ecuaciones para encontrar los desplazamientos y reacciones. Conocidos los desplazamientos, las ecuaciones de la elasticidad con las hipótesis introducidas permiten calcular deformaciones $\boldsymbol{\varepsilon}$ y tensiones $\boldsymbol{\sigma}$.

4.2 - Software utilizado

El Software utilizado en este proyecto para el análisis por elementos finitos es MSC Nastran y Patran.

Nastran es un programa de análisis por elementos finitos desarrollado primeramente por la NASA a finales de los años 60 cuyo código está escrito principalmente en FORTRAN.

Este programa es un software de análisis, es decir, no contiene una herramienta que le permita construir gráficamente un modelo o mallado, por lo que depende de otro programa para construir la geometría y hacer el pre y postprocesado.

Tanto las entradas como las salidas del programa se encuentran en forma de archivos de texto.

A pesar de que existe una amplia gama de software CAD que permite importar geometrías, mallado, cargas y restricciones, es aconsejable el uso combinado de este programa con otro software compatible, que en nuestro caso será Patran.

Patran es un programa de ingeniería asistida por ordenador (CAE) que nos proporcionará una interfaz gráfica para el modelado de sólidos, mallado, configuración de los análisis y por supuesto el post-procesado tanto de los modelos de elementos finitos como sus resultados.

La secuencia de trabajo de estos programas es la siguiente:

1. Definir de la geometría
2. Mallar con elementos finitos dicha geometría
3. Asignar las propiedades correspondientes a las distintas partes de la geometría y, consecuentemente, a los elementos finitos.
4. Definir las condiciones de contorno para cada caso de carga
5. Definir las cargas externas aplicadas sobre el modelo.
6. Definir el tipo de análisis
7. Exportar un fichero de entrada, con todos los datos anteriores sobre el modelo, a un software de análisis de elementos finitos, en nuestro caso Nastran, y ejecutarlo.
8. Una vez terminado el análisis en Nastran, importar los resultados obtenidos en Patran
9. Analizar los resultados mediante la interfaz gráfica (visualización de deformaciones, desplazamientos, tensiones...)

4.3 – Tipos de Análisis: Lineal y No Lineal

El método de los elementos finitos utiliza diferentes técnicas numéricas para resolver las ecuaciones dependiendo de si el sistema de ecuaciones describe un sistema lineal o no lineal.

En un análisis lineal, se supone implícitamente que las deflexiones y deformaciones son muy pequeñas, y que los esfuerzos resultantes están por debajo de la tensión de fluencia del material.

En consecuencia, se supone una relación lineal entre las cargas aplicadas y la respuesta de la estructura. La rigidez se puede considerar constante (es decir, independiente de las fuerzas y desplazamientos) y las ecuaciones de equilibrio de elementos finitos,

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

son ecuaciones lineales, donde la matriz de rigidez, \mathbf{K} , es independiente de los desplazamientos generalizados, \mathbf{u} , y el vector de fuerza generalizada, \mathbf{P} .

Esta linealidad implica que cualquier aumento o disminución de la carga producirán un aumento o disminución proporcional de los desplazamientos, deformaciones y tensiones. Debido a la relación lineal, es necesario calcular la matriz de rigidez de la estructura una única vez. A partir de esta matriz de rigidez se puede calcular la respuesta de la estructura para otras cargas aplicadas y en un solo paso.

Las no linealidades del material, geometría o condiciones de contorno no se incluyen en este tipo de análisis. Se supone un material isotrópico, lineal y elástico cuyo comportamiento puede definirse mediante dos constantes: Módulo de Young y Coeficiente de Poisson.

Los principales pasos que se deben realizar para llevar a cabo un análisis lineal son los siguientes:

- **Input/Entradas:** La geometría del problema (nodos y elementos), propiedades físicas y materiales, cargas aplicadas, condiciones de contorno.
- **Cálculo de la matriz de rigidez y el vector de fuerzas.**
- **Cálculo de la matriz de rigidez global y ensamblaje del vector de carga:** Se ensamblan la matriz de rigidez global y el vector de fuerzas nodales. Las restricciones y condiciones de contorno se incorporan mediante la modificación de los elementos de la matriz de rigidez y el vector de carga.
- **Solución de ecuaciones:** El vector de desplazamientos nodales se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones resultante.
- **Cálculo de tensiones y deformaciones:** Las tensiones y deformaciones se calculan para cada uno de los elementos finitos.

Sin embargo, en muchas estructuras las deformaciones y tensiones no cambian proporcionalmente con las cargas. En estos problemas la respuesta de la estructura depende de su estado actual y las ecuaciones de equilibrio reflejan que la matriz de rigidez depende tanto de los desplazamientos como la carga aplicada

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}(\mathbf{P}, \mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

A medida que la estructura se desplaza debido a la aplicación de la carga, la rigidez también varía, y por lo tanto lo hará también la respuesta de la estructura. Consecuentemente, tendremos un problema no lineal, que requiere una solución incremental, lo que supone la división del problema en pasos, en los cuales se calculará el desplazamiento y se actualizará la matriz de rigidez.

Cada paso utiliza los resultados del paso anterior como punto de partida. Como resultado, la matriz de rigidez debe ser generada e invertida tantas veces como pasos de carga se hayan definido con anterioridad, lo que provoca que este análisis requiera más tiempo y potencia computacional.

Existen distintos motivos por los cuales es necesario realizar un análisis no lineal:

- No linealidad del material
- No linealidad geométrica
- Condiciones de contorno no lineales

Para este proyecto, se consideran las no linealidades del material, geometría y condiciones de contorno.

No linealidad del material

Un modelo de material lineal implica que la tensión es proporcional a la deformación. También se presupone que no se producirán deformaciones permanentes y que, una vez que la carga se haya eliminado, el modelo volverá a su forma original.

Aunque esta simplificación es aceptable en una gran parte de supuestos en ingeniería, si las cargas son suficientemente elevadas para provocar deformaciones permanentes, o si las deformaciones unitarias son muy elevadas, debe utilizarse el modelo del material no lineal.

Tendremos que definir entonces un material con propiedades lineales hasta un determinado nivel de tensiones e introducir la relación entre la tensión y la deformación, a partir de este nivel.

El software utilizado, Patran, nos da la oportunidad de crear un material no lineal según distintos modelos: no lineal elástico, hiperelástico, elastoplástico, etc.

De entre todos ellos, nosotros utilizaremos un material no lineal definido como elastoplástico, dentro del cual lo definiremos como un material con comportamiento bilineal.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Tipos de análisis: Lineal y no lineal.*

El modelo bilineal consiste en suponer la curva de tensión-deformación del material está formada por dos rectas. Una primera recta que comience en el origen de coordenadas, que termine en el punto de fluencia del material y cuya pendiente sea igual al módulo elástico (Módulo de Young) del material, y una segunda recta con origen en el punto de fluencia cuya pendiente sea igual al módulo tangente, que se define como la pendiente de la curva de tensión-deformación plástica.

En la figura 4.2 se muestra la curva de esfuerzo-deformación de un material con modelo lineal, bilineal y la de un material real.

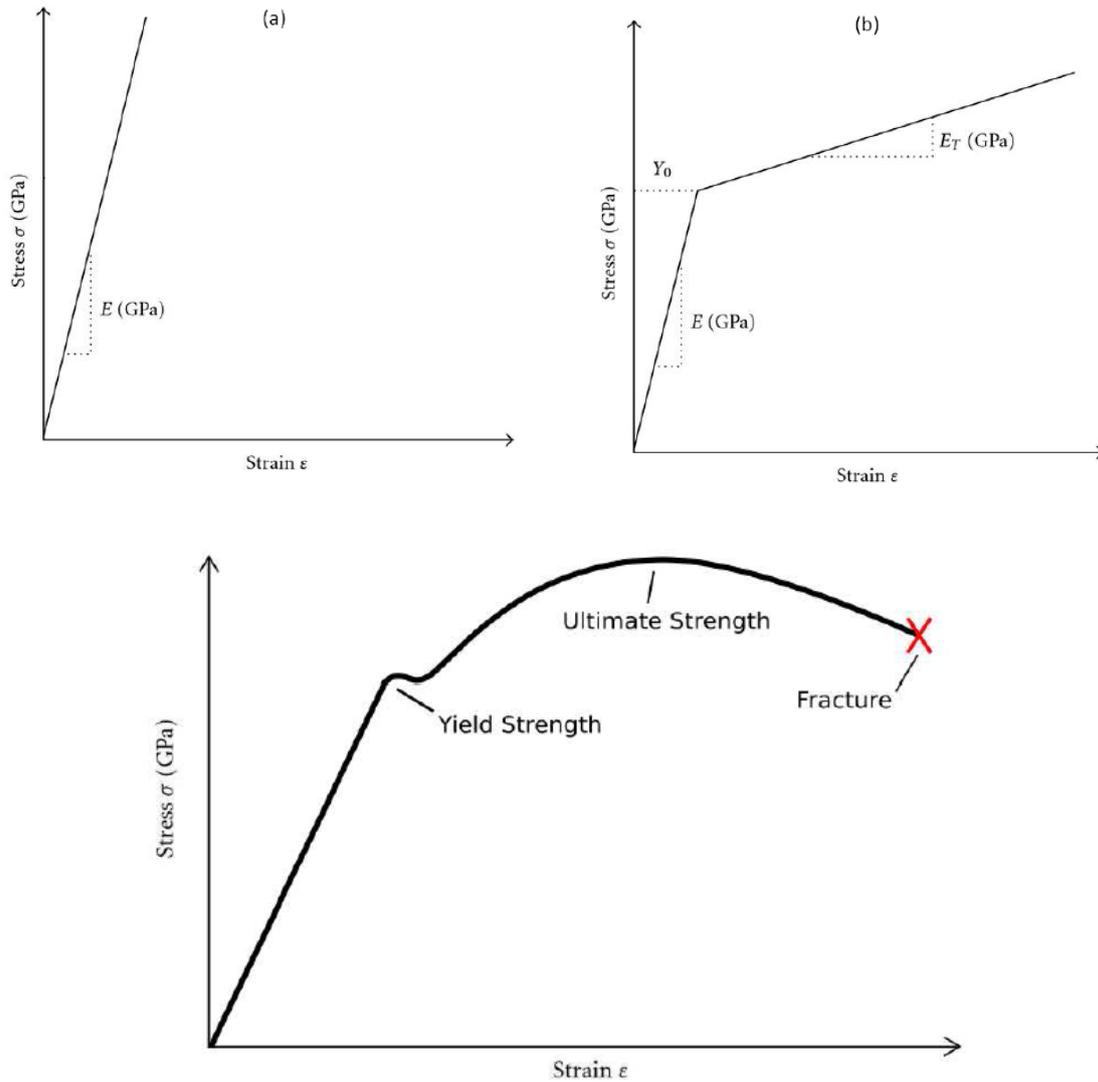


Figura 4. 2: Curva de esfuerzo-deformación de un material con modelo lineal, bilineal y la de un material real.

No linealidad geométrica y condiciones de contorno no lineales

El análisis no lineal es necesario cuando la rigidez de la pieza cambia bajo sus condiciones de funcionamiento. Si la variación de la rigidez proviene de los cambios de forma, el comportamiento no lineal se definirá como no linealidad geométrica.

Estos cambios de rigidez provocados por la forma pueden suceder cuando una pieza tiene grandes deformaciones apreciables a simple vista. Una regla de aceptación general sugiere la realización de un análisis de geometría no lineal si las deformaciones son superiores a $1/20$ de la cota más grande de la pieza. Otro factor importante que se debe tener en cuenta es que en el caso de grandes deformaciones, la dirección de carga puede cambiar a medida que se deforma el modelo. La mayoría de los programas de MEF ofrecen dos opciones para responder a este cambio de dirección: carga de seguimiento y de no seguimiento.

Una carga de seguimiento mantiene su dirección en relación con el modelo deformado. Una carga de no seguimiento mantiene su dirección inicial

Los cambios de rigidez provocados por la forma pueden surgir también cuando las deformaciones son pequeñas, de manera que el equilibrio del sistema no se puede calcular sobre la configuración indeformada. El movimiento de los elementos del sistema altera las ecuaciones de equilibrio

En conclusión, además de lo comentado hasta el momento, la principal ventaja que presenta el análisis lineal frente al no lineal es que éste no requiere almacenar tanta cantidad de información como lo hace el análisis no lineal (puesto que la matriz de rigidez se calcula una única vez en el análisis lineal, mientras que en el no lineal se actualiza a cada paso de carga introducido) y por lo tanto utiliza la memoria con más moderación.

En los modelos analizados en este proyecto se sobrepasa el punto de fluencia de los materiales, por lo que las deformaciones son permanentes y no se puede asumir que los materiales estén trabajando en su zona elástica, por lo que debemos utilizar el tipo de análisis no lineal.

4.4 – Modelización y Análisis por Elementos Finitos

En el presente capítulo, se describe la modelización y el cálculo por elementos finitos realizados, considerando las diferentes propuestas de mejora. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en tensión y deformación de los modelos.

4.4.1 – Diseño Inicial. Modelización y cálculo del faldón del horno completo

El primer paso para determinar las causas del fallo de los faldones es la realización de un modelo con las mismas características que el real (mismas dimensiones, material, condiciones de trabajo... etc.), que es lo que llamaremos pre-procesado.

El primer modelo que se ha realizado es el correspondiente a la geometría del faldón del horno completo, incluyendo los perfiles de los pilares.

Para crear la geometría, la empresa ha puesto a nuestra disposición los planos de los hornos, de los cuales hemos podido obtener todas las medidas necesarias.

Con estas medidas, y tomando como referencia el centro de los ejes de coordenadas (0, 0, 0), se han ido creando todos los puntos necesarios para generar las curvas y superficies que definirán el modelo que necesitamos analizar (ver figuras 4.3, 4.4 y 4.5).

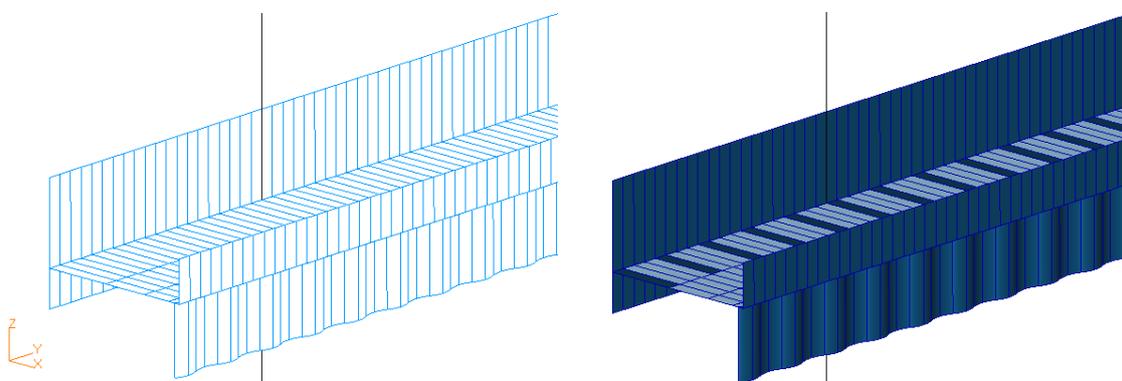


Figura 4. 3: Modelización de la geometría del faldón completo.

Hemos decidido que, debido a la proximidad con la realidad y para facilitar el cálculo, únicamente representaremos superficies 2D en lugar de sólidos 3D de tal forma que, una vez tengamos que mallar y asignar las propiedades de cada una de las partes del faldón, podamos utilizar la opción de elementos lámina, también llamados elementos superficie o elementos 2D.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.

Los elementos lámina se suelen utilizar para mallar estructuras formadas por partes cuyo espesor sea pequeño en comparación con las otras dos dimensiones y el desplazamiento transversal de la superficie media de la placa sea pequeño comparado con su espesor. Estos elementos trabajan a flexión, cortante y, además, soportan esfuerzos de membrana.

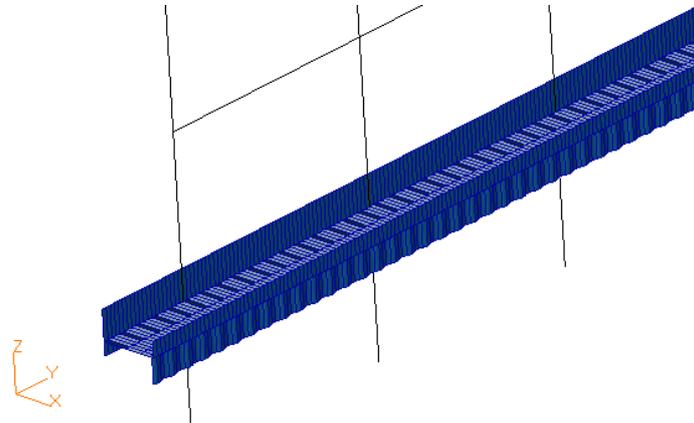


Figura 4. 4: Modelización final del faldón completo.

Se puede observar que la geometría del faldón sigue un patrón que se repite a lo largo de todo el horno, por lo que no será necesario definir todos los puntos, curvas y superficies de las que se compone, sino que podremos dibujar una parte significativa y repetirla las veces que sea necesario para completar todo el modelo.

Esto sólo sería completamente correcto en caso de que el patrón se repitiese a lo largo de una línea infinita, sin embargo esto no es así por lo que crear el horno según los patrones mencionados, implicaría cierto error a la hora del cálculo por elementos finitos, ya que ciertas partes del horno terminan en extremo libre y otras se unen a otras partes del faldón haciendo una esquina. Por lo tanto, despreciaremos los posibles efectos debidos a este cambio de orientación del material en la zona de las esquinas, suponiendo que tenemos una parte del faldón lo suficientemente larga (18 m) como para que los posibles errores obtenidos en estas zonas sean considerables.

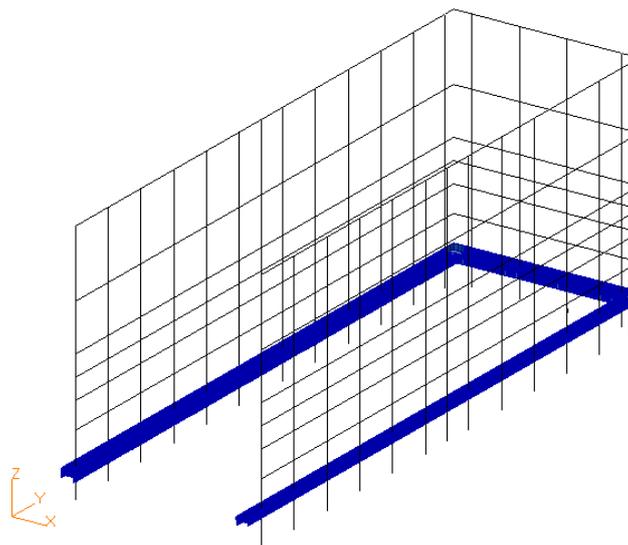


Figura 4. 5: Modelo completo del faldón

Otro detalle que debemos considerar es que, al crear la geometría, debemos dividir las superficies en otras más pequeñas de manera que en el momento de generar la malla, ésta sea lo más fina posible y, además, se nos facilite la asignación de las propiedades.

Mallado

Una vez definida la geometría, el siguiente paso es crear la **malla**, es decir, dividir las superficies en elementos finitos. En la interfaz de mallado, figura 4.6, debemos seleccionar todas las superficies que deseamos discretizar en elementos finitos. En nuestro caso, queremos conocer el comportamiento de todo el modelo, por lo tanto tendremos que seleccionar todas las superficies.

Una vez seleccionada toda la geometría, debemos introducir dos parámetros:

Tipo de Elemento (*Element Type*): El software con el que trabajamos incluye dos topologías de elementos lámina isoparamétricos (utilizan las mismas funciones de interpolación para obtener el campo de tensiones y desplazamientos): triángulos y cuadriláteros.

Para este caso, elegiremos como elemento un cuadrilátero isoparamétrico de 4 nodos, que soporta deformación plana y cargas de flexión y cortante. Además se comporta bien con mallas irregulares, aunque se obtienen buenos resultados con ángulos entre caras de hasta un máximo de 45 grados.

Tamaño de Elemento (*Global Edge Length*): Una vez definido el tipo de elemento, debemos determinar el tamaño del mismo, esto es, las dimensiones que deseamos que tenga. El tamaño de elemento influirá una vez realizado el análisis, puesto que cuanto más fina sea la malla, más exactos serán los resultados obtenidos en cuanto a deformaciones y tensiones. Además, tendremos que tener en cuenta el tiempo de cálculo, que aumenta a medida que disminuimos el tamaño de elemento, por lo que es conveniente tener en cuenta este factor limitante y buscar un compromiso entre el tiempo de cálculo y la precisión del análisis.

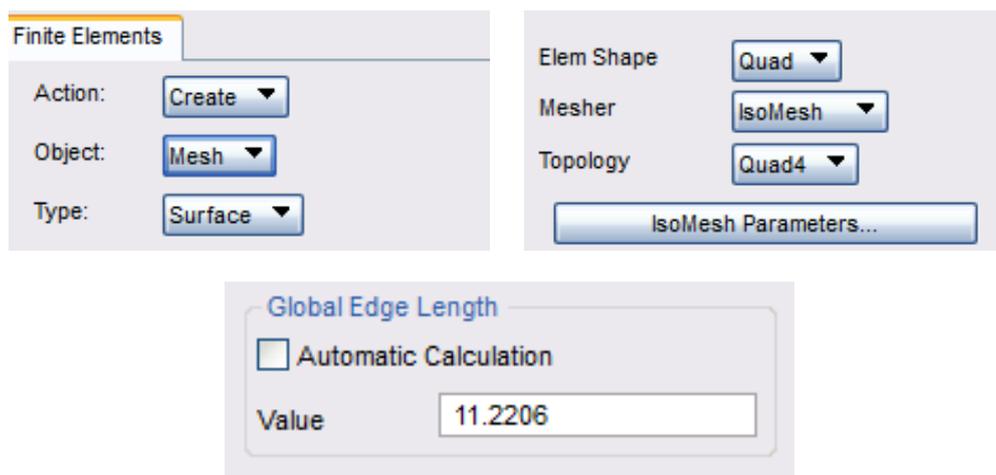


Figura 4.6: Ventanas de Introducción de Tipo y Tamaño de Elementos Finitos

Para este caso, definiremos un tamaño de elemento de aproximadamente 1 cm (11.2206 mm).

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.

Cuando se han establecido tanto el tipo de elemento como el tamaño del mismo, se procede a la unificación de la malla, puesto que el software utilizado es incapaz de asociar directamente elementos colindantes pertenecientes a superficies distintas.

Esto se consigue mediante la opción **Equivalence**, en la cual podemos definir una tolerancia y los nodos a excluir en el caso de querer evitar la unión de ciertas superficies. En la figura 4.7 se observa la unificación de los nodos tras este paso.

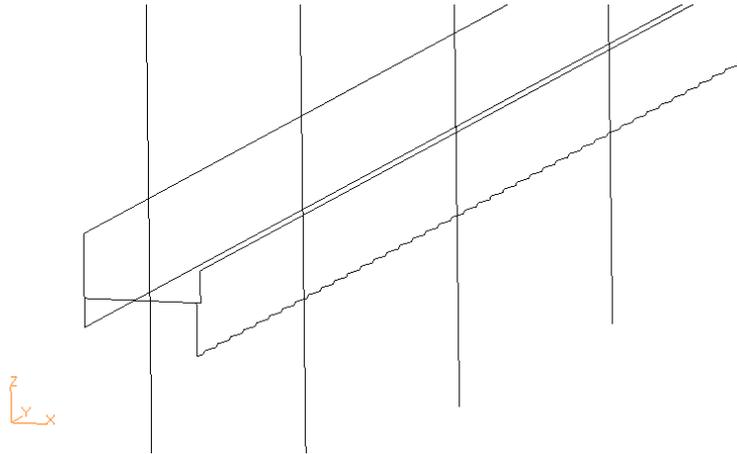


Figura 4.7: Visualización de la unificación de nodos en el faldón completo

Asignación de Propiedades

Las propiedades pueden ser asignadas a uno o varios elementos de la geometría (punto, curva, superficie, sólido...) o bien a uno o varios elementos de la malla.

En nuestro caso tendremos que asignar las propiedades, dependiendo del modelo con el que estemos trabajando, tanto en superficies y curvas de la geometría como en elementos de la malla.

Antes de introducir las propiedades, debemos crear el material. Para la creación del material debemos determinar si necesitaremos un material lineal, es decir, un material que asume la deformación proporcional a la tensión aplicada, o bien un material elastoplástico, que, además de la región de tensión-deformación proporcional y lineal, tiene en cuenta el límite de fluencia, tensión máxima a partir de la cual el material deja de comportarse como lineal y elástico y pasa a tener un comportamiento plástico.

En este caso tendremos que crear dos materiales, el acero inoxidable AISI 304 y el acero al carbono S-235-JR, introduciendo las propiedades correspondientes y ya descritas con anterioridad. En las figura 4.8 y 4.9 se pueden ver las ventanas de comandos donde se introducen todas las características mecánicas para el acero S-235-JR.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.*

La creación del AISI304 seguiría el mismo esquema.

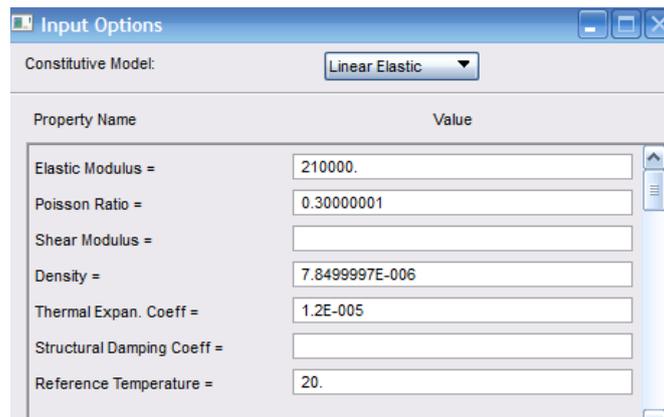


Figura 4. 8: Introducción de las propiedades mecánicas del material.

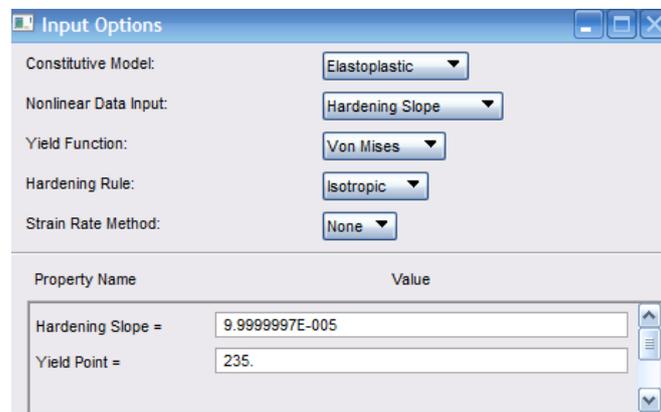


Figura 4. 9: Ventana de introducción del tipo de material (lineal o no lineal).

Una vez descrito el método de introducción de las características del material, se explica el método de introducción de estas propiedades según el tipo de elemento al que se aplicarán las mismas.

Superficie: Debido a que estamos trabajando con elementos lámina, la asignación de las propiedades implica la introducción del material, previamente creado, y el espesor de la superficie, como se muestra en la figura 4.10.

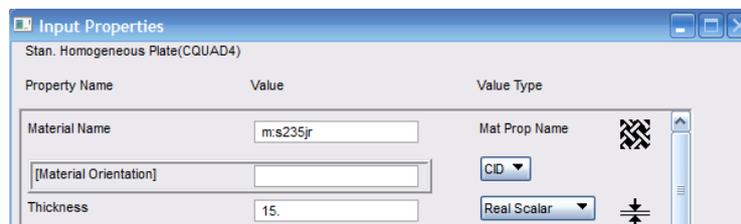


Figura 4. 10: Asignación del material y espesor a la geometría correspondiente.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.*

Posteriormente, el software asocia las propiedades de estas superficies a los elementos de la malla correspondiente, lo que es una ventaja a la hora de refinar la malla puesto que, aunque los elementos cambian, las propiedades se mantienen asociadas. En el caso de tener que asignar propiedades a elementos de la malla, se procedería de la misma forma.

Línea/Curva: Las curvas que se encuentran en nuestro modelo se corresponden con perfiles de vigas y correas, de manera que debemos introducir, además del material, la sección del perfil (figura 4.12) y su orientación (figura 4.11).

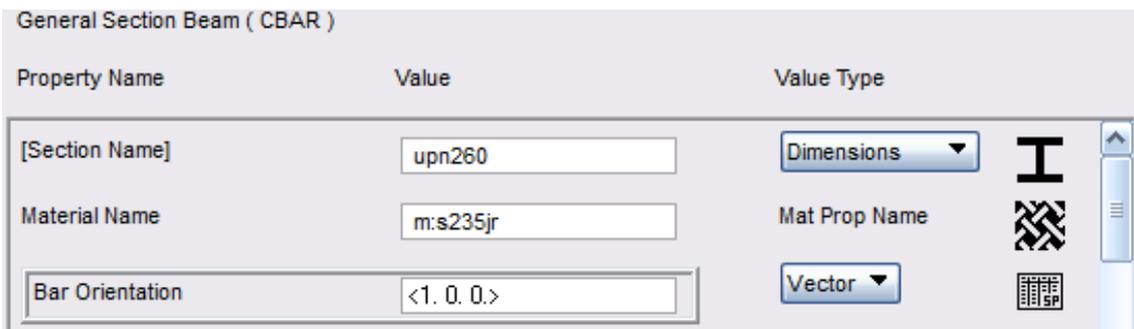


Figura 4. 11: Asignación del material, sección y orientación de la propiedad de los elementos línea/curva.

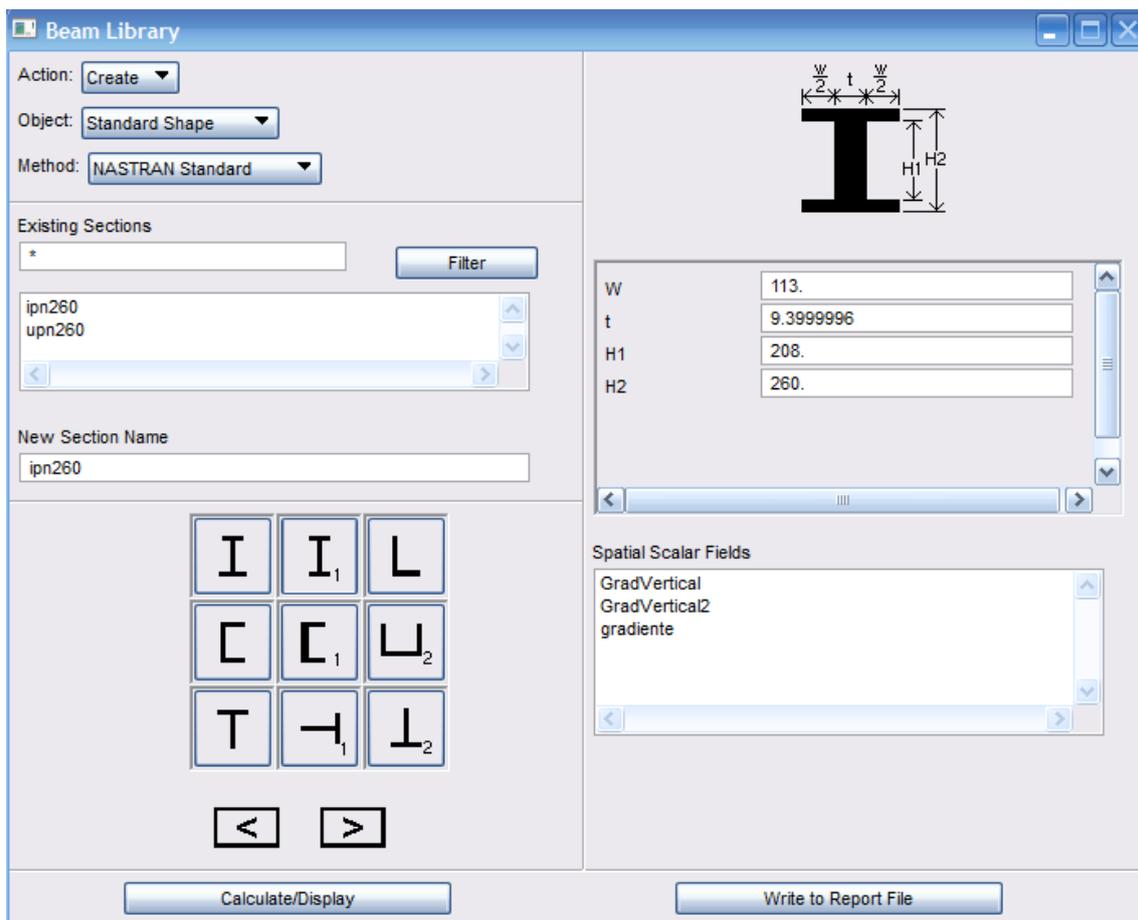


Figura 4. 12: Creación del tipo de sección de propiedades para elementos línea.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.*

Una vez creadas las propiedades, se asignarán a cada curva o superficie correspondientes de la geometría. El resultado se puede ver en la figura 4.13, en la cual se representan las diferentes propiedades del modelo según la leyenda de colores.

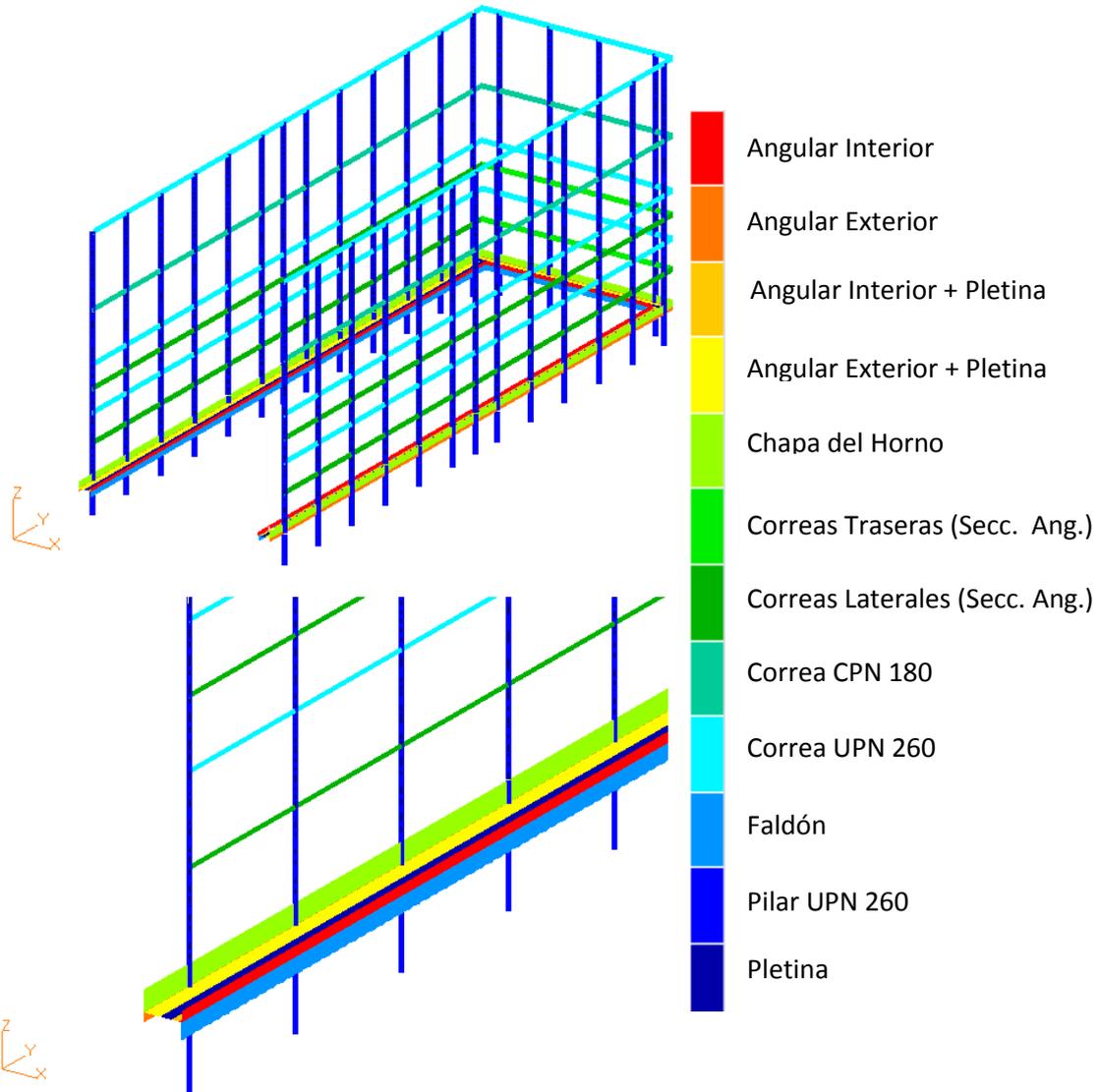


Figura 4. 13: Representación de las distintas propiedades asignadas al modelo del faldón completo.

Introducción de cargas e imposición de condiciones de contorno.

Una vez se ha creado, mallado y asignado los materiales y propiedades correspondientes a la geometría, debemos introducir las cargas aplicadas sobre el modelo y las **restricciones de movimiento** de la estructura.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.*

El faldón no está sometido a ningún tipo de carga o fuerza más allá del peso propio, que se desprecia, y el peso de los ladrillos refractarios que se apoyan sobre él.

Debido a que estos ladrillos están distribuidos y apoyados en distintas alturas, el faldón soporta únicamente el peso de la altura inferior. Esto supone una baja carga sobre el faldón (alrededor de los 2 MPa) por lo que, de la misma forma que ocurre con el peso propio, también se desprecia.

Aclarado esto, la única carga que actuará sobre el faldón será una carga térmica que vendrá determinada por una serie de **gradientes**, verticales y horizontales, calculados a partir de las mediciones y toma de datos experimentales y que ya se han descrito con anterioridad.

Las restricciones de movimiento que se deberán aplicar al modelo serán las correspondientes a la unión entre los pilares y las cimentaciones. Ésta se hará mediante un empotramiento, por lo que los desplazamientos y giros de estos nudos estarán restringidos en las tres direcciones del espacio.

Análisis mediante el método de los elementos finitos

En primer lugar, se hará un análisis lineal del modelo, que como se ha comentado con anterioridad, está formado por la estructura del faldón, 30 pilares y 18 correas, por lo que se necesitan **11434 elementos lámina** y **323 elementos unidimensionales** (correspondientes a los pilares y correas de la estructura del horno) para generar la geometría que, una vez mallada, da lugar a un modelo con un total de 55164 elementos finitos.

Un análisis lineal calcula las tensiones y deformaciones de la geometría basándose en tres supuestos:

- La estructura con la carga actuante aplicada se deforma con **pequeños giros y desplazamientos**.
- La carga aplicada es **estática** (es decir, no se consideran las fuerzas de inercia ni las fuerzas de amortiguamiento y siempre en la misma dirección) y sin variación temporal.
- El material tiene una relación **Tensión-Deformación lineal**. Esto implica que el análisis no tiene en cuenta ni el límite de fluencia ni el de rotura, por lo que los resultados alcanzarán tensiones por encima de los valores reales. Este análisis se considera una primera aproximación del comportamiento real de la estructura.

Para realizar este análisis, es necesario introducir una serie de parámetros requeridos por el software, algunos serán asignados por defecto según el tipo de análisis, y otros serán introducidos por el usuario.

El parámetro a introducir más significativo es la **temperatura por defecto**, es decir, el valor de la temperatura ambiente a la que se encontraría el faldón si no se le hubiese aplicado ningún tipo de carga térmica. En nuestro caso consideraremos 20 °C.

Obtención de Resultados

Una vez realizado el análisis lineal estático del modelo del horno completo, podemos observar en las figuras 4.14 y 4.15 que el valor de las tensiones es muy elevado. Bajo la hipótesis de comportamiento lineal, en la mayor parte del faldón del horno se superan tensiones de alrededor de los **700 MPa**, valor que supera con creces el límite de fluencia del material, lo que nos indica las zonas más solicitadas y la necesidad de introducir un comportamiento de los materiales más realista, que se consigue mediante la aplicación de un análisis no lineal.

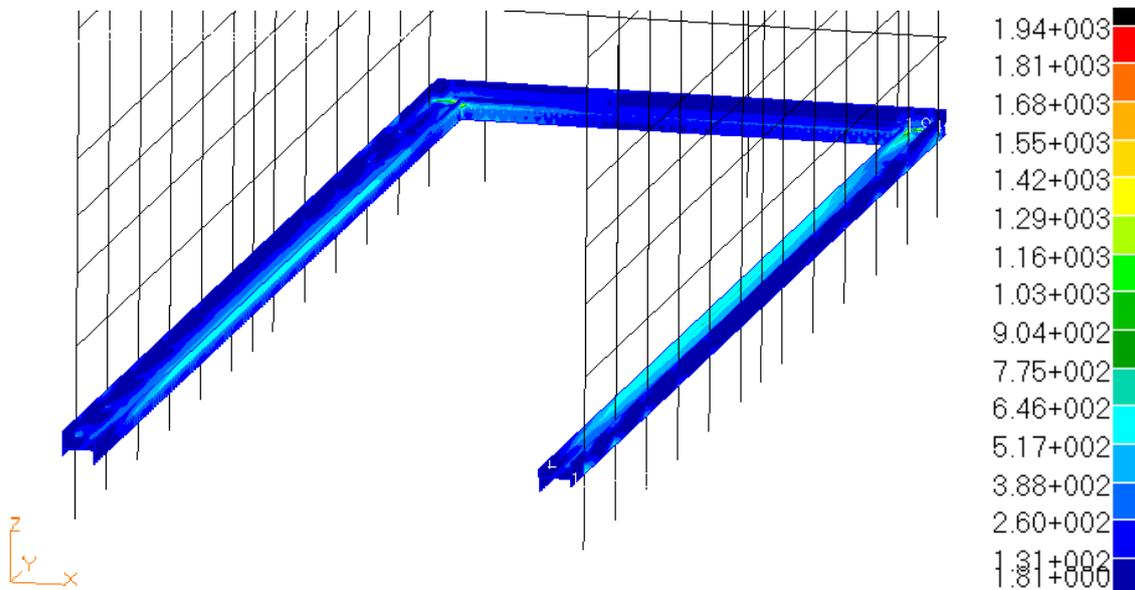


Figura 4. 14: Campo de tensiones de Von Mises [MPa] obtenidas tras el análisis lineal del faldón completo.

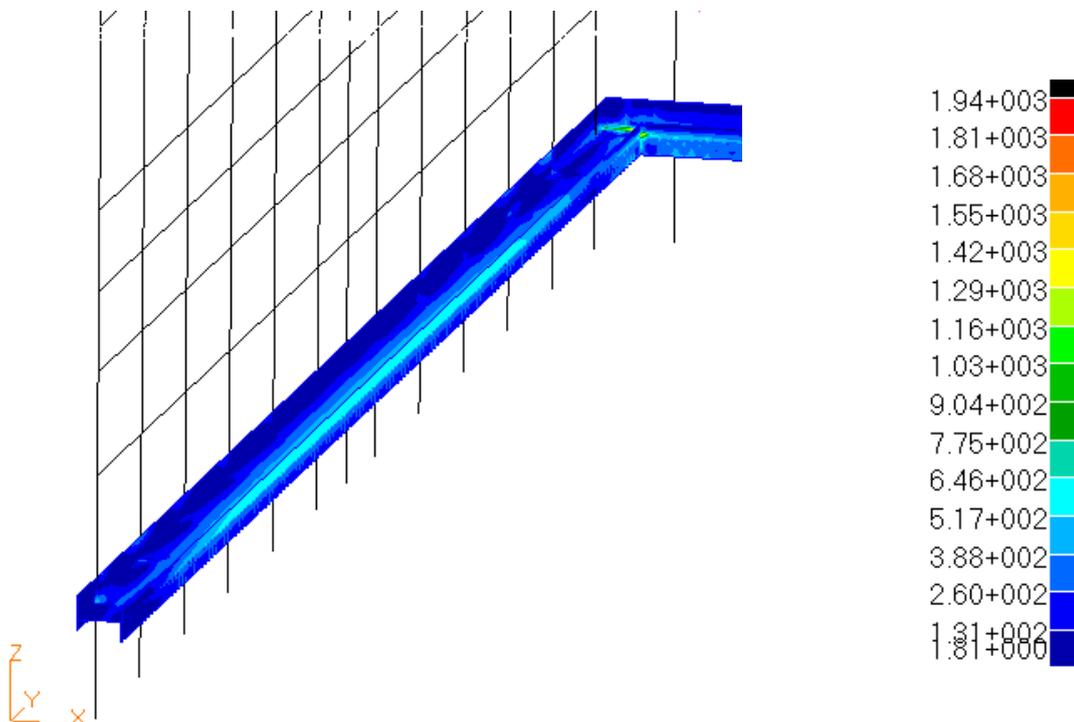


Figura 4. 15: Detalle del campo de tensiones de Von Mises [MPa] del faldón completo.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo del faldón del horno completo.*

Analizando el campo de desplazamientos mostrado en la figura 4.16, observamos que la mayor parte del faldón se desplaza de su posición inicial una distancia de entre 0 y 5 mm, exceptuando los extremos y esquinas, donde la deformación es mayor.

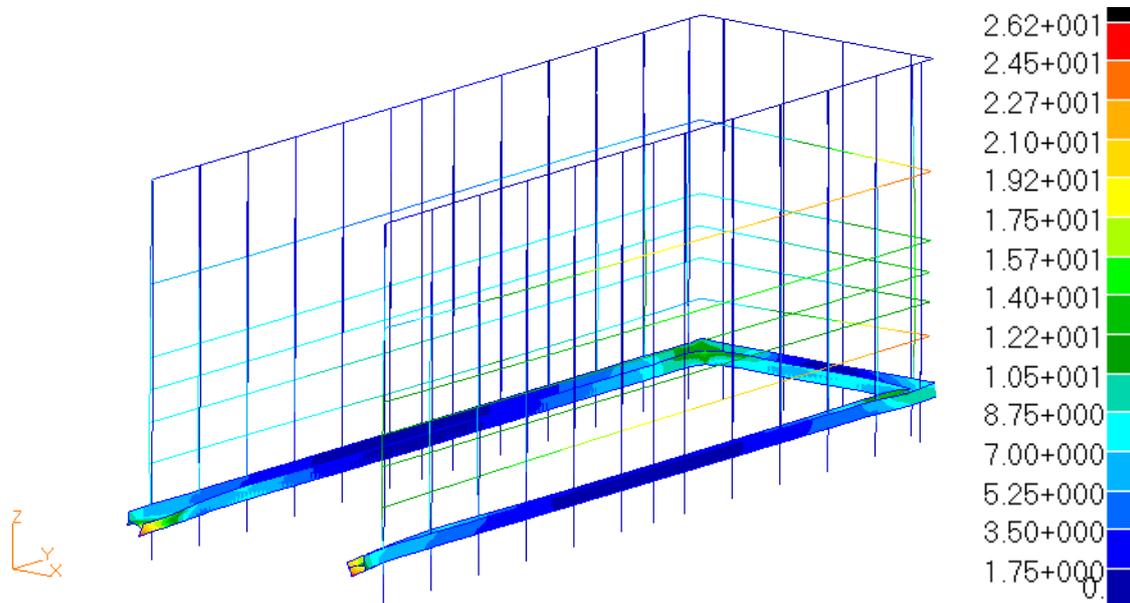


Figura 4. 16: Estructura deformada y desplazamientos [mm] obtenidos tras el análisis lineal del faldón completo.

Se observa que en la zona intermedia del faldón, las tensiones son prácticamente iguales en cada tramo existente entre pilares.

Por este motivo, y debido a que la distribución de pilares sigue un patrón que se repite a lo largo de los laterales del faldón y éstos son lo suficientemente largos (18 metros), podremos analizar una subestructura del mismo y considerarla representativa del modelo completo para estudiar la rotura de los faldones.

Esta subestructura será un tramo de faldón de 1236 mm, que incluirá un pilar y las vigas de arriostramiento correspondientes. Se elige un tramo de la zona intermedia para evitar las concentraciones de tensiones que surgen en las esquinas y las irregularidades en las deformaciones de los extremos libres.

4.4.2 – Diseño Inicial. Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.

Para realizar un análisis más ajustado a la realidad, tomaremos un tramo de faldón como el que se muestra en la figura 4.17, al cual le aplicaremos el método de los elementos finitos para el cálculo de tensiones y deformaciones teniendo en cuenta las condiciones de simetría de los extremos.

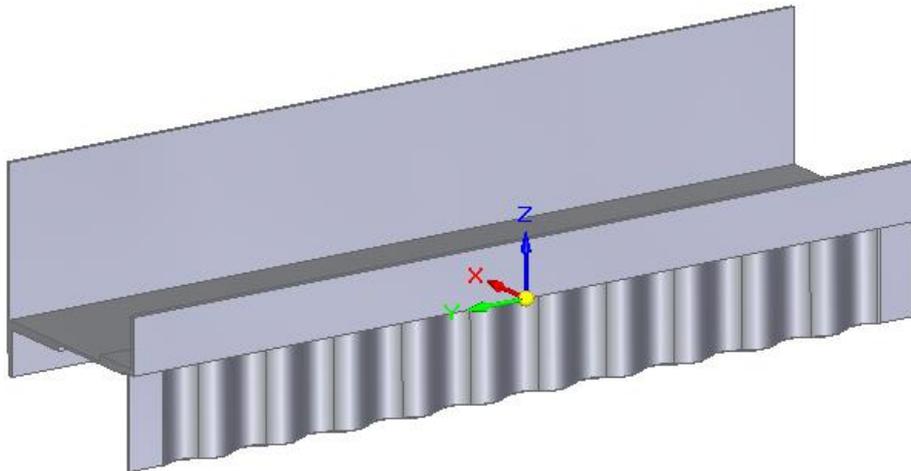


Figura 4. 17: Subestructura de faldón.

La subestructura elegida para el análisis incluye un pilar, situado en el plano medio. Sin embargo, para conseguir un modelo más simple, no representaremos gráficamente este pilar, por lo que tendremos que sustituir esta geometría por las restricciones proporcionadas por el mismo. Ésto nos permitirá simular igualmente las condiciones de contorno reales del faldón y el comportamiento del faldón.

Siguiendo los pasos ya descritos para la modelización del horno completo, el primer paso es la creación de la **geometría** (ver figura 4.18).

De nuevo se dividen las superficies para facilitar el mallado y que la asignación de propiedades sea lo más sencilla posible.

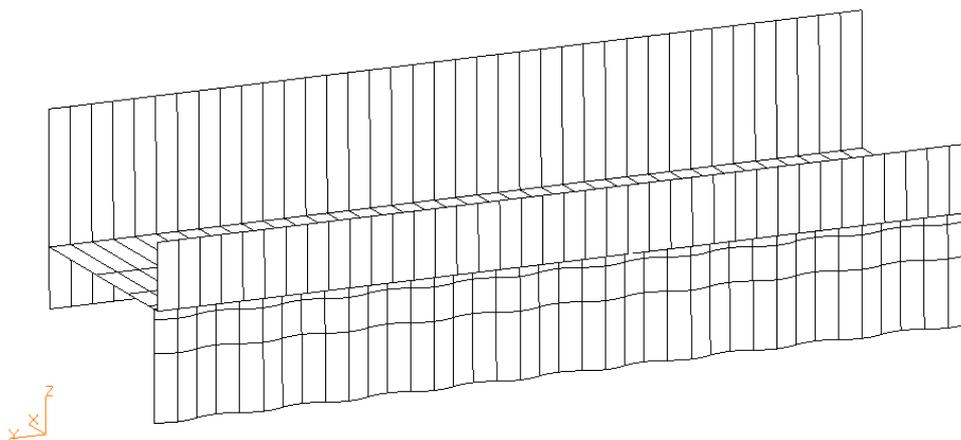


Figura 4. 18: Creación de la geometría de la subestructura de faldón.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.*

Para realizar el **mallado**, representado en la figura 4.19, se han utilizado elementos QUAD y un tamaño de elemento de aproximadamente 1 cm (11,2296 mm).

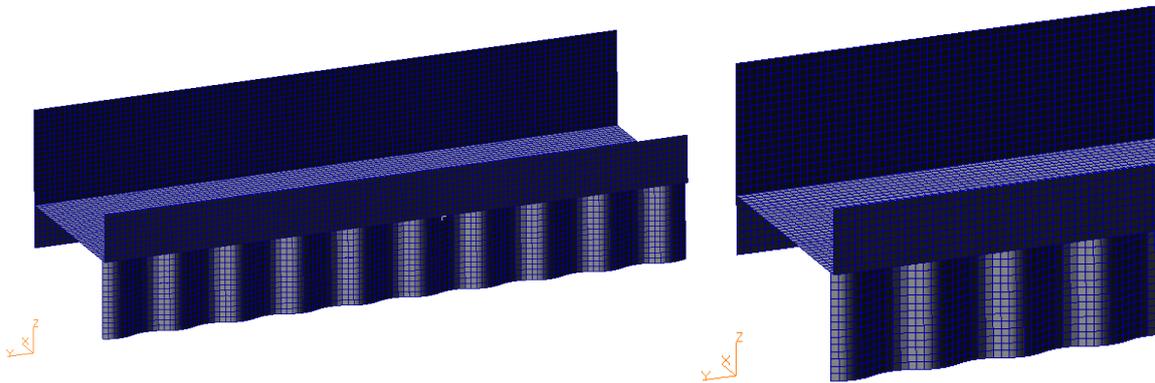


Figura 4. 19: Mallado de la geometría de la subestructura del faldón.

Una vez creada la malla, asignamos las propiedades y los materiales a cada superficie del modelo de la misma forma que habíamos hecho con el faldón del horno completo y definimos la carga de temperatura aplicada, que también serían las mismas que las introducidas en el modelo anterior, así como las restricciones de movimiento y condiciones de contorno.

En este caso, al no haber representado el pilar que sujetaría este tramo de faldón, tendremos que colocar restricciones, representadas en la figura 4.20, de translación en las direcciones **X**, **Y** y **Z** y rotación libre en la geometría asociada a este elemento estructural. Por otra parte, en los extremos del tramo se restringen los movimientos de translación en la dirección **Y**, mientras que las rotaciones se limitarán para los ejes **X** y **Z**. De esta forma simulamos la continuidad del faldón en cada uno de los extremos.

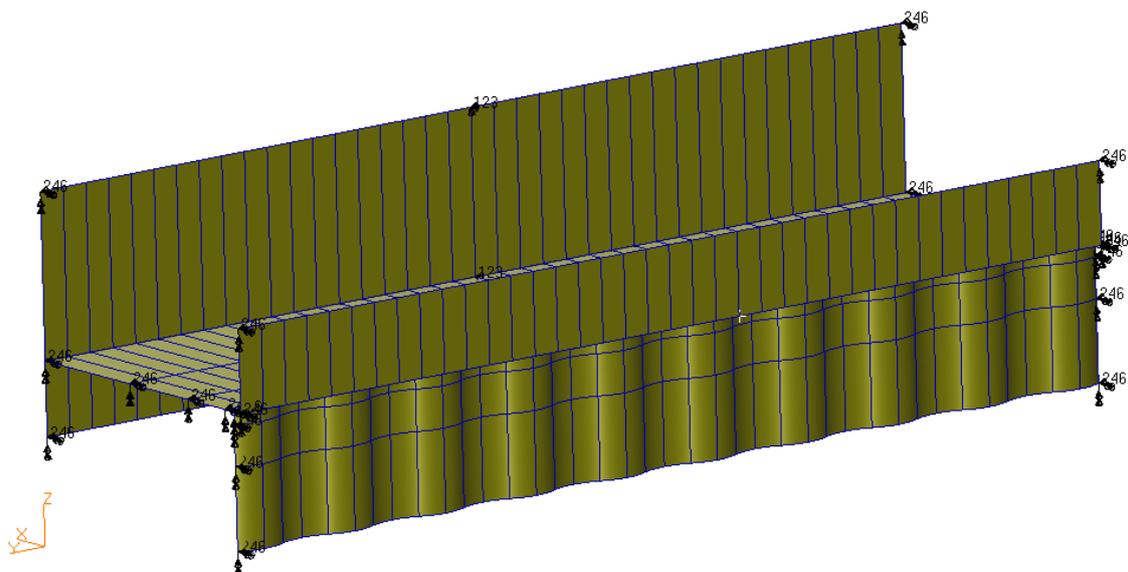


Figura 4. 20: Restricciones de movimiento en la subestructura del faldón.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.*

Patran representa las restricciones de translación y giro con una correspondencia numérica, de tal forma que:

- 1: Translación en el eje X
- 2: Translación en el eje Y
- 3: Translación en el eje Z
- 4: Rotación alrededor del eje X
- 5: Rotación alrededor del eje Y
- 6: Rotación alrededor del eje Z

Una vez realizado el pre-procesado del modelo de estudio actual, procedemos a definir los distintos análisis por elementos finitos que se han realizado.

En primer lugar, se ha realizado un análisis lineal que, como bien se ha descrito en apartados anteriores, se caracteriza por calcular las tensiones y deformaciones basándose en que la estructura se deforma con pequeños giros y desplazamientos, que la carga aplicada es estática y constante en el tiempo, que la relación entre la tensión y la deformación es lineal y que no se tiene en cuenta ni el límite de fluencia ni el de rotura.

Los límites de fluencia de los materiales que conforman este modelo se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4. 1: Límites de fluencia para los materiales de la subestructura de faldón.

| Límite de Fluencia a la Tª de funcionamiento media (300 °C) | |
|--|---------|
| S235JR | 235 MPa |
| AISI304 | 140 MPa |

Los resultados obtenidos para este tipo de análisis son los mostrados en la figura 4.21:

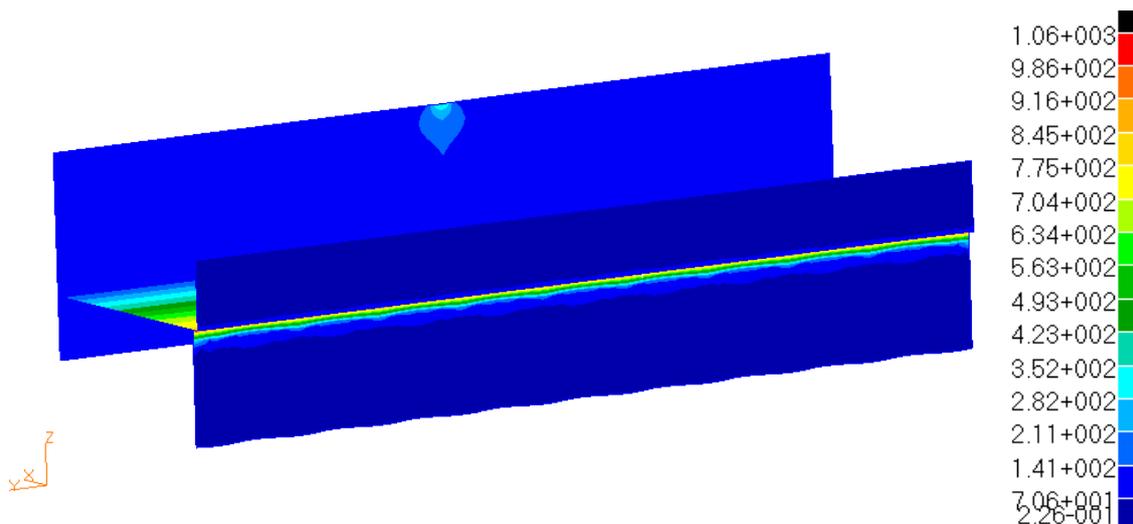


Figura 4. 21: Tensiones de Von Mises [MPa] obtenidas en el análisis lineal de la subestructura de faldón

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.*

De la misma forma que ocurría en el caso del análisis del faldón correspondiente al horno completo, las tensiones se disparan y superan el límite de fluencia del material con mucha diferencia, por lo que los resultados obtenidos de este análisis lineal no se ajustan al comportamiento realista del sistema y consecuentemente deberemos realizar un análisis no lineal.

Hasta el momento, realizando un análisis lineal asumíamos que el cambio de rigidez del material era lo suficientemente pequeño como para considerar que ni las propiedades de la forma ni las del material cambiarían durante el proceso de carga y deformación, lo que simplificaba enormemente la formulación del problema y su solución.

Sin embargo, ahora se procede a un análisis no lineal considerando las no linealidades geométricas y del material del modelo. Como bien se ha mencionado en el capítulo 4.3, este tipo de análisis requiere abandonar la idea de rigidez constante, por lo que la rigidez variará durante el proceso de deformación y la matriz de rigidez deberá actualizarse, ya que la solución no lineal progresa a través de un proceso iterativo.

Por defecto, Patran nos da la opción de realizar un análisis no lineal con no linealidad geométrica mediante la selección de las opciones “Large displacements/Grandes desplazamientos” y “Follower Forces/Carga de Seguimiento” en la pestaña que se muestra en la figura 4.22, que nos permite elegir los parámetros del análisis.

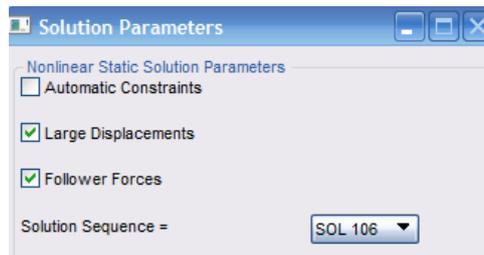


Figura 4. 22: Introducción de parámetros de análisis no lineales para la subestructura de faldón.

Por otra parte, para definir la no linealidad del material, Patran nos da la oportunidad de crear un material no lineal según distintos modelos.

Utilizaremos un material no lineal definido como elastoplástico con comportamiento bilineal, para el cual debemos introducir, además de la pendiente de la zona plástica de este modelo, la tensión de fluencia de los materiales utilizados (ver figura 4.23).

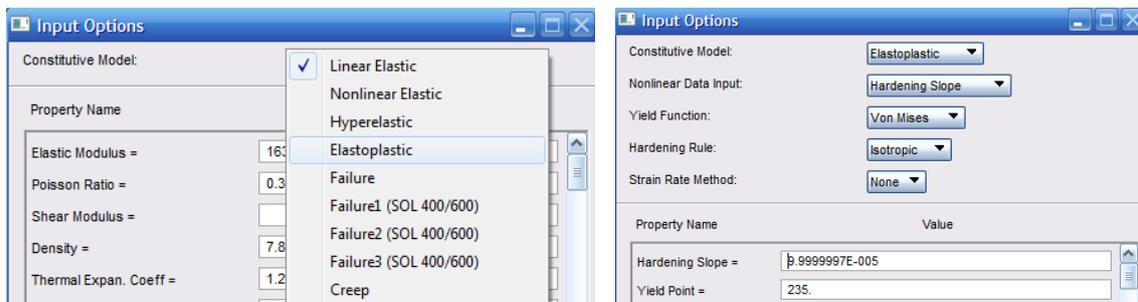


Figura 4. 23: Introducción de propiedades del material no lineal para la subestructura de faldón.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.*

Una vez introducidas las no linealidades, tanto geométricas como del material, en el modelo actual, definiremos el resto de parámetros necesarios.

Se realiza un análisis no lineal estático y se introducen el número de incrementos en los que queremos dividir la carga aplicada, el número de iteraciones para actualizar la matriz de rigidez y los criterios de convergencia indicando los parámetros que serán importantes a la hora de obtener la solución del modelo.

En este caso concreto, se nos han presentado problemas para llegar a la solución, por lo que se han aumentado las iteraciones de actualización de la matriz de rigidez respecto de las que impone por defecto el programa y se han establecido tolerancias de error en desplazamiento, carga y energía, indicadas en la tabla 4.1, que conducen a una solución precisa y eficiente.

Tabla 4. 2: Parámetros de convergencia para el análisis no lineal de la subestructura.

| Parámetros de convergencia | Valor |
|---|--------------|
| Incrementos de Carga | 100 |
| Iteraciones por actualización de la matriz | 5 |
| Iteraciones máximas permitidas | 25 |
| Tolerancia en desplazamientos | 0.1 |
| Tolerancia en carga aplicada | 0.1 |
| Tolerancia en energía | 0.1 |

Una vez realizado el análisis, procedemos al estudio de los resultados obtenidos. Para ello tendremos que tener en cuenta que la distribución de tensiones y desplazamientos no es exactamente simétrica debido a que las curvaturas de las ondulaciones del faldón en los extremos tampoco lo son.

Las dilataciones debidas al incremento de temperatura provocan una deformación en el faldón que genera elevadas tensiones tanto en el zambullidor, en contacto con la junta de agua, como en los angulares, pletina y chapa del horno. En la figura 4.24 se puede ver en detalle la distribución de tensiones a lo largo del faldón.

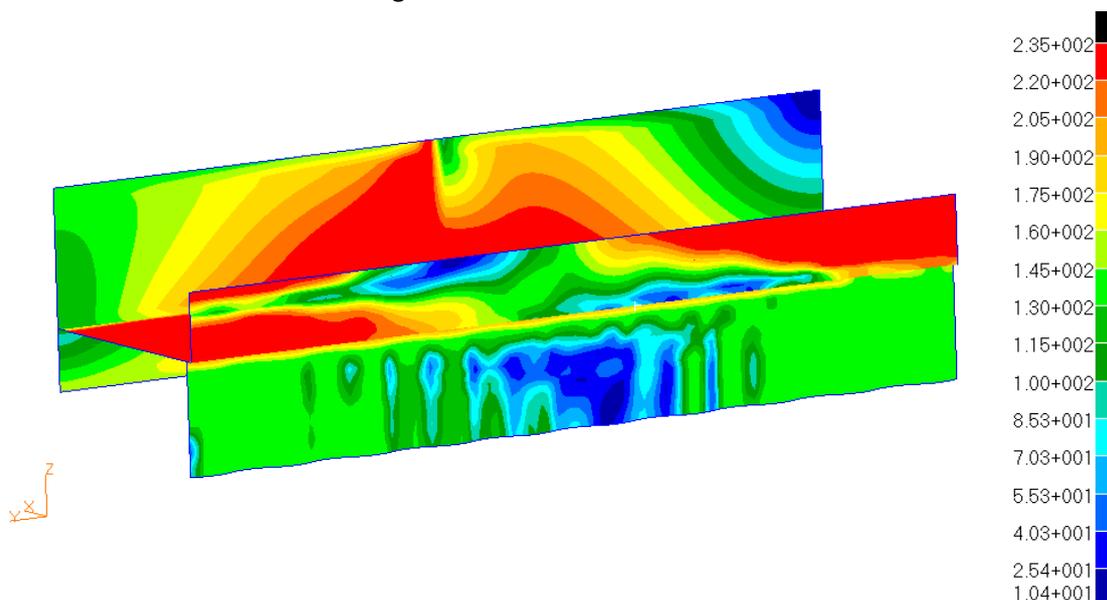


Figura 4. 24: Campo de tensiones de Von Mises [MPa] en la subestructura de faldón.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Modelización y cálculo de una subestructura de faldón.*

Los límites de fluencia, 235 MPa para el S235JR (de color rojo en el rango de tensiones) y 140 MPa para el AISI304 (representado en color verde), se superan en la mayor parte de la estructura, provocando la plastificación del material y su posterior fallo y rotura.

En la figura 4.25 podemos observar el mapa de colores correspondientes a los desplazamientos resultantes de cada punto de la estructura, que varían entre los 2 mm y los 30 mm, así como las zonas que, debido a la simetría y restricción de desplazamiento impuesta por el pilar, apenas sufren desplazamiento alguno (en azul oscuro).

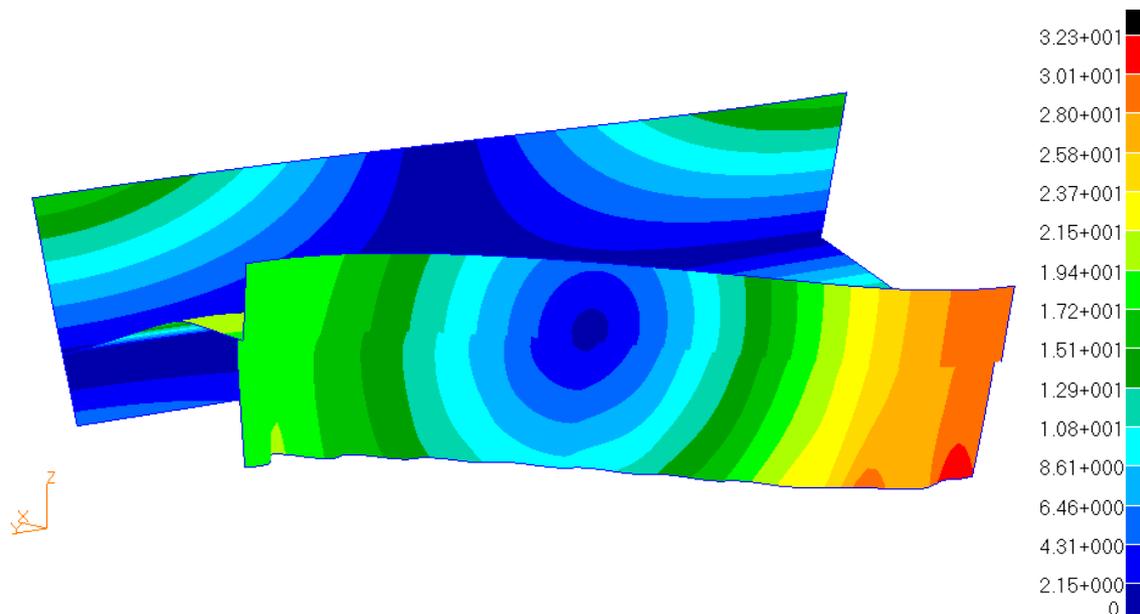


Figura 4. 25: Deformada y campo de desplazamientos resultante en la subestructura de faldón [mm].

En cuanto a los desplazamientos en la dirección longitudinal del faldón, es decir, en la dirección Y, éstos alcanzan aproximadamente los 10 mm y se muestran en la figura 4.26.

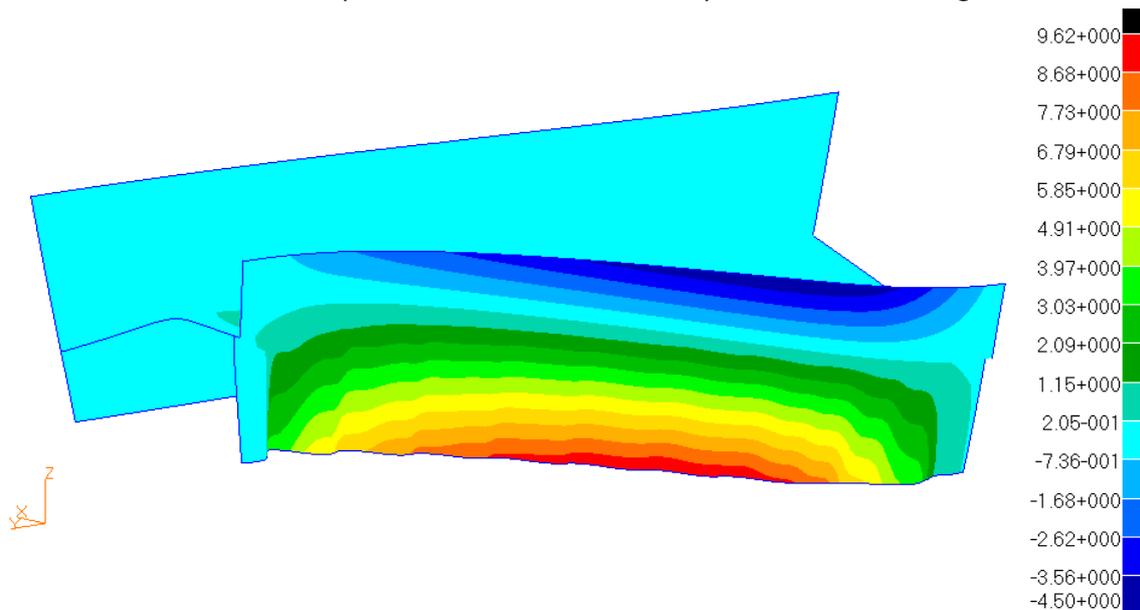


Figura 4.26: Deformada y campo de desplazamientos [mm] en la dirección Y de la subestructura del faldón

4.4.3 - Introducción de mejoras de diseño.

Debido a las altas tensiones y deformaciones que aparecen en el faldón, por las cuales se produce el fallo y rotura del mismo, se ha intentado buscar solución a este problema mediante la introducción de elementos estructurales que permitan absorber los desplazamientos provocados por las dilataciones del material, causadas por el incremento de temperatura, y por lo tanto reducir la tensión resultante a lo largo del faldón.

Se ha estado trabajando en dos tipos de mejoras, de diseño y de materiales, que se describirán y desarrollarán a lo largo del punto actual, 4.4.3, y punto 4.4.4.

Se proponen diferentes geometrías para los elementos dilatadores instalados actualmente, se realiza su modelización tridimensional y análisis por elementos finitos.

Posteriormente y a la vista de los resultados de los análisis de todas las propuestas, se hará una comparación, se elegirán los modelos que trabajen mejor bajo las condiciones impuestas y se instalarán en los hornos de solera móvil de la planta de SGL Carbon S.A., de manera que podremos verificar experimentalmente si el funcionamiento calculado y esperado de estos modelos se corresponde con el funcionamiento real.

4.4.3.1 - Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

La primera mejora introducida es el elemento dilatador que se muestra en la figura 4.27. En la imagen se puede ver el hueco de la pared de ladrillos refractarios del horno que es necesario realizar para su instalación y que, posteriormente, se rellenará de nuevo de este material para conseguir aislar el cuerpo del dilatador.



Figura 4. 27: Dilatador.

El objetivo de esta pieza es conseguir que los desplazamientos longitudinales, sufridos por el faldón debidos al incremento de temperatura al que se somete durante el proceso de cocción, sean absorbidos y eviten el incremento de tensiones a lo largo del mismo y su consecuente rotura. Este dilatador consta de dos piezas, el cuerpo del dilatador, que será el encargado de la absorción de las dilataciones, y una tapa, que irá soldada al cuerpo del dilatador, introducida en la junta de agua y permitirá seguir manteniendo la estanqueidad en el interior del horno. En la figura 4.28 se representa una subestructura de faldón en la cual se ha instalado uno de estos dilatadores.

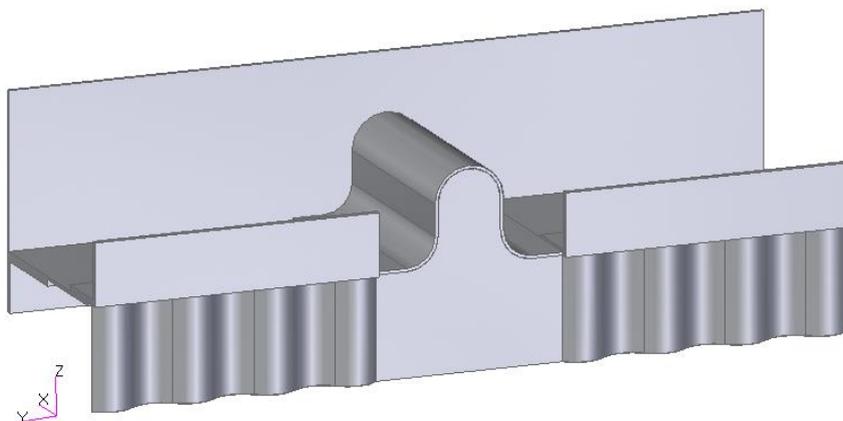


Figura 4. 28: Diseño 1 instalado sobre subestructura de faldón

Para conocer la respuesta de esta mejora, se ha realizado un análisis no lineal que, de la misma forma que ocurría en los análisis anteriores, nos permita asumir la no linealidad geométrica y

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

la no linealidad y el límite de fluencia de los distintos materiales. Así mismo, se ha modelado en Patran esta primera mejora introducida ya en el faldón.

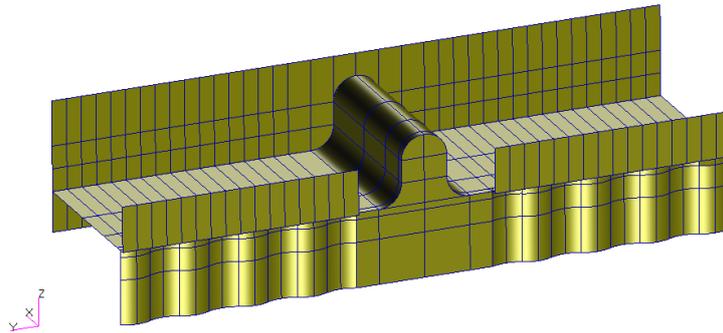


Figura 4. 29: Creación de la geometría del Diseño 1.

La geometría y las particiones de las superficies se realizan de la misma forma que en los modelos anteriores.

De nuevo, las superficies se mallarán con elementos QUAD, de tamaño 11,2206 mm. En la figura 4.30 se puede ver en detalle la malla sobre el faldón y el elemento dilatador.

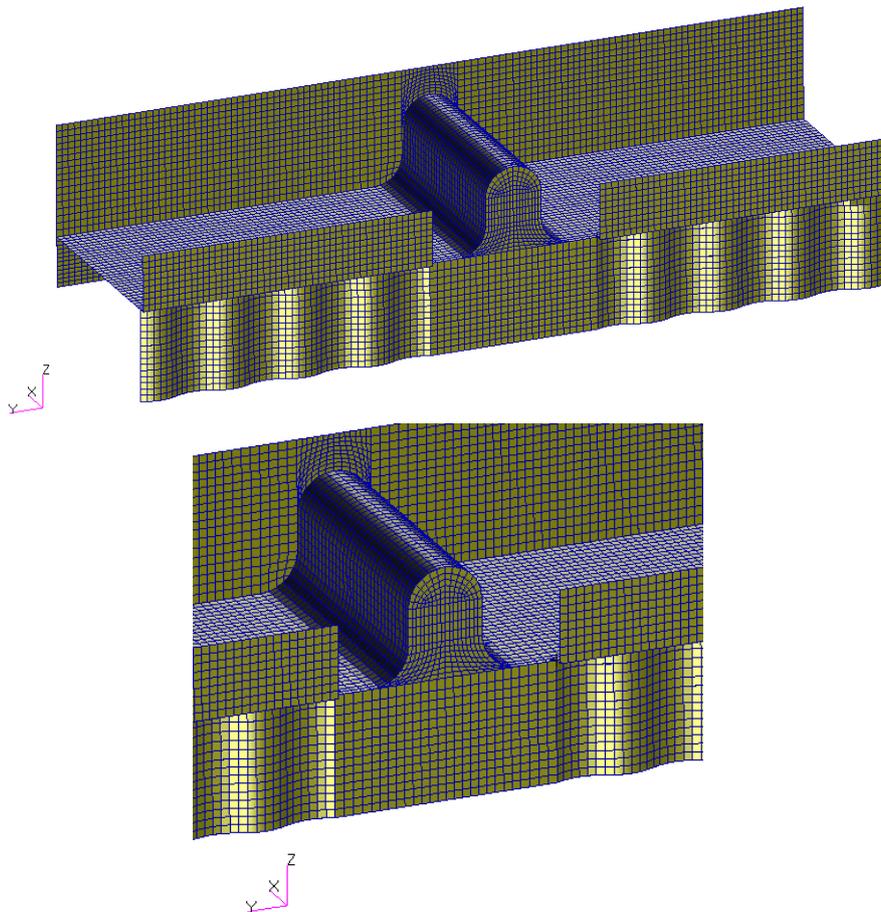


Figura 4. 30: Mallado de la geometría del Diseño 1.

El material correspondiente tanto al dilatador como a la tapa de éste, será el mismo acero inoxidable refractario que el del zambullidor, un AISI 304.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

La asignación de propiedades, restricciones de movimiento y condiciones de funcionamiento, carga térmica y gradientes aplicados, también serán las mismas que las introducidas en modelos anteriores.

En el caso concreto de este modelo, al ejecutar el análisis no lineal, hemos tenido problemas de convergencia, por lo que se han establecido los parámetros recogidos en la tabla 4.3:

Tabla 4. 3: Parámetros de convergencia de la malla para el modelo del Diseño 1.

| Parámetros de convergencia | Valor |
|--|-------|
| Incrementos de Carga | 100 |
| Iteraciones por actualización de la matriz | 35 |
| Iteraciones máximas permitidas | 40 |
| Tolerancia en desplazamientos | 0.01 |
| Tolerancia en carga aplicada | 0.01 |
| Tolerancia en energía | 0.01 |

Una vez realizado el análisis, procedemos al estudio de los resultados obtenidos. Para ello volvemos a recordar, en la tabla 4.4, las tensiones a partir de las cuales los materiales dejan de tener un comportamiento lineal y elástico y por lo tanto fallarán:

Tabla 4. 4: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 1.

| Límite de Fluencia a la Tª de funcionamiento media (300 °C) | |
|---|---------|
| S235JR | 235 MPa |
| AISI304 | 140 MPa |

De esta forma, se obtienen las tensiones mostradas en la figura 4.31:

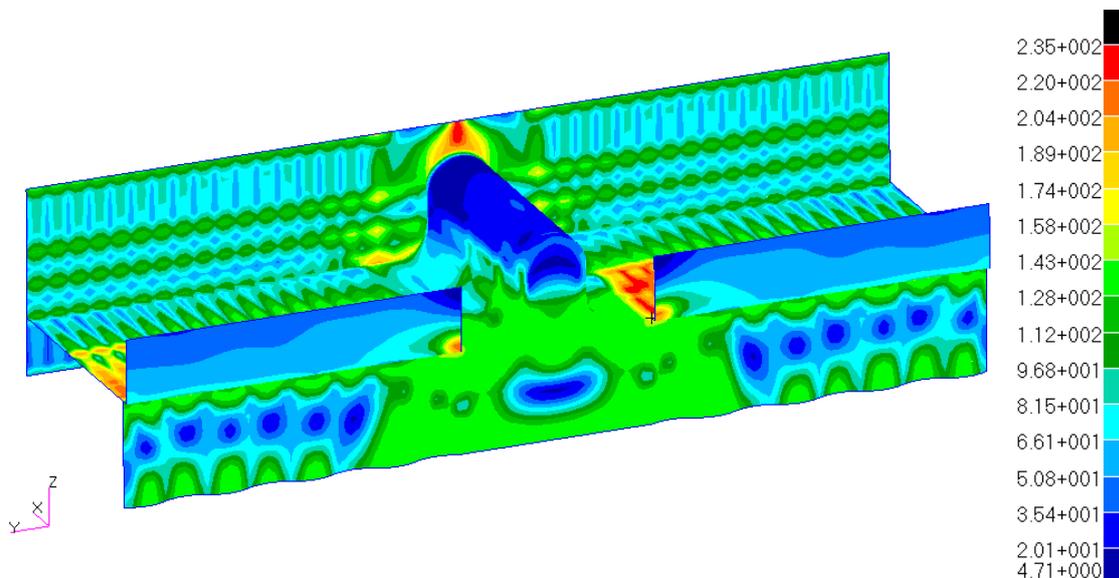


Figura 4. 31: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada para el Diseño1.

En la figura 4.31 se muestran los resultados para la aplicación del 100% de la carga térmica, es decir, el estado de tensiones cuando el horno se encuentra a su temperatura máxima. Se puede comprobar que el límite de fluencia del acero inoxidable refractario AISI 304 (en color

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

verde), se alcanza en la mayor parte de los elementos de este material, véase el zambullidor, el dilatador y la tapa del mismo.

Para poder apreciar qué zonas son las más afectadas, estudiaremos las tensiones que aparecen únicamente en el AISI 304 y a diferentes pasos de aplicación de la carga para poder ver la evolución que sufre.

En la figura 4.32, se han representado los resultados en tensiones obtenidos para la aplicación del 35% de carga, lo que se correspondería con una temperatura en el interior del horno de 350 °C, temperatura a partir de la cual, el acero inoxidable empieza a alcanzar su punto de fluencia (zonas en color naranja).

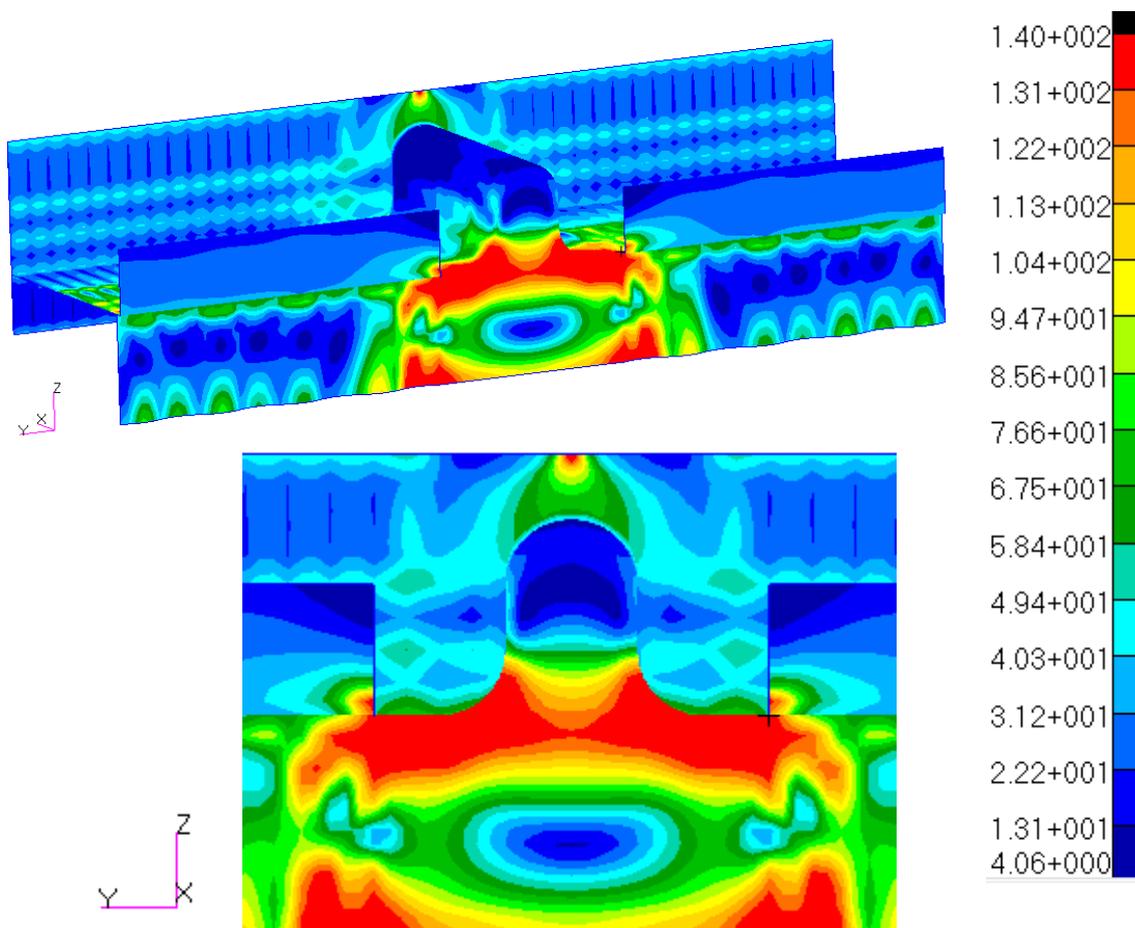


Figura 4. 32: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 35% de la carga térmica aplicada para el Diseño 1.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

Como se puede comprobar, las tensiones son más elevadas en las zonas donde la geometría del dilatador varía. Esto se debe al fenómeno de **concentración de tensiones**, que se produce en la sección de una pieza en la que tiene lugar alguna discontinuidad geométrica.

En este caso, la discontinuidad geométrica que provoca esta concentración de tensiones es el cambio de curvatura en el dilatador y es por eso que las tensiones en esta zona aparecen más elevadas. De la misma forma, ésta zona será la primera en entrar en fluencia.

Si observamos los resultados obtenidos para la aplicación del 100% de la carga, en la figura 4.33, podemos concluir que este diseño de dilatador no impide que plastifique la mayor parte de la tapa.

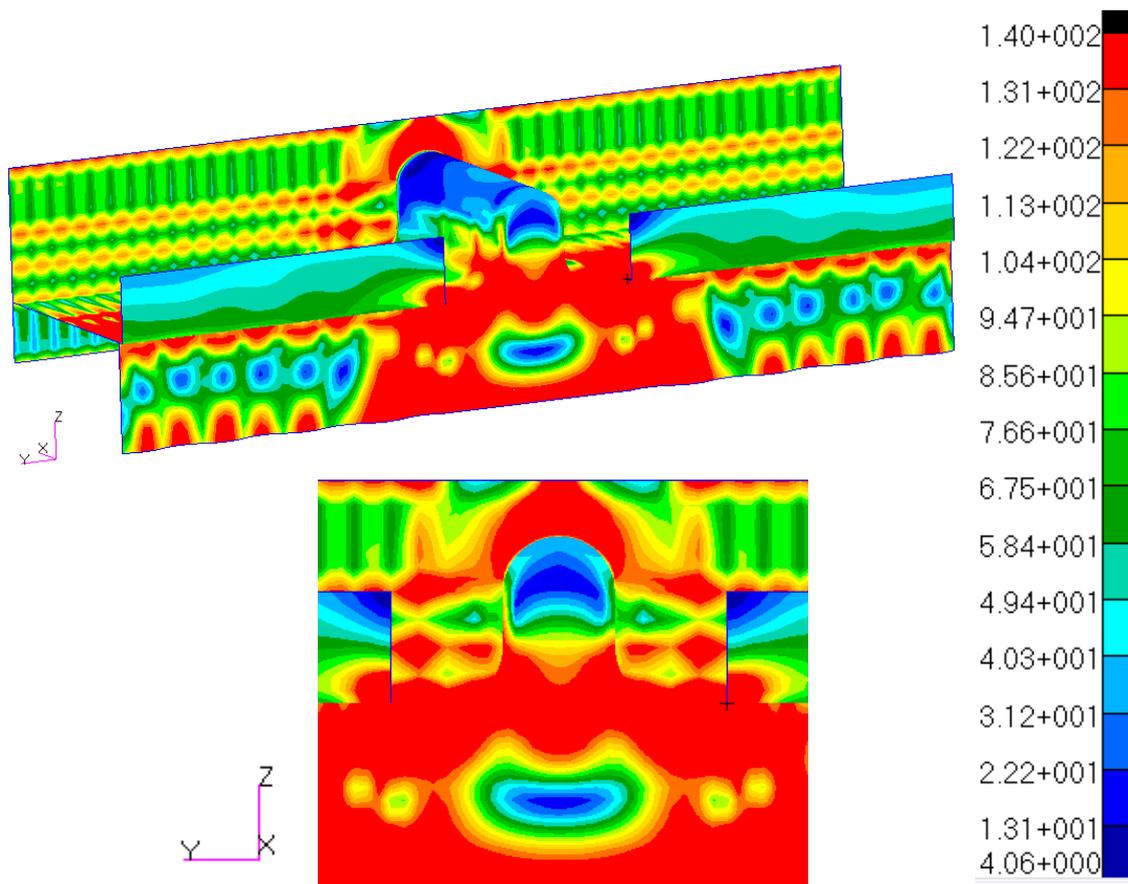


Figura 4. 33: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada para el Diseño 1.

Comparando estos resultados con los obtenidos experimentalmente, en la figura 4.34, podemos ver que las zonas de fallo de los dilatadores instalados actualmente en los hornos se corresponden con las zonas de fallo resultantes del análisis no lineal realizado.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

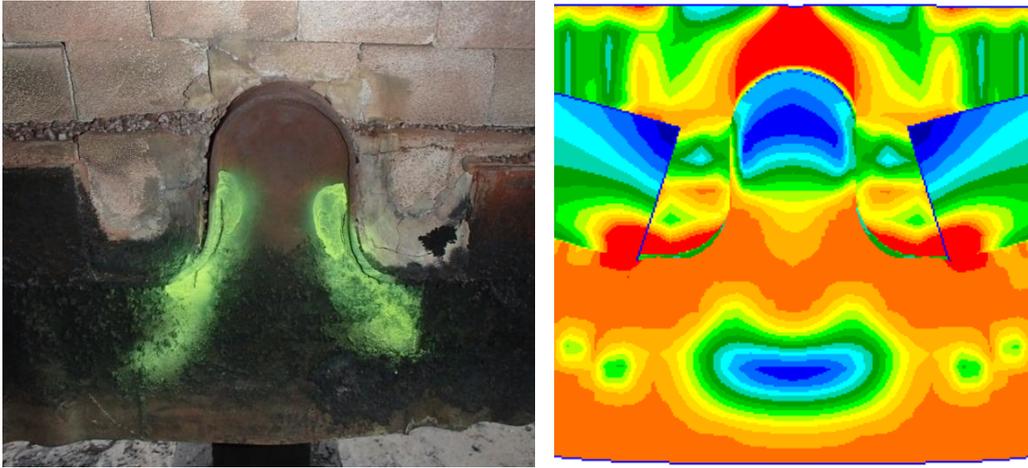
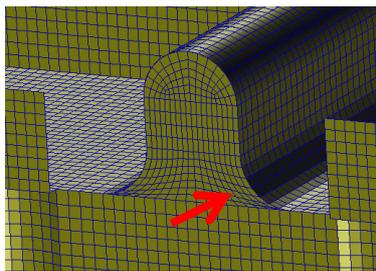
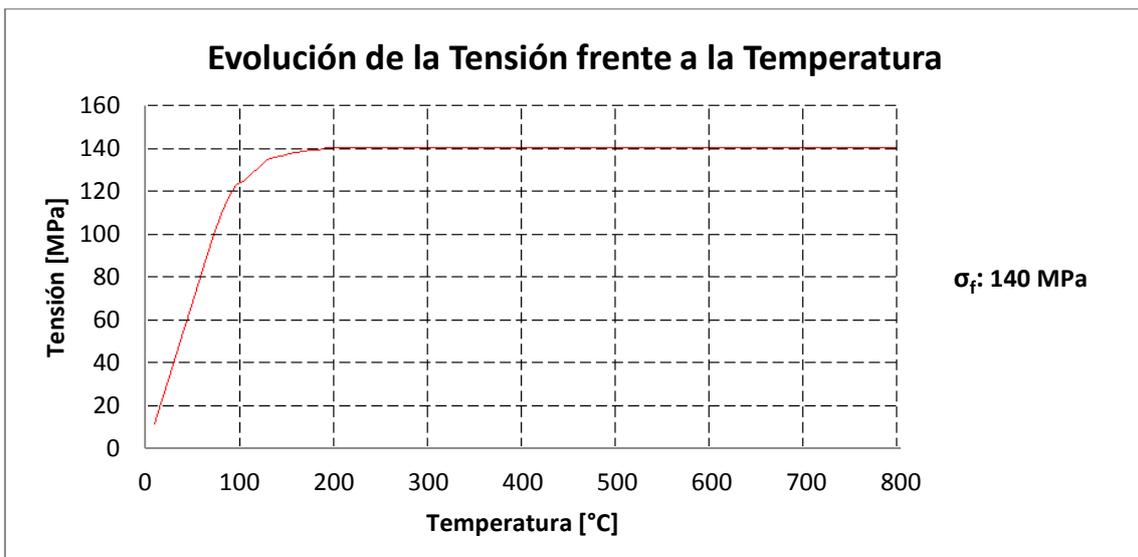


Figura 4. 34: Comparación de las zonas de fluencia en el modelo frente a las zonas de rotura reales del dilatador para el Diseño 1.

En la gráfica de la figura 4.35 se puede observar la variación de la tensión de uno de los nodos localizados en los puntos de concentración de tensiones del dilatador. En estos puntos se alcanza el límite de fluencia incluso antes de alcanzar el 20% de aplicación de la carga de temperatura total, lo que se correspondería con una temperatura de aproximadamente 160 grados en el interior del horno.



(a)



(b)

Figura 4. 35: Nodos críticos (a) y evolución de la tensión [MPa] de Von Mises en el dilatador del Diseño 1 (b).

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 1: Introducción de elemento dilatador

En cuanto a los desplazamientos sufridos por el faldón tras la introducción de esta mejora, se puede observar en la figura 4.36 que el tramo de faldón izquierdo se desplaza aproximadamente 4 mm hacia la derecha y lo mismo ocurre con el tramo de faldón derecho, se desplaza alrededor de 4 mm hacia la izquierda. de tal forma que el dilatador colocado justo en el centro y de forma que el tramo es simétrico, es capaz de absorber estos desplazamientos, manteniendo su posición en la dirección longitudinal del faldón.

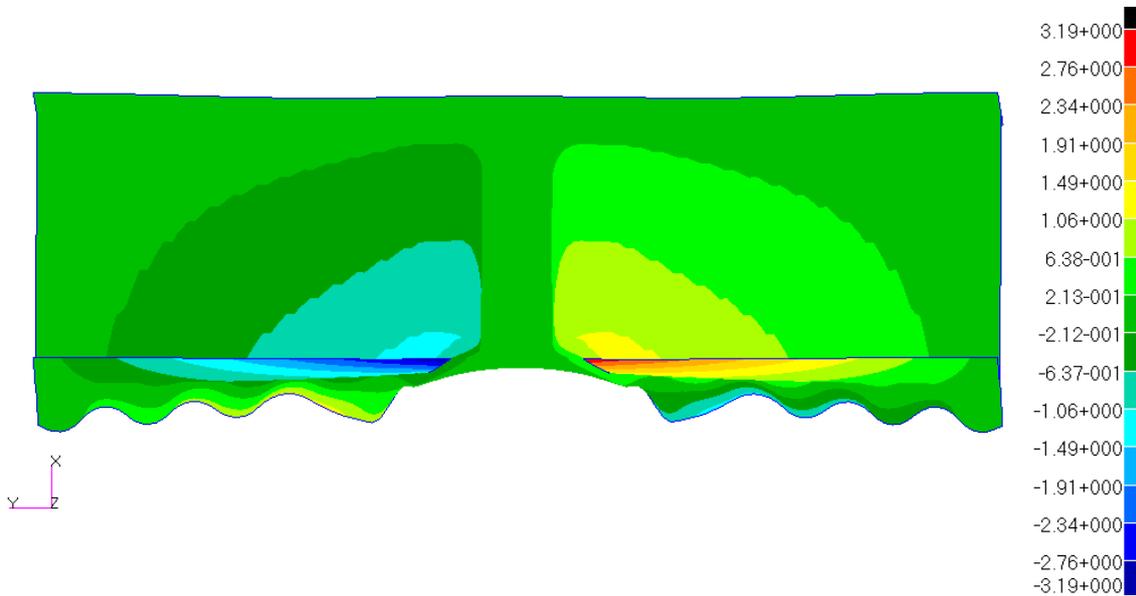


Figura 4. 36: Desplazamientos longitudinales [mm] en el modelo del Diseño 1 (Eje Y).

La gráfica de la figura 4.37 representa los desplazamientos sufridos por el mismo nodo en el cual hemos analizado las tensiones anteriormente.

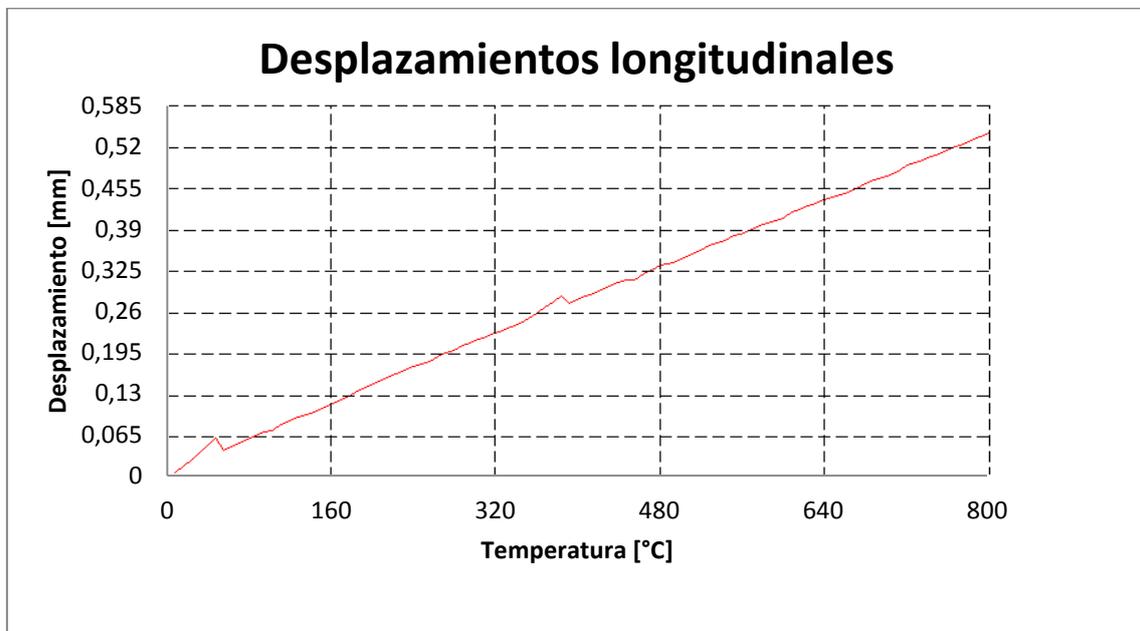


Figura 4. 37: Desplazamientos sufridos por uno de los nodos en fluencia frente a la aplicación de carga en el Diseño1.

4.4.3.2 - Diseño 2: Disminución de la altura del dilatador

Tras los resultados obtenidos en la modelización y análisis de los dilatadores instalados actualmente en los faldones de los hornos, habiendo comprobado que las simulaciones realizadas coinciden con los resultados experimentales y sacado la conclusión de que este diseño no es el óptimo para el correcto funcionamiento del faldón y, consecuentemente, de los hornos, se propone a continuación un nuevo diseño, basado en el anterior, pero con un ligero cambio en su geometría.

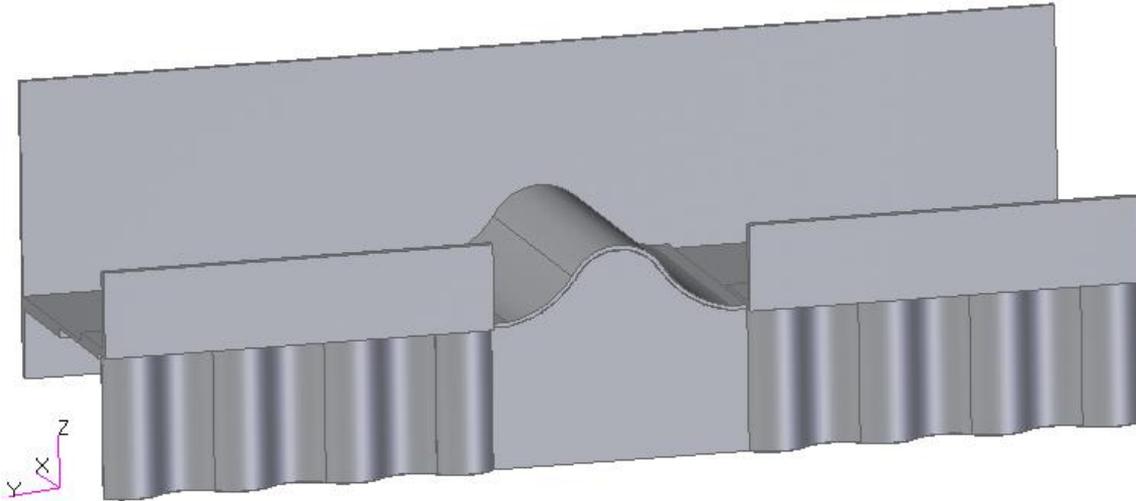


Figura 4. 38: Diseño 2 instalados sobre subestructura de faldón

La partición de la geometría, la asignación de propiedades, mallado y aplicación de condiciones de contorno y cargas actuantes se realiza de la misma forma que se ha hecho con los modelos anteriores y se muestra en la figura 4.39.

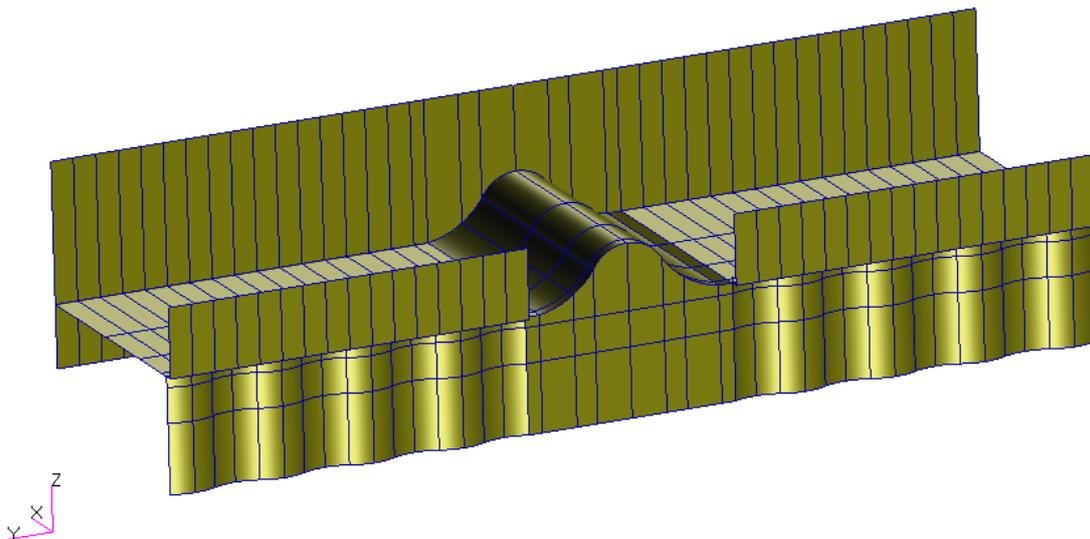


Figura 4. 39: Creación de la geometría del Diseño 2.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 2: Disminución de la altura del dilatador.

La principal diferencia de este dilatador con el que está actualmente instalado en los faldones de los hornos, ver figura 4.38, es la altura.

El dilatador del Diseño 1 tenía una altura de 150 mm, mientras que el propuesto en esta mejora de diseño únicamente tiene 80 mm. Esto conlleva un aumento de los radios de curvatura del dilatador.

Con esto queremos conseguir la disminución de tensiones en esta zona, ya que el cambio de geometría en este caso afectaría según la expresión 4.3 mostrada a continuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{1}{k_f} \sigma \quad (Ec. 4.3)$$

donde k_f es el factor de concentración de tensiones teórico, que depende del radio de curvatura y los espesores.

Si conseguimos que este cociente, $\frac{1}{k_f}$, sea lo más pequeño posible, menores serán las tensiones en esta zona y, por lo tanto, menores los esfuerzos a soportar, consiguiéndose así una mayor vida útil del dilatador.

Para este modelo se realizará de nuevo un análisis no lineal, ya explicado con anterioridad, en el que se aplican los parámetros mostrados en la tabla 4.5 para conseguir la convergencia:

Tabla 4. 5: Parámetros de convergencia para el Diseño 2.

| Parámetros de convergencia | Valor |
|---|--------------|
| Incrementos de Carga | 200 |
| Iteraciones por actualización de la matriz | 40 |
| Iteraciones máximas permitidas | 45 |
| Tolerancia en desplazamientos | 0.01 |
| Tolerancia en carga aplicada | 0.01 |
| Tolerancia en energía | 0.01 |

Tras la obtención de la convergencia del análisis, procedemos al estudio de los resultados obtenidos. Recordamos de nuevo, en la tabla 4.6, las tensiones a partir de las cuales los materiales dejan de tener un comportamiento lineal y elástico y por lo tanto fallarán:

Tabla 4. 6: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 2.

| Límite de Fluencia a la Tª de funcionamiento media (300 °C) | |
|--|---------|
| S235JR | 235 MPa |
| AISI304 | 140 MPa |

En la figura 4.40 se muestra la distribución de tensiones que aparece cuando se aplica el total de la carga térmica.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 2: Disminución de la altura del dilatador.

La tensión de plastificación se alcanza en prácticamente todo el dilatador y aparecen unos bulbos de elevada tensión en la chapa del horno que harían que esta zona alcanzase la fase plástica.

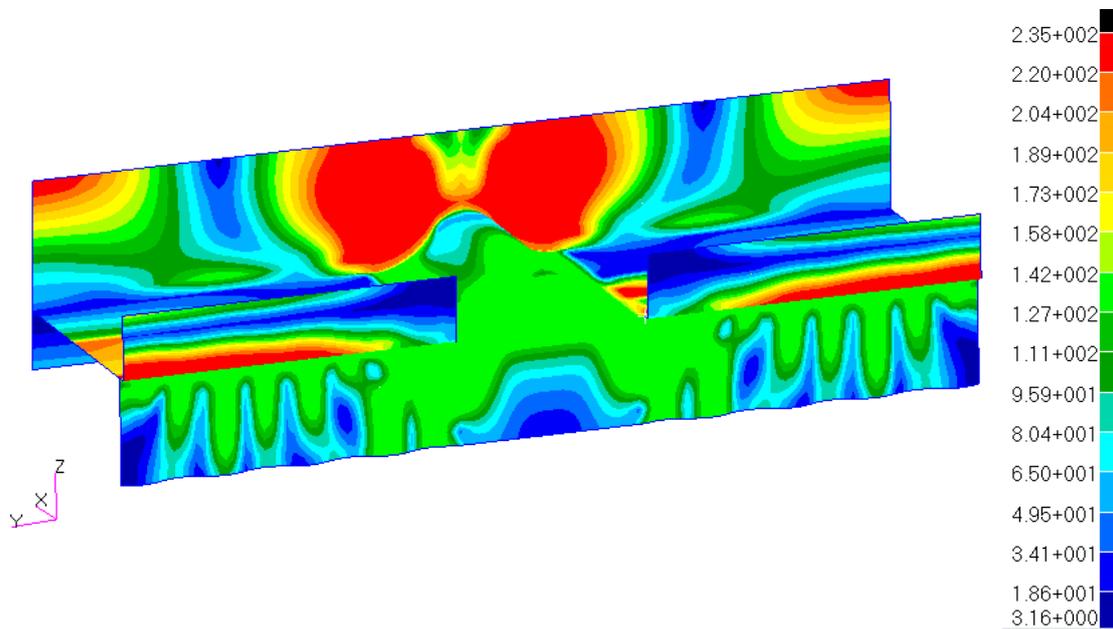


Figura 4. 40: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2.

Como conclusión, éste modelo no es el más adecuado para el uso al que estaría destinado y, para poder apreciar mejor la entrada en fluencia del material del dilatador (AISI 304), mostraremos en la figura 4.41 la distribución de tensiones para un 35 % de la carga térmica aplicada.

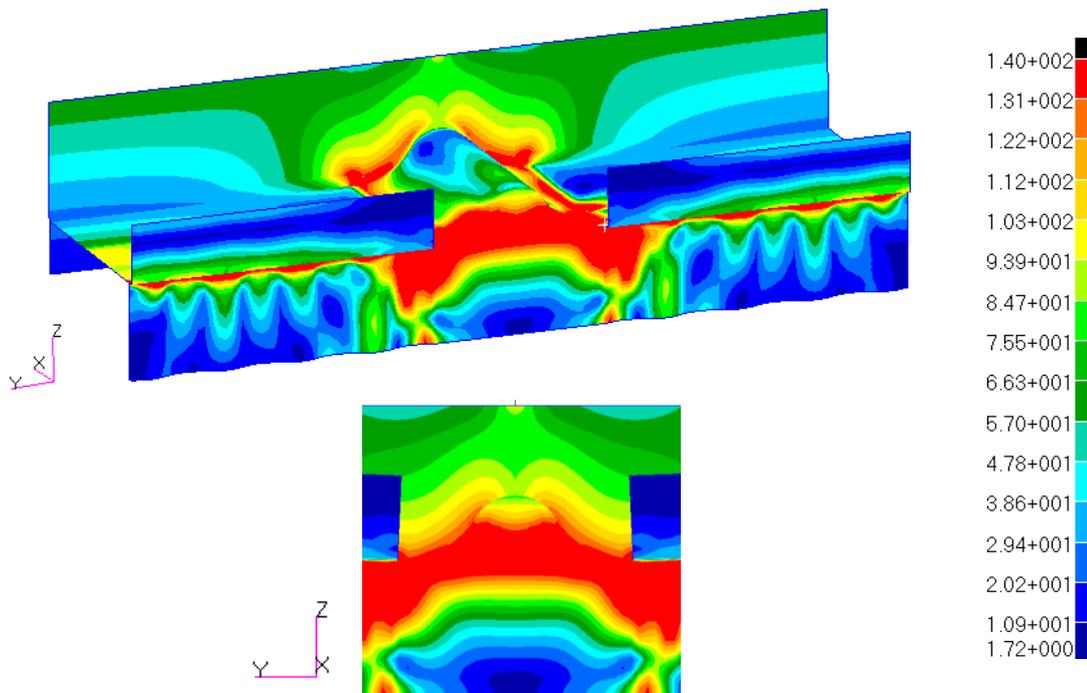


Figura 4. 41: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS
Diseño 2: Disminución de la altura del dilatador.

El dilatador es incapaz de absorber las dilataciones del material, de manera que en lugar de disipar las tensiones como se pretende con este elemento, las concentra, alcanzando el límite de fluencia a una temperatura inferior a los, aproximadamente, 300 °C. En la figura 4.42, se puede ver que con el 100 % de la carga térmica aplicada entraría en fluencia la mayor parte del dilatador.

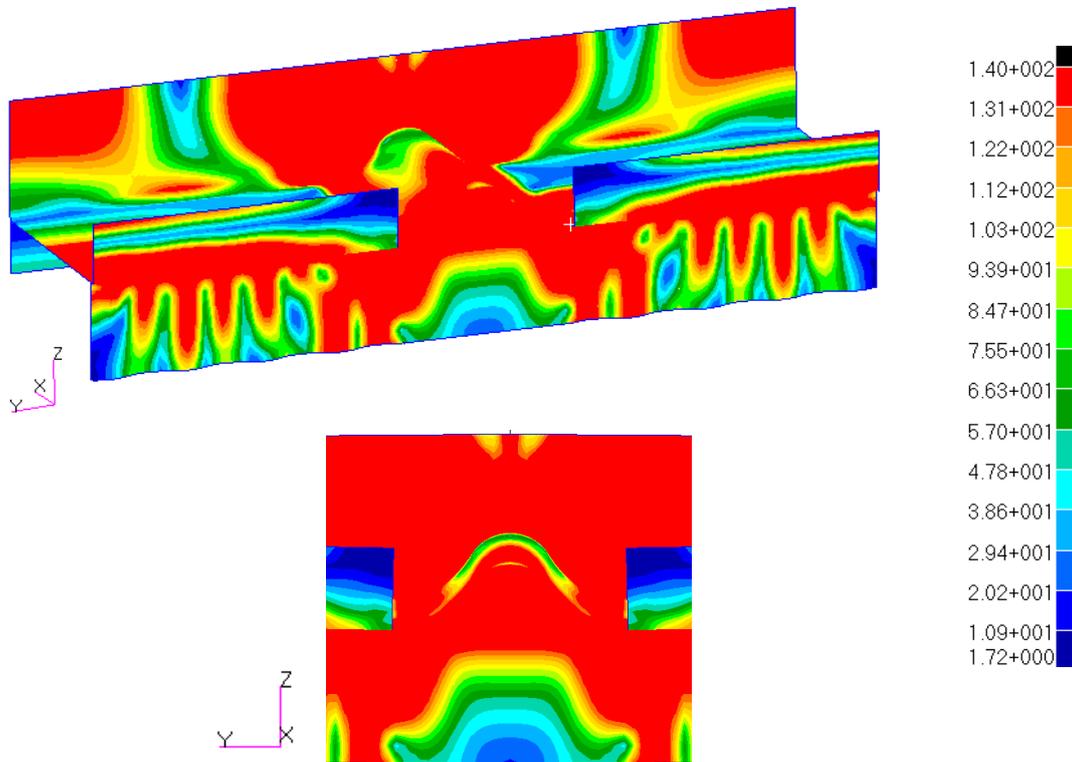


Figura 4. 42: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 2.

En la gráfica que se muestra en la figura 4.43 (a), se observa la evolución de la tensión frente al incremento de la carga térmica para uno de los nodos de las principales zonas de fallo, ver figura 4.43 (b).

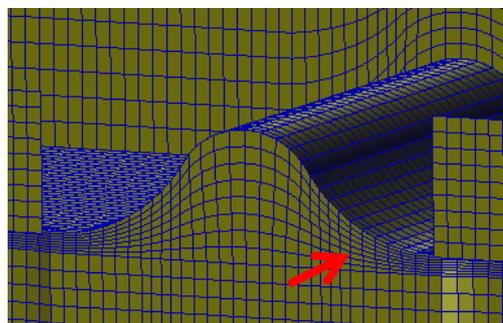


Figura 4. 43 (a): Principales zonas de fallo del Diseño 2

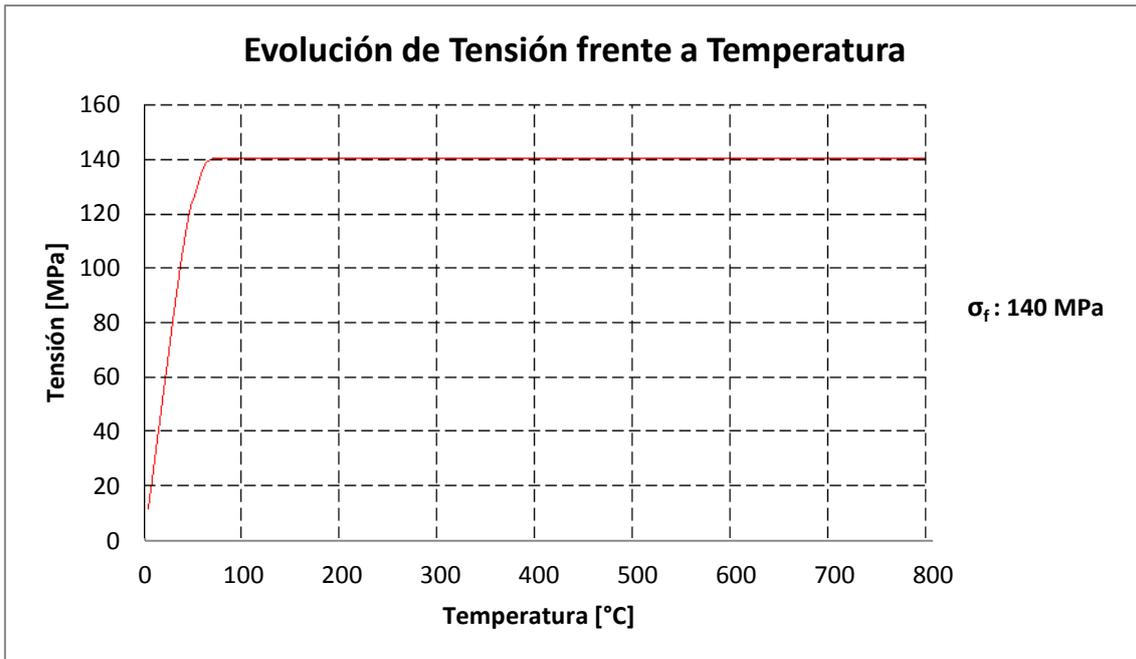


Figura 4. 44 (b): Evolución de la tensión [MPa] en función de la temperatura para los nodos que entran en fluencia.

Los desplazamientos, representados en la figura 4.44, debidos a las dilataciones del material, es decir, los desplazamientos que absorbería el dilatador en la dirección longitudinal (para nosotros la dirección Y) seguirían la curva mostrada en la figura 4.45.

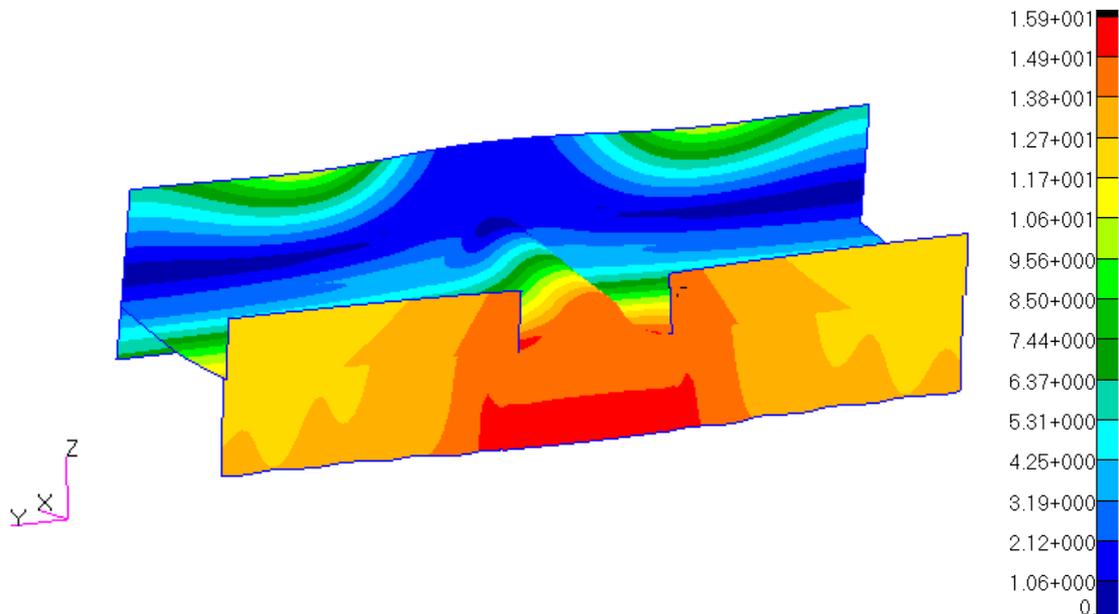


Figura 4. 45: Campo de desplazamientos [mm] en el Diseño 2

Como se puede comprobar, el nodo en cuestión del dilatador no sufre prácticamente desplazamientos.

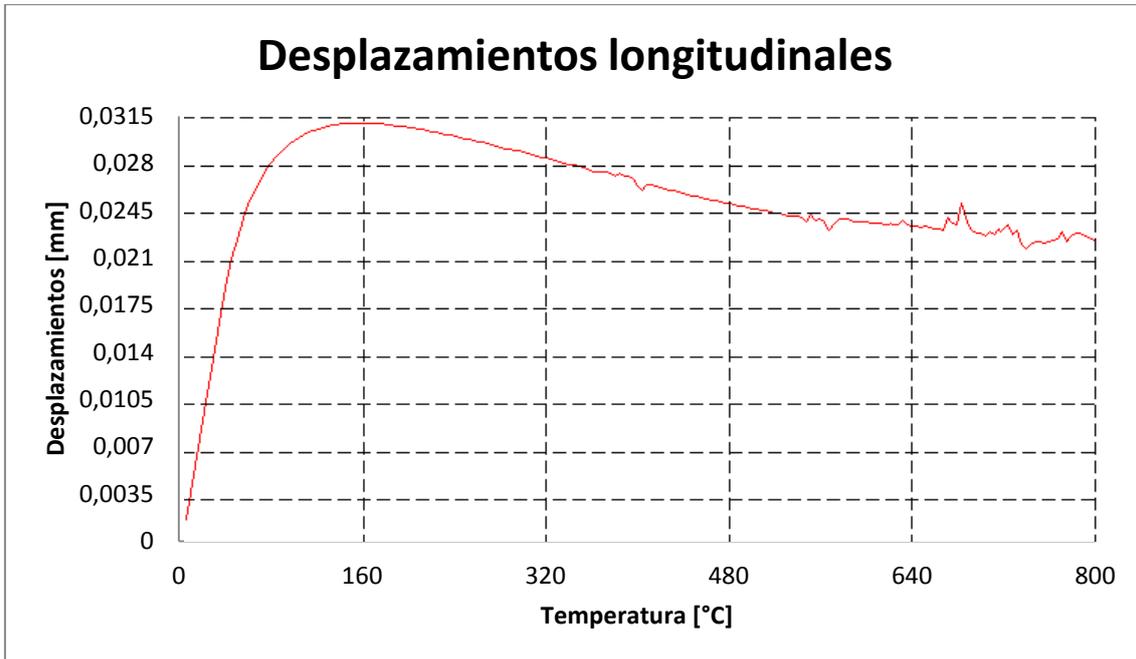


Figura 4. 46: Desplazamientos [mm] en la dirección longitudinal del dilatador del Diseño 2 (Eje Y).

Esto nos permite reafirmarnos en la teoría de que este modelo es incapaz de absorber las dilataciones que sufre el resto del faldón, funcionando peor que en el dilatador instalado actualmente en la planta.

4.4.3.4 – Diseño 3: Mejora de silicona en el Diseño 1

Ya que las mejoras de diseño mostradas hasta el momento no parecen reducir las tensiones sobre los elementos dilatadores, se ha propuesto una nueva mejora que se aplicará sobre estos dos modelos analizados anteriormente y se comparará el resultado obtenido con lo analizado hasta el momento.

Esta mejora consistirá, principalmente, en eliminar una de las restricciones más importantes para el dilatador.

La geometría de este dilatador, y por lo tanto la creación de la misma, ver figura 4.46, será exactamente igual a la de los dilatadores que están actualmente instalados en los faldones de los hornos. Sin embargo, se hará una modificación en la unión entre la tapa y el cuerpo del dilatador.

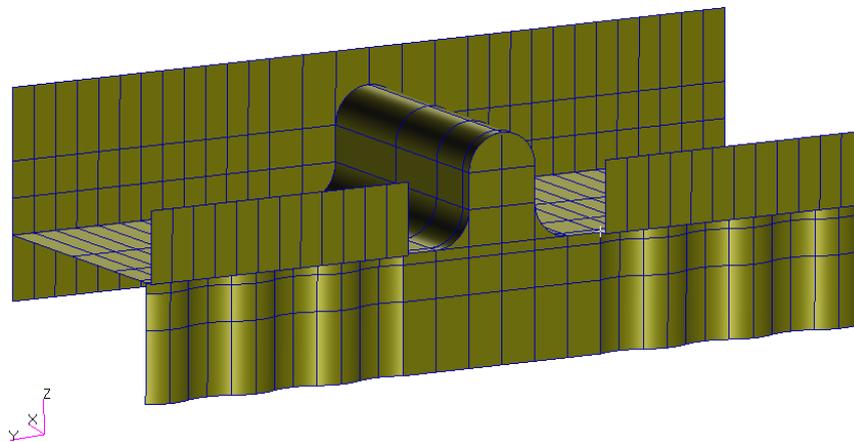


Figura 4.47: Creación de la geometría del Diseño 3.

Usualmente, la tapa se une al dilatador mediante un cordón de soldadura. En este caso, se eliminará el cordón de soldadura correspondiente a la unión entre el cuerpo del dilatador y la parte superior de la tapa, ver figura 4.47, permitiendo el libre movimiento y dilatación del material, mientras que en la unión entre la tapa y el zambullidor que estará en contacto con la junta de agua, se mantendrá la unión rígida que proporciona la soldadura.

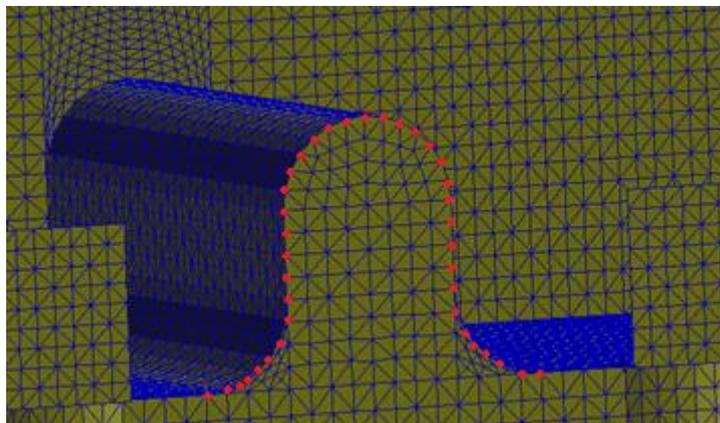


Figura 4.48: Malla del dilatador del modelo del Diseño 3 y contorno de la geometría sobre la que se elimina la soldadura.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Diseño 3: Mejora de silicona en el Diseño 1*

El mallado, mostrado en detalle sobre las figuras 4.47 y 4.48, será exactamente igual al que hemos realizado en los modelos anteriores, con la única diferencia de que, en este caso, debido a la aparición de ciertas dificultades a la hora de lograr la convergencia del análisis debido a la complicación de la geometría, en lugar de utilizar una malla con elementos QUAD se ha optado por utilizar elementos TRIA del mismo tamaño que en los anteriores modelos, 11.2206 mm.

En primer lugar se realiza la unificación de los nodos de todas las superficies adyacentes, ver figura 4.49. Para permitir el movimiento relativo entre la tapa del dilatador y el cuerpo, hemos liberado los nudos correspondientes a esta unión.

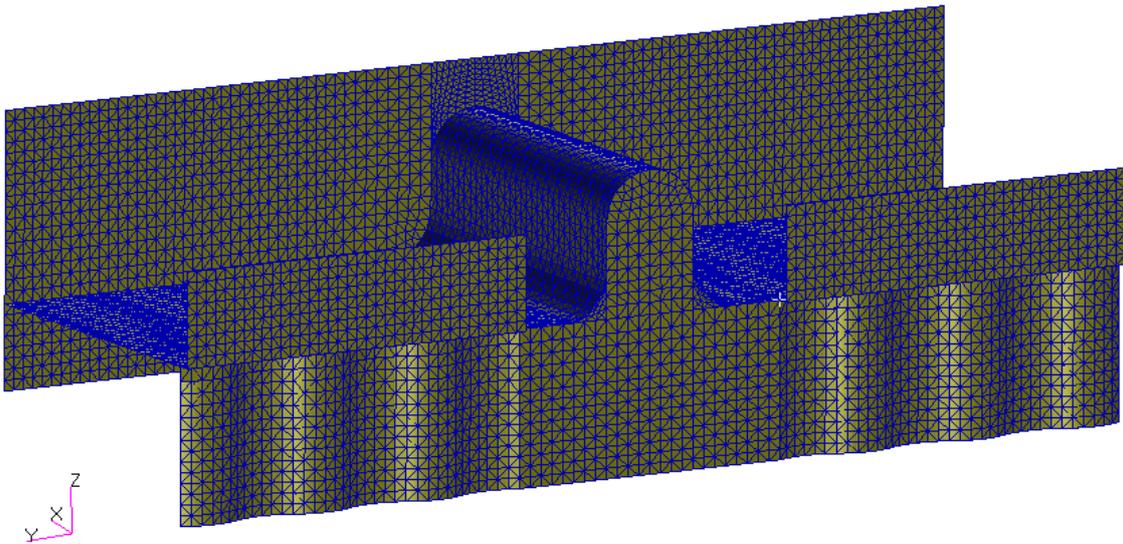


Figura 4. 49: Malla del faldón del modelo del Diseño 3.

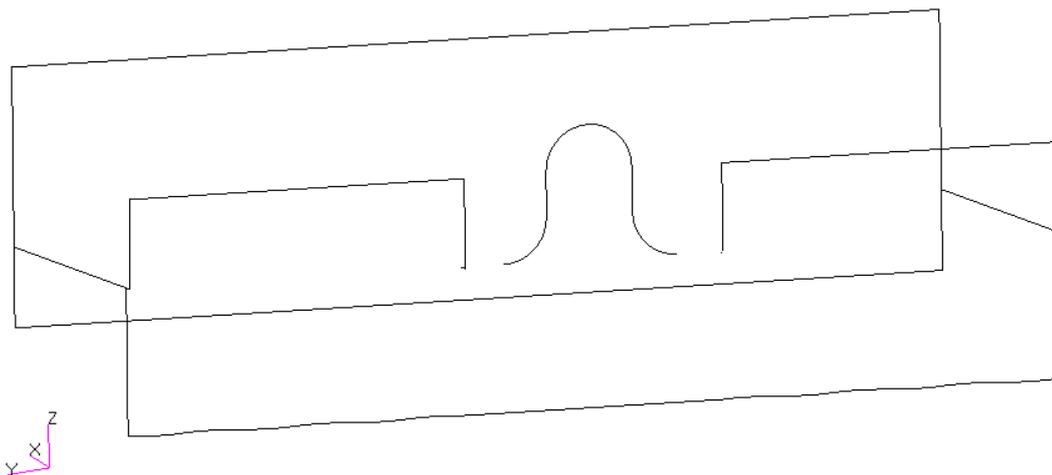


Figura 4. 50: Unificación de nodos interiores del modelo del Diseño 3 y representación de bordes libres.

Al liberar la zona superior de la tapa del dilatador, los gases volátiles del interior del horno tendrán una vía de escape que debemos bloquear para evitar que sean expulsados al exterior.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Diseño 3: Mejora de silicona en el Diseño 1*

Para ello, hemos decidido colocar una pletina de acero inoxidable AISI 304 en la parte inferior del dilatador, como se observa en la figura 4.50, permitiendo la continuidad del faldón y de manera que los gases que salgan por la unión libre entre la tapa y el dilatador se queden recluidos gracias a esta pletina.

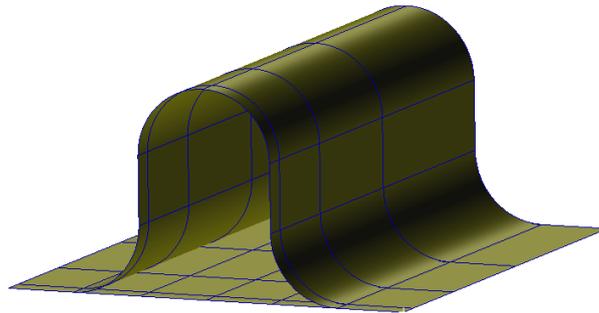


Figura 4. 51: Pletina colocada bajo el dilatador del Diseño 3.

Para que no se restrinja el movimiento en la dirección longitudinal, se optará por una unión soldada de la pletina con la chapa del horno y el frente de la misma con la tapa del horno, y una unión de silicona resistente a altas temperaturas entre la pletina ambos extremos del dilatador/faldón.

Esta silicona no sólo favorecerá la estanqueidad del interior del horno y evitará la salida de gases, sino que será capaz de absorber las dilataciones del faldón puesto que es capaz de asumir una elongación de hasta el 300% .

Las propiedades asignadas al modelo se pueden ver en la figura 4.51 y son las mismas que para el resto de diseños, con la única diferencia de la introducción de la silicona.

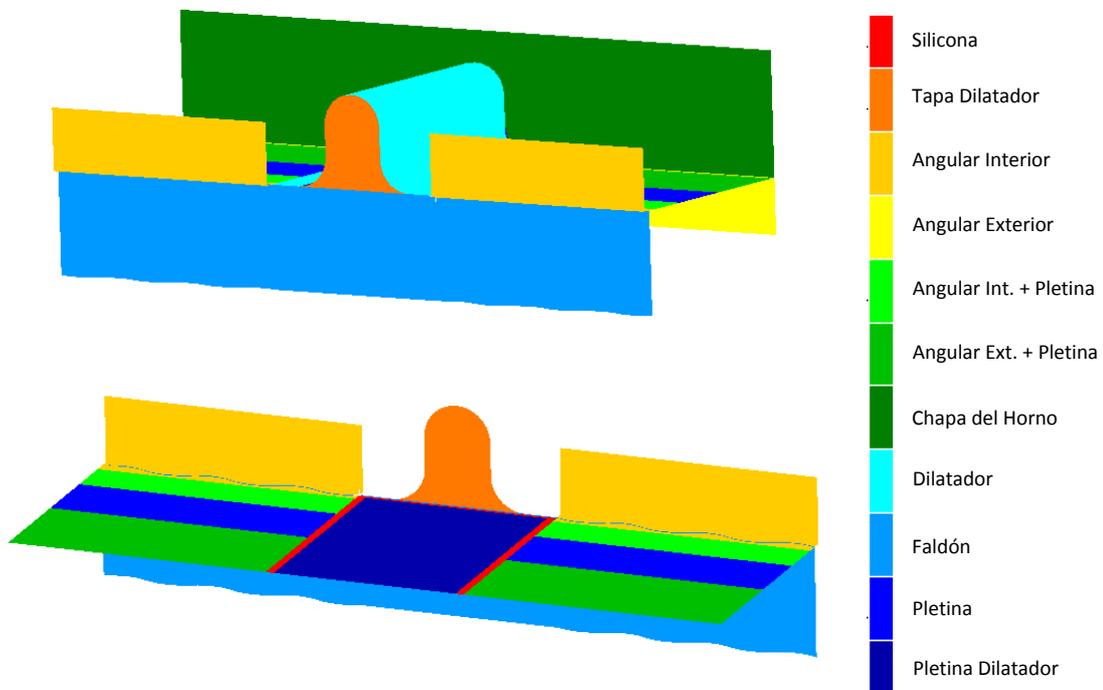


Figura 4. 52: Propiedades del modelo del Diseño 3.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Diseño 3: Mejora de silicona en el Diseño 1*

Procedemos ahora a realizar el análisis por elementos finitos. De nuevo, en este caso aplicaremos un análisis no lineal, a pesar de haber asumido la silicona de unión como un material lineal. Para conseguir la convergencia del modelo se han introducido los parámetros mostrados en la tabla 4.7:

Tabla 4. 7: Parámetros de convergencia para el análisis del Diseño 3.

| Parámetros de convergencia | Valor |
|---|--------------|
| Incrementos de Carga | 200 |
| Iteraciones por actualización de la matriz | 30 |
| Iteraciones máximas permitidas | 35 |
| Tolerancia en desplazamientos | 0.1 |
| Tolerancia en carga aplicada | 0.1 |
| Tolerancia en energía | 0.1 |

Recordamos de nuevo los valores de tensión límite para cada material en la tabla 4.8.

Tabla 4. 8: Límite de fluencia para los materiales del Diseño 3.

| Límite de Fluencia a la Tª de funcionamiento media (300 °C) | |
|--|---------|
| S235JR | 235 MPa |
| AISI304 | 140 MPa |

La tensión de fluencia de la silicona no es significativa, puesto que suponemos que se comporta de manera lineal durante la aplicación de carga, y que ésta no llegará a alcanzar nunca esa tensión máxima.

Hacemos esta suposición tras comprobar que en análisis de modelos anteriores los desplazamientos son muy pequeños y no superarían el 300% de deformación máxima que es capaz de asumir este material.

Además, habrá que tener en cuenta que el campo de tensiones no será completamente simétrico, puesto que la curvatura de la chapa ondulada del zambullidor en la zona de unión con la tapa del dilatador tampoco lo será.

Esto se debe a que se ha querido representar de la forma más realista posible la geometría del faldón una vez instalada la mejora. Puesto que no siempre se realiza el corte del faldón a la misma altura y coincidente con un cambio de ondulación coincidente a ambos lados, se ha considerado el peor caso posible para el análisis, aquel en el que la unión del elemento dilatador con el zambullidor no es simétrica.

Una vez realizado el análisis, los resultados en cuanto al estado tensional del tramo se refiere son los mostrados en la figura 4.52.

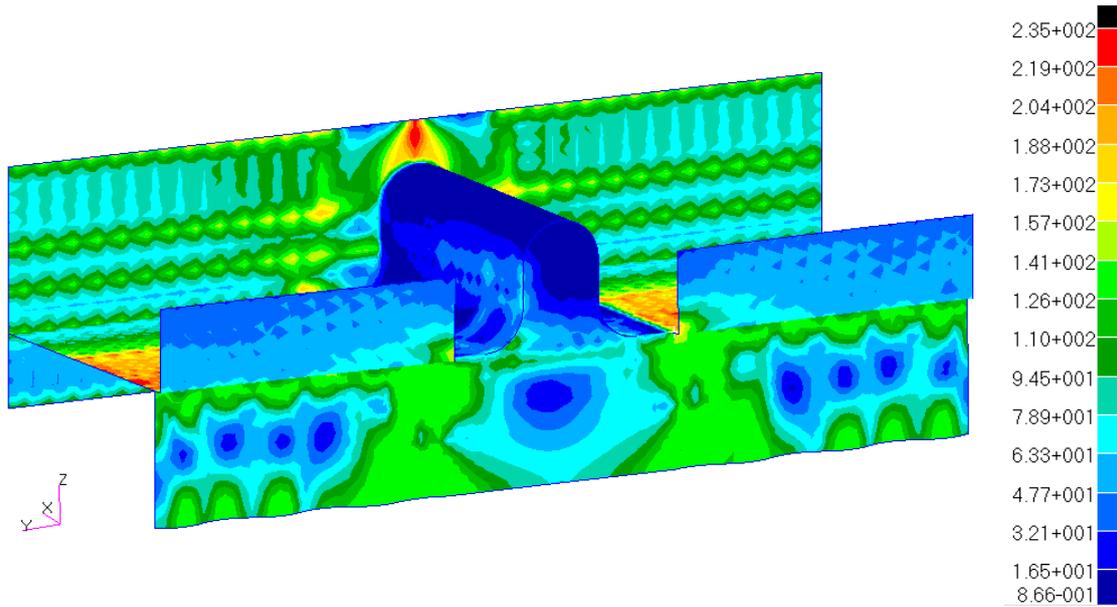


Figura 4. 53: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el faldón para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3.

Se puede observar que las tensiones tanto en el cuerpo como en la tapa del dilatador son relativamente bajas, exceptuando algún punto que plastificaría como consecuencia de la deformación permitida gracias al movimiento libre de la parte superior de la tapa.

Para poder observar mejor la evolución de las tensiones a medida que se incrementa la temperatura en el interior del horno y, consecuentemente, en el faldón, se muestra a en la figura 4.53 el estado tensional al 35% (260 °C) de la carga térmica total aplicada.

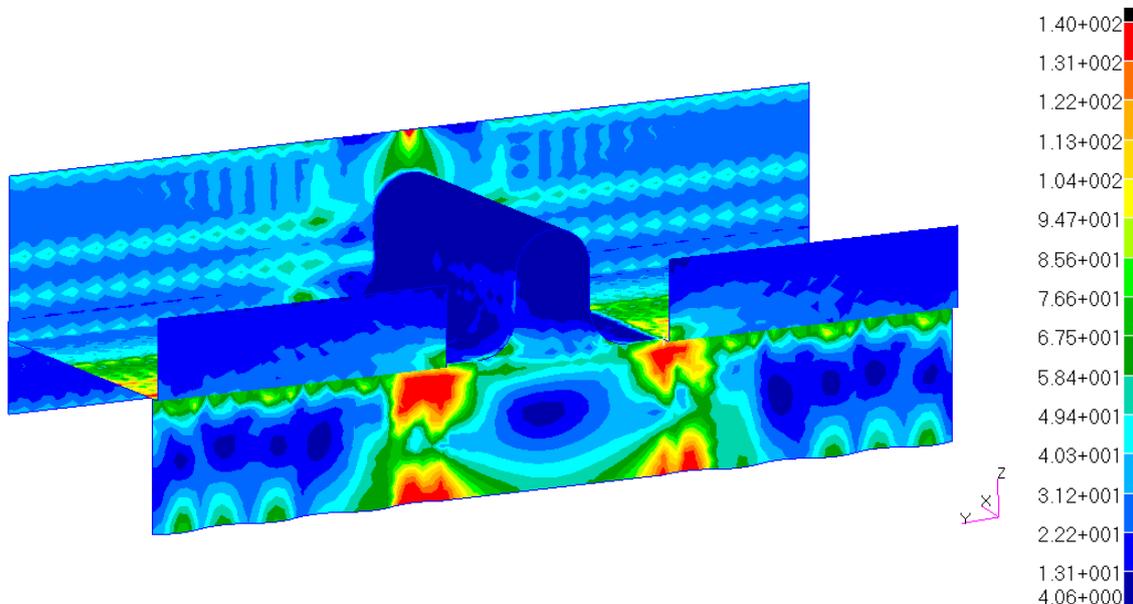


Figura 4. 54: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3.

Cuando en el interior del horno se alcanzan aproximadamente 300 °C, tanto la tapa como el cuerpo del dilatador apenas sufren tensiones elevadas, hecho que sí ocurría en los anteriores modelos analizados. Las únicas zonas en las que se alcanza el punto de fluencia son las zonas de unión entre el zambullidor y la tapa del dilatador, concretamente en las zonas donde el cambio de geometría es brusco, dando lugar al ya mencionado fenómeno de concentración de tensiones.

Si seguimos aumentando la temperatura hasta la máxima alcanzada, ver figura 4.54, se pueden observar otras zonas a mayores donde el acero inoxidable y el acero al carbono alcanzan su límite de fluencia, sin embargo en el conjunto formado por el dilatador y la tapa, sigue sin alcanzarse tensiones lo suficientemente altas como para que el material plastifique y falle.

Como conclusión de este diseño propuesto, podemos comentar que es en el que mejores resultados para la zona crítica de rotura de faldones se han obtenido tras el análisis no lineal.

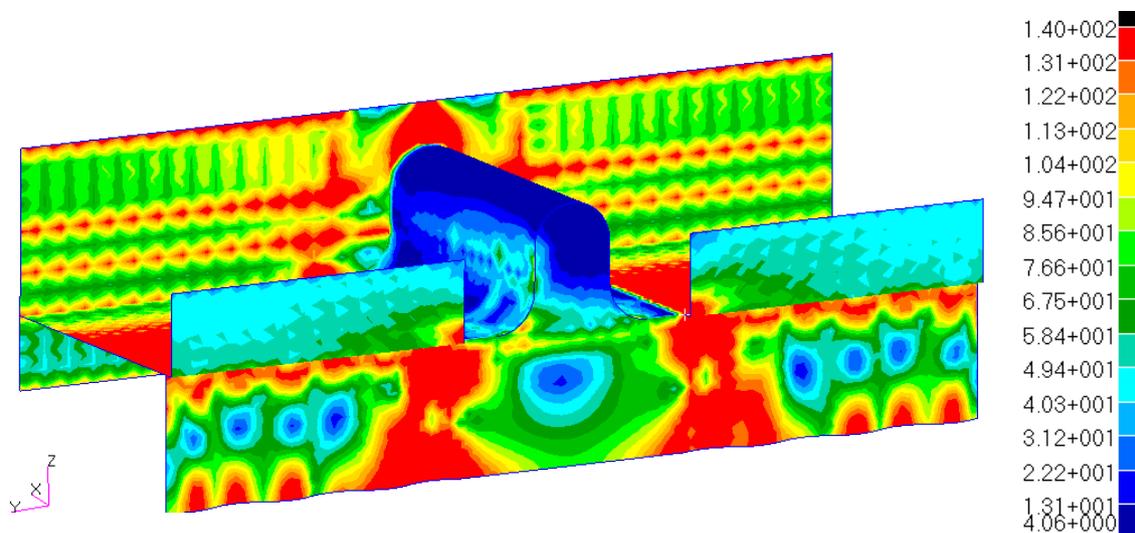


Figura 4. 55: Tensiones de Von Mises [MPa] resultantes en el dilatador para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 3.

En la figura 4.56 se muestra la gráfica de la tensión frente al incremento de temperatura para uno de los nodos, pertenecientes a las zonas que, en la realidad, se ven más afectadas por esta carga térmica. Estas zonas se corresponderían con los cambios de curvatura del dilatador, y se muestran en las imágenes de la figura 4.55.

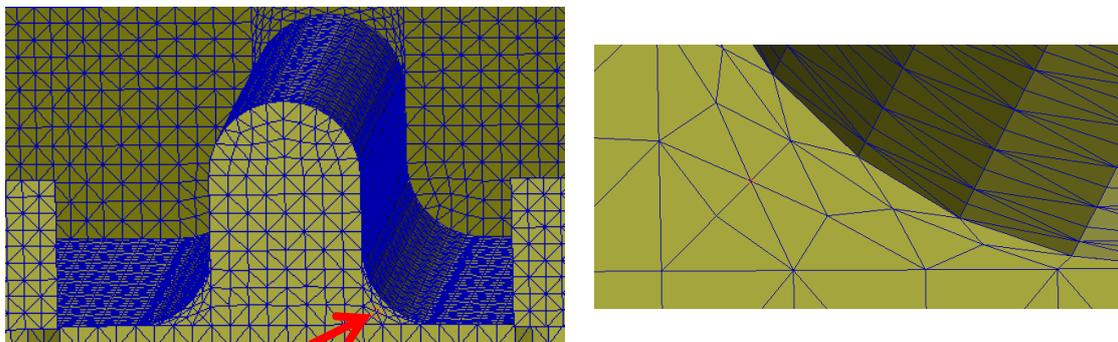


Figura 4. 56: Detalle de los elementos de las zonas consideradas críticas en el Diseño 3.

Se puede apreciar que para estos nodos, los más conflictivos en todos los modelos analizados con anterioridad, la tensión no supera el límite de fluencia.

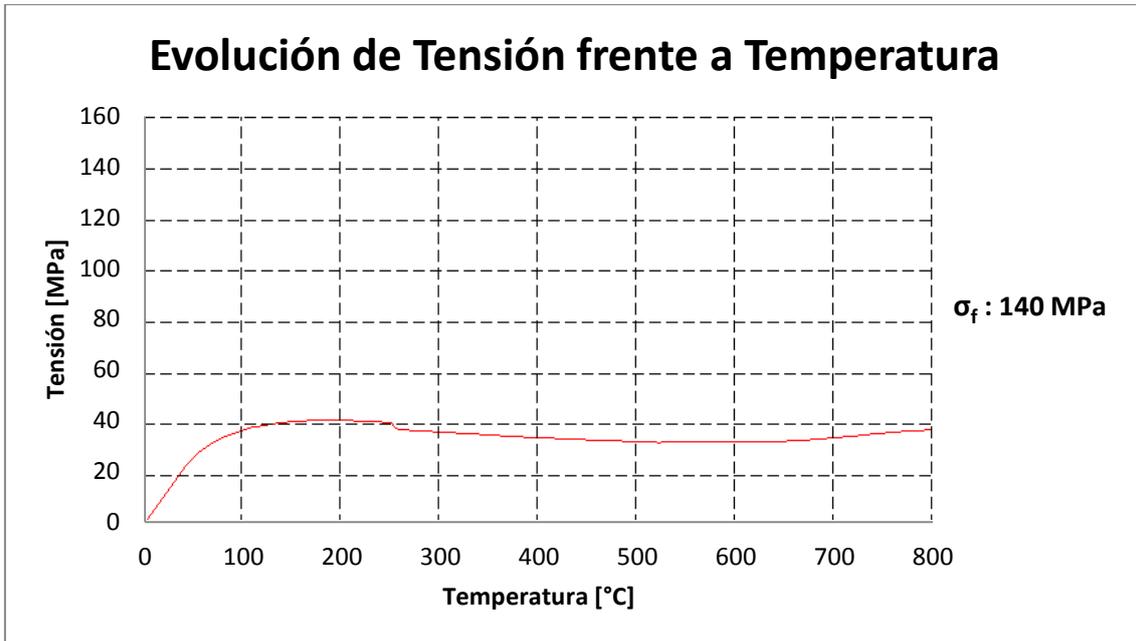


Figura 4. 57: Evolución de la tensión de Von Mises [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 3

Si tomamos uno de los puntos que en la simulación alcanza la tensión de fluencia, podemos observar que las tensiones aumentan de manera lineal, ver figura 4.57, y alcanzan los 140 MPa poco antes de alcanzar la temperatura máxima de funcionamiento del faldón.

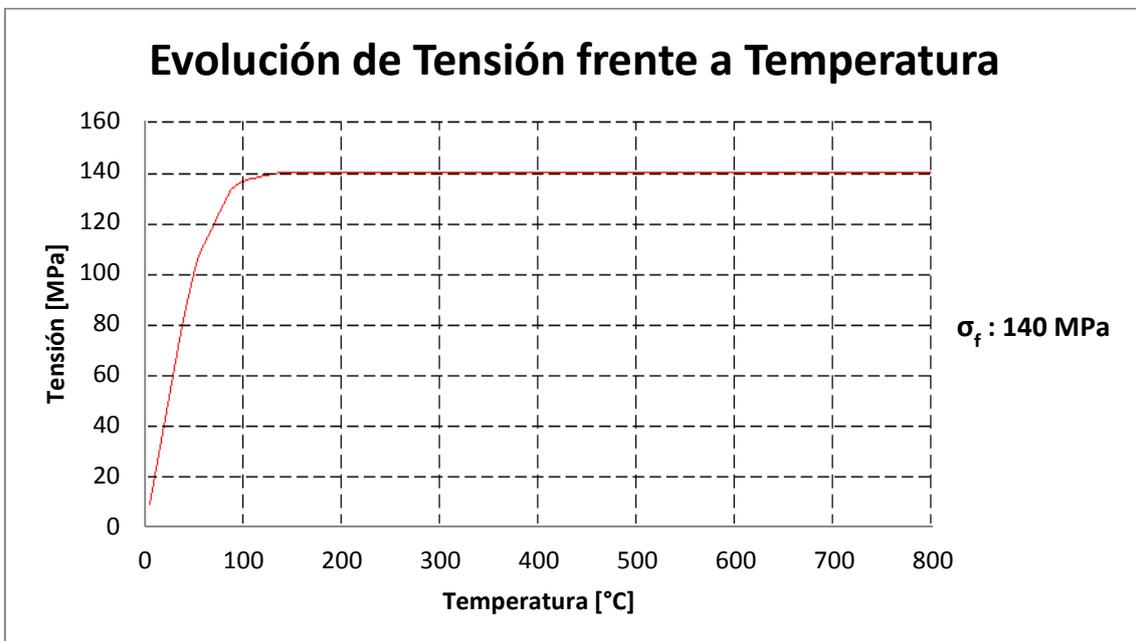


Figura 4. 58: Evolución de la tensión de Von Mises [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 3.

4.4.3.4 – Diseño 4: Mejora de silicona en el Diseño 2

La misma mejora de silicona que se ha aplicado en el modelo inicial y que ya se ha comentado en el subcapítulo anterior se ha introducido en el dilatador del diseño 2, al cual le habíamos modificado la altura para intentar conseguir una reducción de la concentración de tensiones en las zonas conflictivas.

De la misma forma que se ha hecho con el modelo anterior, ver figura 4.58, se ha creado la geometría con sus particiones correspondientes.

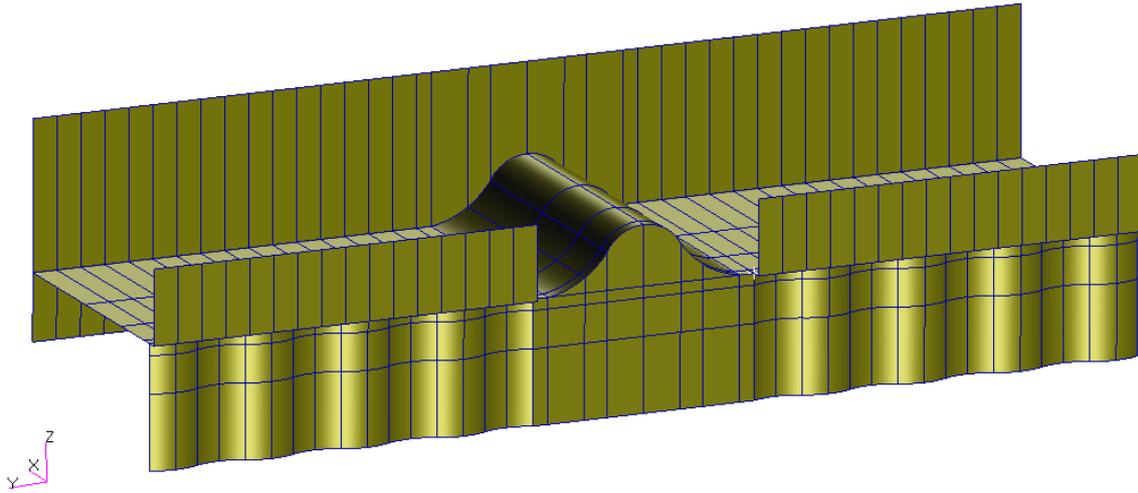


Figura 4. 59: Creación de la geometría del Diseño 4.

Una vez creada la geometría, a cada una de las superficies se le asignan las propiedades correspondientes a la parte del faldón a la que pertenezcan, se malla, esta vez con elementos QUAD de tamaño 11.2206 mm, ver figura 4.59, y se establecen las condiciones de contorno y cargas aplicadas.

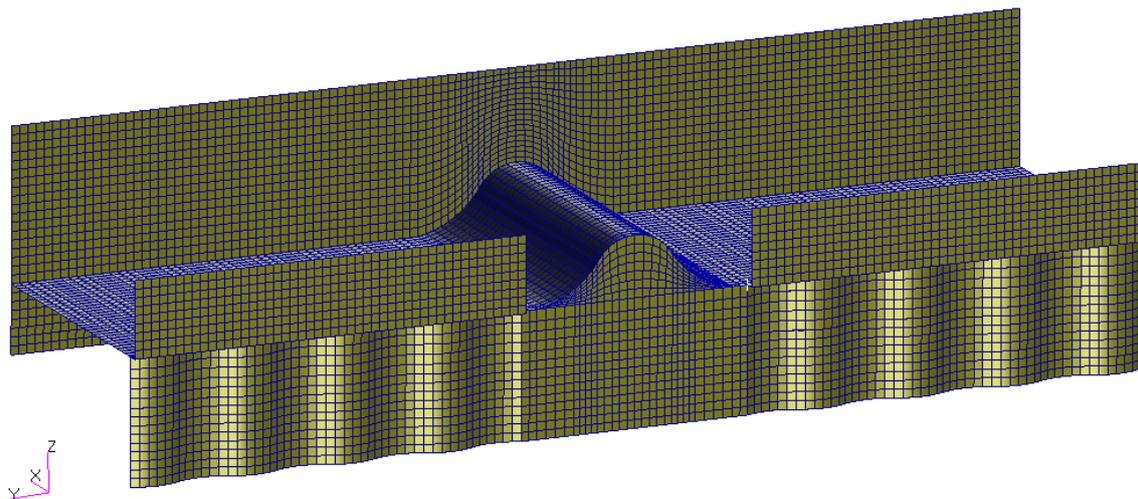


Figura 4. 60: Mallado de la geometría del Diseño 4.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Diseño 4: Mejora de silicona en el Diseño 2*

De nuevo, a la hora de realizar la unificación de la malla, tendremos que excluir los nodos correspondientes a la unión entre la parte superior de la tapa y el cuerpo del dilatador para poder así permitir el movimiento libre de esta zona y evitar cualquier tipo de restricción que impidiese la completa absorción de las dilataciones del faldón durante el calentamiento del mismo.

En la figura 4.60 se muestra el resultado de la unificación de la malla, visualizándose los denominados “Free Edges” o “Bordes libres”. En este caso aparecen también los bordes correspondientes a la parte de la tapa que se instalará sin restricción alguna.

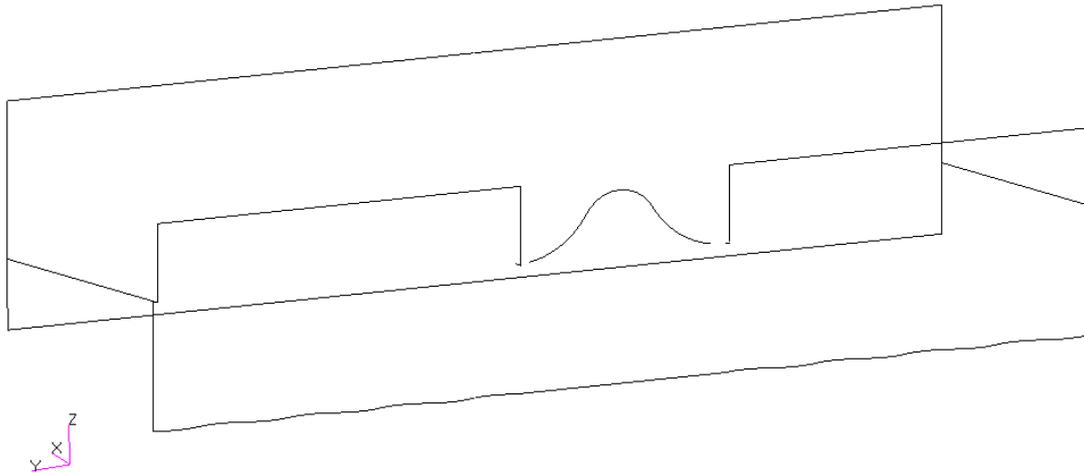


Figura 4. 61: Unificación de nodos en el Diseño 4.

Una vez establecido todo lo anterior, procedemos a la ejecución del análisis no lineal que hemos realizado con el resto de modelos. Para ello tendremos en cuenta los parámetros de convergencia y límites de fluencia de materiales de las tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 4. 9: Parámetros de convergencia para el Diseño 4.

| Parámetros de convergencia | Valor |
|---|--------------|
| Incrementos de Carga | 200 |
| Iteraciones por actualización de la matriz | 40 |
| Iteraciones máximas permitidas | 45 |
| Tolerancia en desplazamientos | 0.01 |
| Tolerancia en carga aplicada | 0.01 |
| Tolerancia en energía | 0.01 |

De la misma forma que en el caso del análisis del diseño 3, asumiremos que el comportamiento de la silicona resistente a altas temperaturas es lineal, y por lo tanto no incluimos su límite de fluencia.

Tabla 4. 10: Límites de fluencia para los materiales del Diseño 4

| Límite de Fluencia a la Tª de funcionamiento media (300 °C) | |
|--|---------|
| S235JR | 235 MPa |
| AISI304 | 140 MPa |

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Diseño 4: Mejora de silicona en el Diseño 2

Según los resultados en desplazamientos de los nodos críticos del dilatador, apenas se desplaza unos mm. El primer resultado que obtenemos es el mostrado en la figura 4.61.

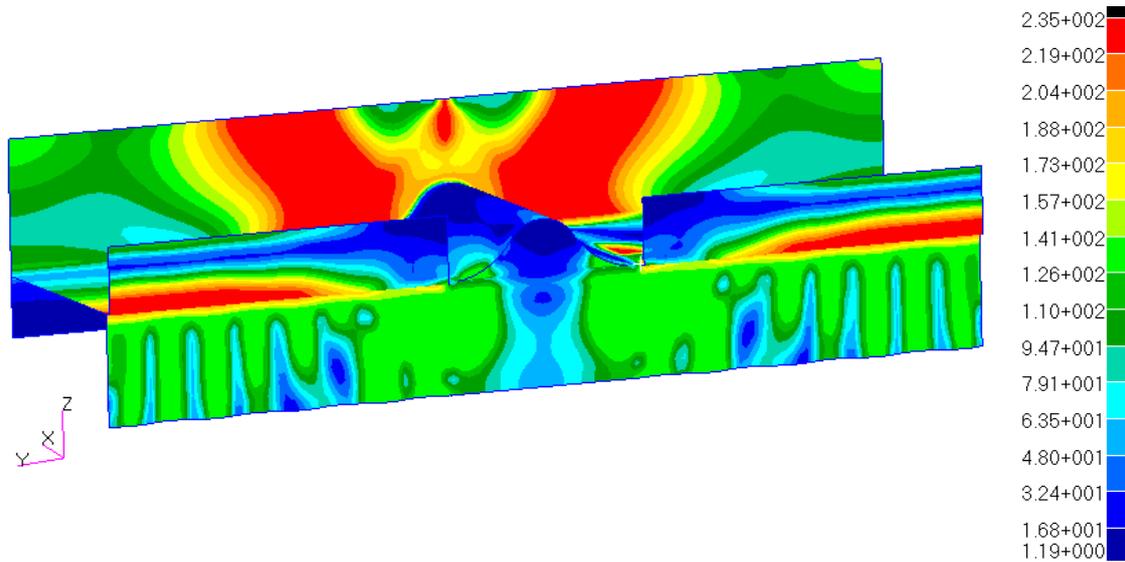


Figura 4. 62: Tensiones resultantes de Von Mises [MPa] en el Diseño 4

Como ocurría con el modelo de dilatador del Diseño 2, y a pesar de que la liberación del movimiento de la tapa reduce considerablemente las tensiones en comparación con modelos anteriores, parece que la geometría de este dilatador es incapaz de absorber las dilataciones que tienen lugar en el faldón, por lo que transmite tensiones muy elevadas a la chapa del horno.

En la figura 4.62 se muestra el campo de tensiones correspondiente al límite de fluencia del acero inoxidable AISI 304 para el 35 % de la carga, como se viene haciendo en el análisis de todos los modelos, para poder apreciar en qué momento y en qué zonas concretas comienza a tener lugar la plastificación de los materiales.

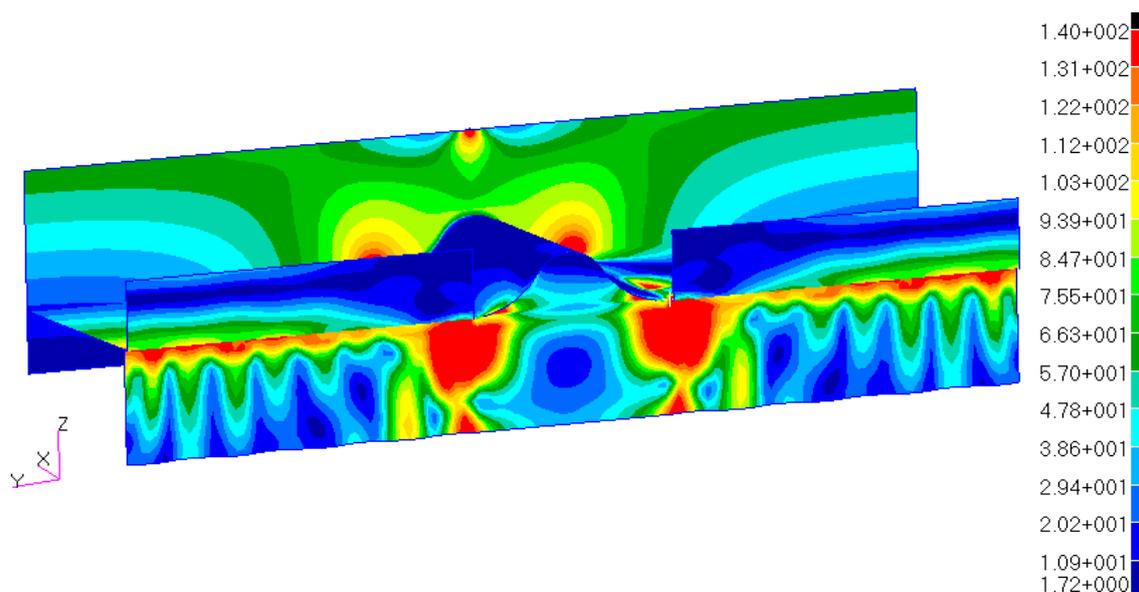


Figura 4. 63: Tensión de Von Mises [MPa] para el 35% de la carga térmica aplicada en el Diseño 4

Se puede comprobar que las zonas críticas son las de unión soldada entre la tapa del dilatador y el zambullidor y una pequeña zona correspondiente al comienzo de la curvatura de los extremos del dilatador.

Si mostramos el campo de tensiones sobre el faldón con el total de la carga térmica aplicada, ver figura 4.63, y restringiendo la tensión máxima del rango de tensiones al límite de fluencia del acero inoxidable, tendremos que se alcanza este valor de la tensión para prácticamente todo el faldón y parte de la tapa del dilatador.

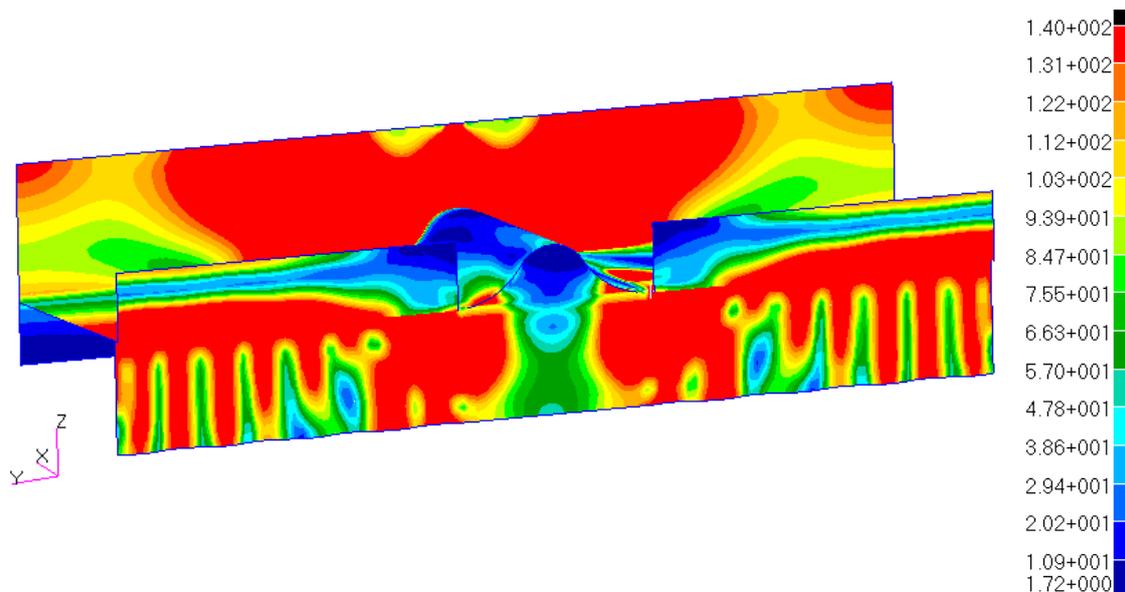
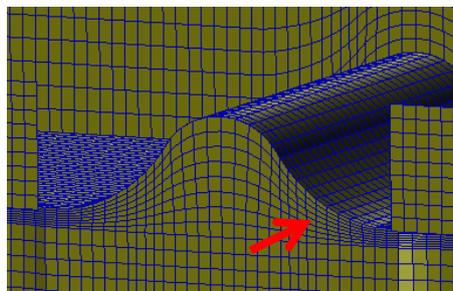


Figura 4. 64: Tensión de Von Mises [MPa] para el 100% de la carga térmica aplicada en el Diseño 4

Para los nodos localizados en las principales zonas de fallo de los dilatadores, figura 4.64 (a) se obtienen las gráficas de la figura 4.64 (b) y 4.65, donde se representan los valores de las tensiones y desplazamientos a medida que se incrementa la temperatura.

Se observa en la figura 4.64 que la evolución de la tensión en uno de estos nodos se corresponde con la típica gráfica resultante de un análisis no lineal con plastificación.

En el caso de este nodo, esta tensión de fluencia se alcanza antes de la aplicación del total de la carga, aproximadamente a 200 grados centígrados.



(a)

Figura 4. 65 (a): Principales zonas de fallo en el Diseño 4.

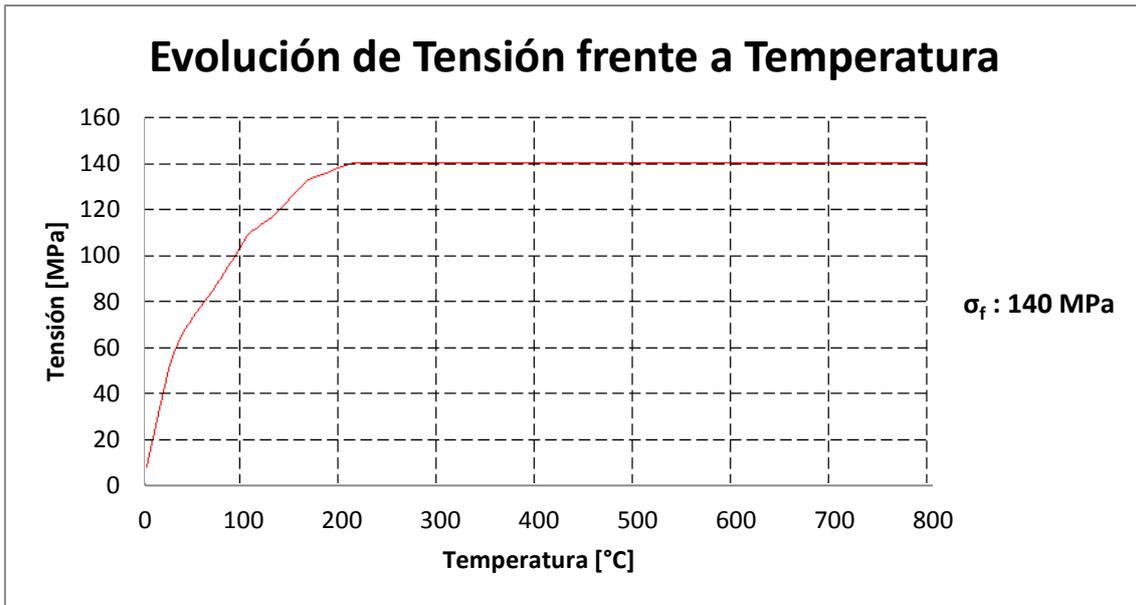


Figura 4. 66 (b): Evolución de tensiones de Von Mises [MPa] frente a la temperatura en el Diseño 4.

Por otra parte, en la gráfica de los desplazamientos longitudinales (en el eje Y) mostrada en la figura 4.65, se comprueba que, de la misma forma que ocurría en el caso del dilatador propuesto en el Diseño 2, los desplazamientos registrados en las zonas críticas de la tapa del mismo, son prácticamente insignificantes, puesto que no llega a alcanzar ni siquiera 1 mm.

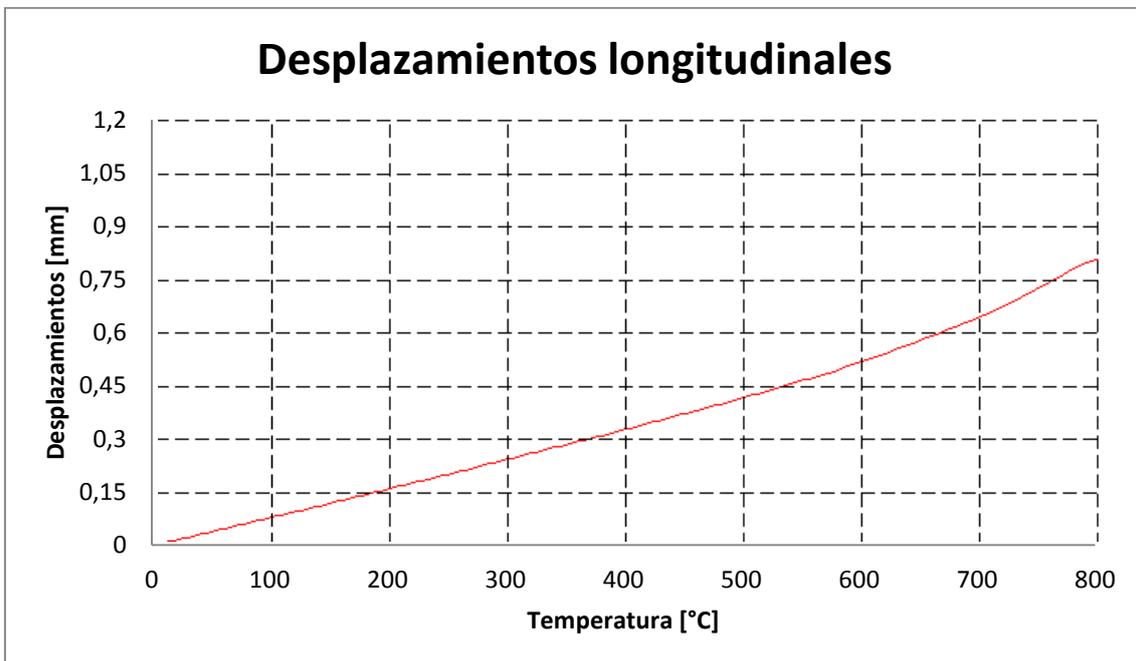


Figura 4. 67: Desplazamientos longitudinales [mm] en el Diseño 4

Esto nos permite confirmar que la geometría de este modelo es incapaz de absorber las dilataciones provocadas por los incrementos de temperatura que tienen lugar durante el proceso de cocción.

4.4.3.5 - Comparación de resultados de las propuestas de diseño

En la gráfica que se muestra en la figura 4.66 se puede ver la comparación de la tensión alcanzada en uno de los nodos de las zonas consideradas críticas frente a la carga de temperatura aplicada.

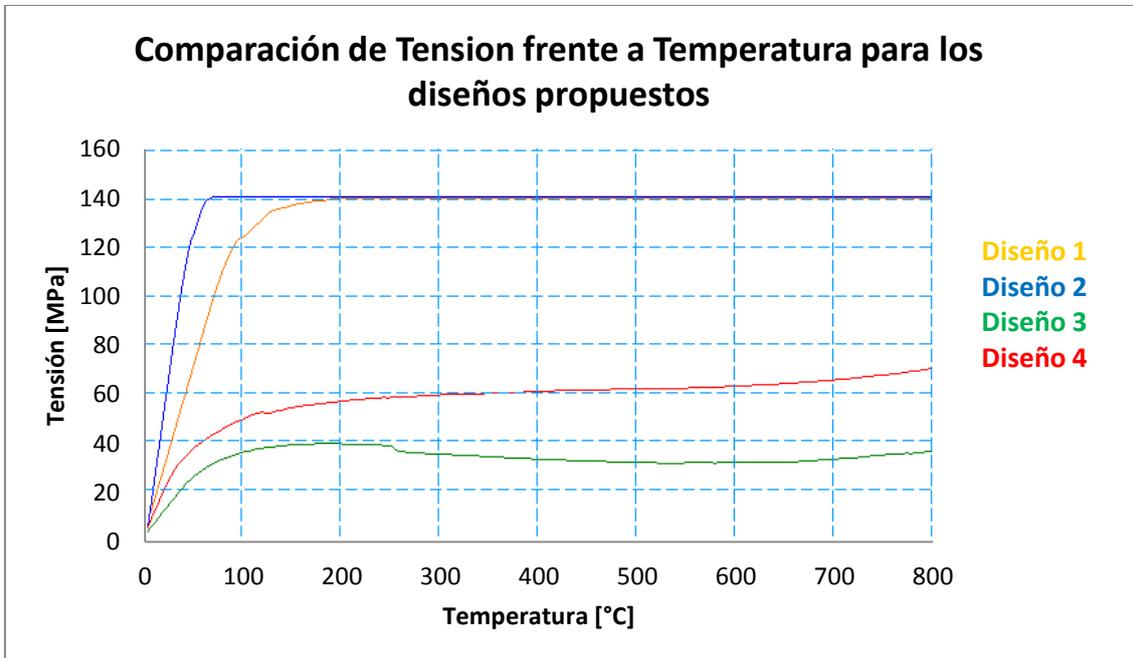


Figura 4. 68: Comparación de la evolución de las tensiones [MPa] en los diferentes diseños frente a la temperatura

Además, se incluye la figura 4.67, donde se puede ver el porcentaje de nodos que entran en fluencia en la tapa, considerada zona crítica de los dilatadores, para cada uno de los diseños propuestos.

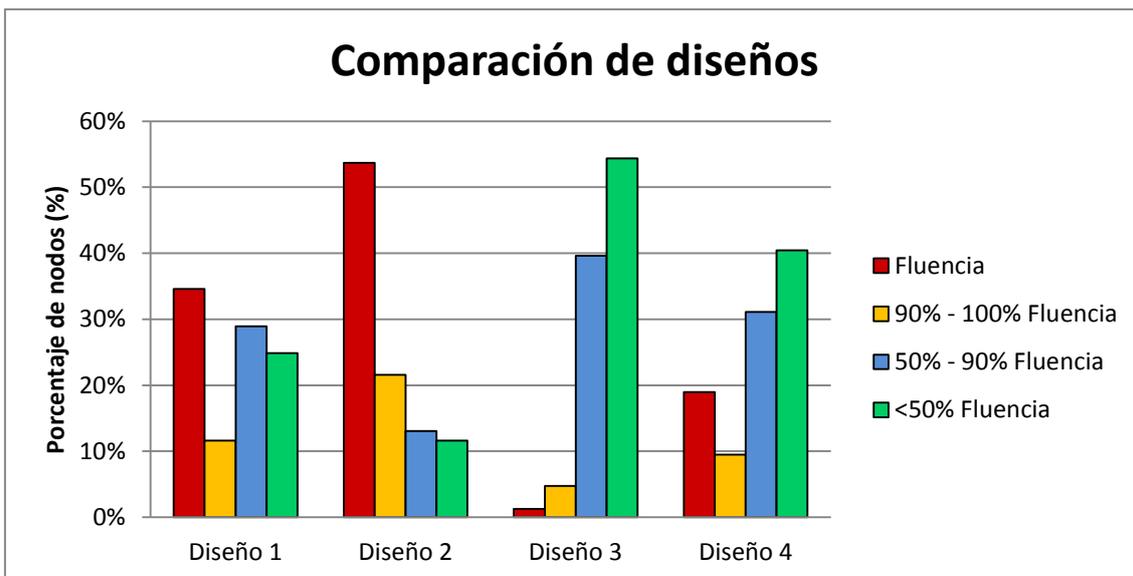


Figura 4. 69: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada diseño.

CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS. Comparación de resultados de propuestas de diseño

Con esta gráfica, se descartan los diseños 2 y 4, consistentes en la disminución de la altura debido a su baja capacidad de absorción de las dilataciones y la elevada tensión resultante tanto en la tapa como en la mayor parte del modelo.

Se puede observar que en la propuesta de diseño 3, los nodos que entrarían en fluencia no llegan a alcanzar el 1.5 %, mientras que en los que se encuentran instalados actualmente en los hornos de la planta, rondan el 35%.

Esto nos permite decantarnos por la solución propuesta en el **diseño 3**, puesto que además de cumplir con la función de dilatador absorbiendo las dilataciones del material debidas al incremento de temperatura, nos permitirá reducir las tensiones de fluencia en un 98% sobre la tapa, evitando así las fisuras y roturas sobre el mismo.

4.4.4 – Introducción de mejoras de Material

Además de las propuestas de mejora de diseño, se propondrán a continuación una serie de mejoras basadas en el cambio del material que constituye el elemento principal de los faldones objeto de estudio: los dilatadores.

Actualmente, y como bien se ha venido comentando a lo largo de todo este proyecto, tanto el cuerpo como la tapa del dilatador son de acero inoxidable refractario AISI 304.

Las mejoras que propondremos consistirán en mantener la geometría pero sustituir este acero AISI 304 por otros tres tipos distintos de aceros inoxidables, y por lo tanto con límites de fluencia diferentes, que permitirá ver el comportamiento del dilatador ante diferentes propiedades del material.

Los cambios del material se introducirán en el diseño actualmente instalado, así como en la mejora de diseño óptima analizada en capítulos anteriores, y únicamente en el cuerpo y tapa del dilatador.

En la tabla 4.11 se muestran los valores de las tensiones de fluencia y rotura para la temperatura media alcanzada en la zona del dilatador más afectada y que se encuentra en contacto directo con el interior del horno (aproximadamente 300 °C).

Tabla 4. 11: Tensiones de fluencia y rotura de los materiales propuestos

| Material | $\sigma_{\text{fluencia}} (20^{\circ}\text{C})$ | $\sigma_{\text{fluencia}} (300^{\circ}\text{C})$ | $\sigma_{\text{rotura}} (20^{\circ}\text{C})$ | $\sigma_{\text{rotura}} (300^{\circ}\text{C})$ |
|-----------------|---|--|---|--|
| AISI 304 | 205 | 140 | 515 | 501 |
| AISI 316 | 290 | 159 | 579 | 500 |
| AISI 309 | 290 | 212 | 621 | 501 |
| AISI 310 | 314 | 217 | 624 | 539 |

Con estos cambios de material se pretende, no sólo incrementar la capacidad del material para absorber las dilataciones asociadas a los incrementos de temperatura, sino también la tensión de fluencia y rotura, que permitirá un mejor funcionamiento y vida útil de los dilatadores.

En los puntos siguientes se muestran los resultados obtenidos de los análisis y la evolución de las tensiones en el dilatador con los distintos materiales introducidos para diferentes porcentajes de carga térmica aplicada.

4.4.4.1 -Material 1: Sustitución de AISI 304 por AISI 309

En la figura 4.68 se muestra una comparación de la evolución de tensiones en el dilatador para el AISI 309, cuyo límite de fluencia se alcanza a los **212 MPa**.

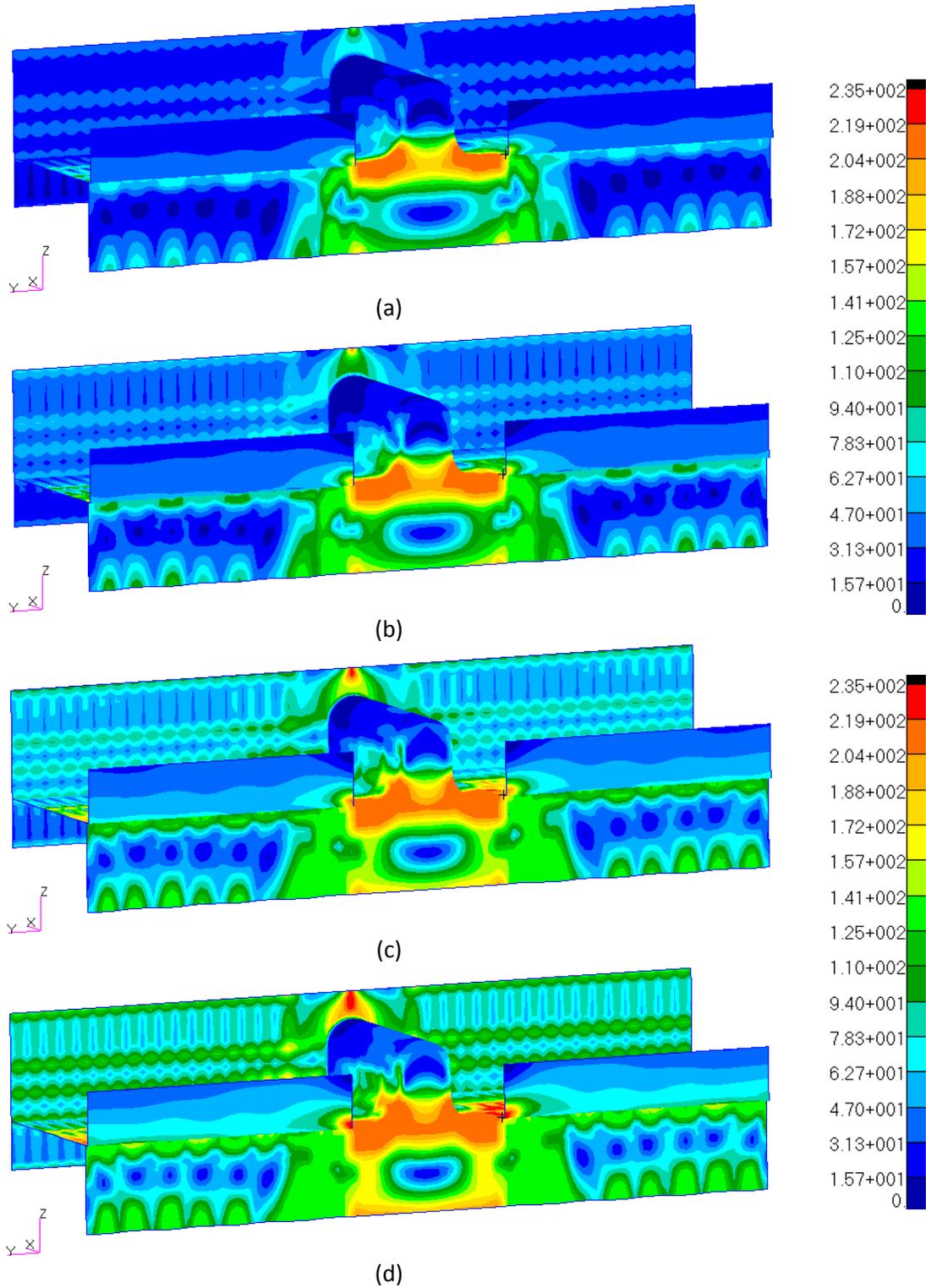


Figura 4. 70: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35% (a), 50% (b), 75% (c) y 100% (d), respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 309.

4.4.4.2 - Material 2: Sustitución de AISI 304 por AISI 316

En la figura 4.69 se muestra una comparación de la evolución de tensiones en el dilatador para el AISI 316, cuyo límite de fluencia se alcanza a los **159 MPa**.

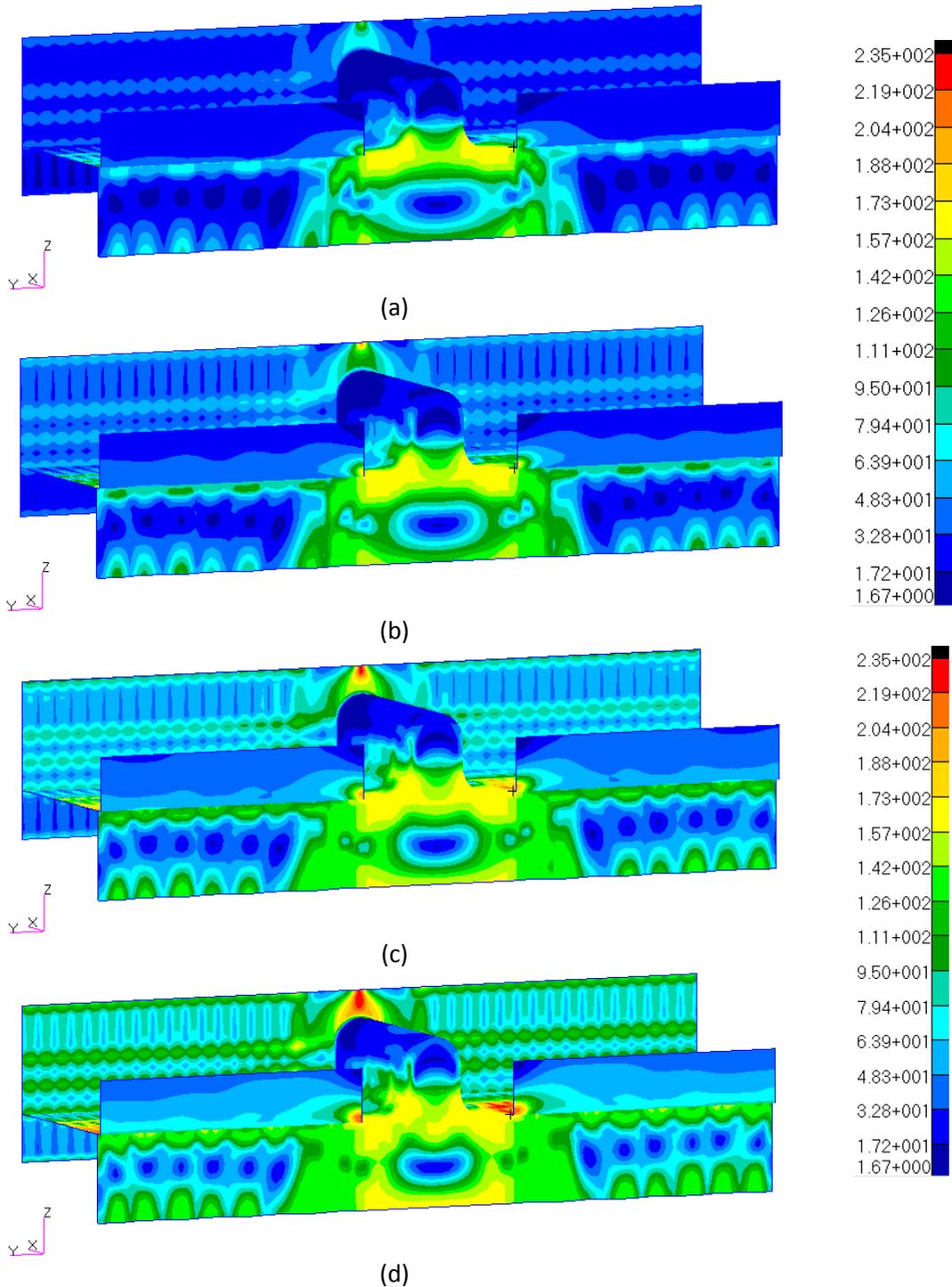


Figura 4. 71: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35%, 50%, 75% y 100%, respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 316.

4.4.4.3 - Material 3: Sustitución de AISI 304 por AISI 310

En la figura 4.70 se muestra una comparación de la evolución de tensiones en el dilatador para el AISI 316, cuyo límite de fluencia se alcanza a los **217 MPa**.

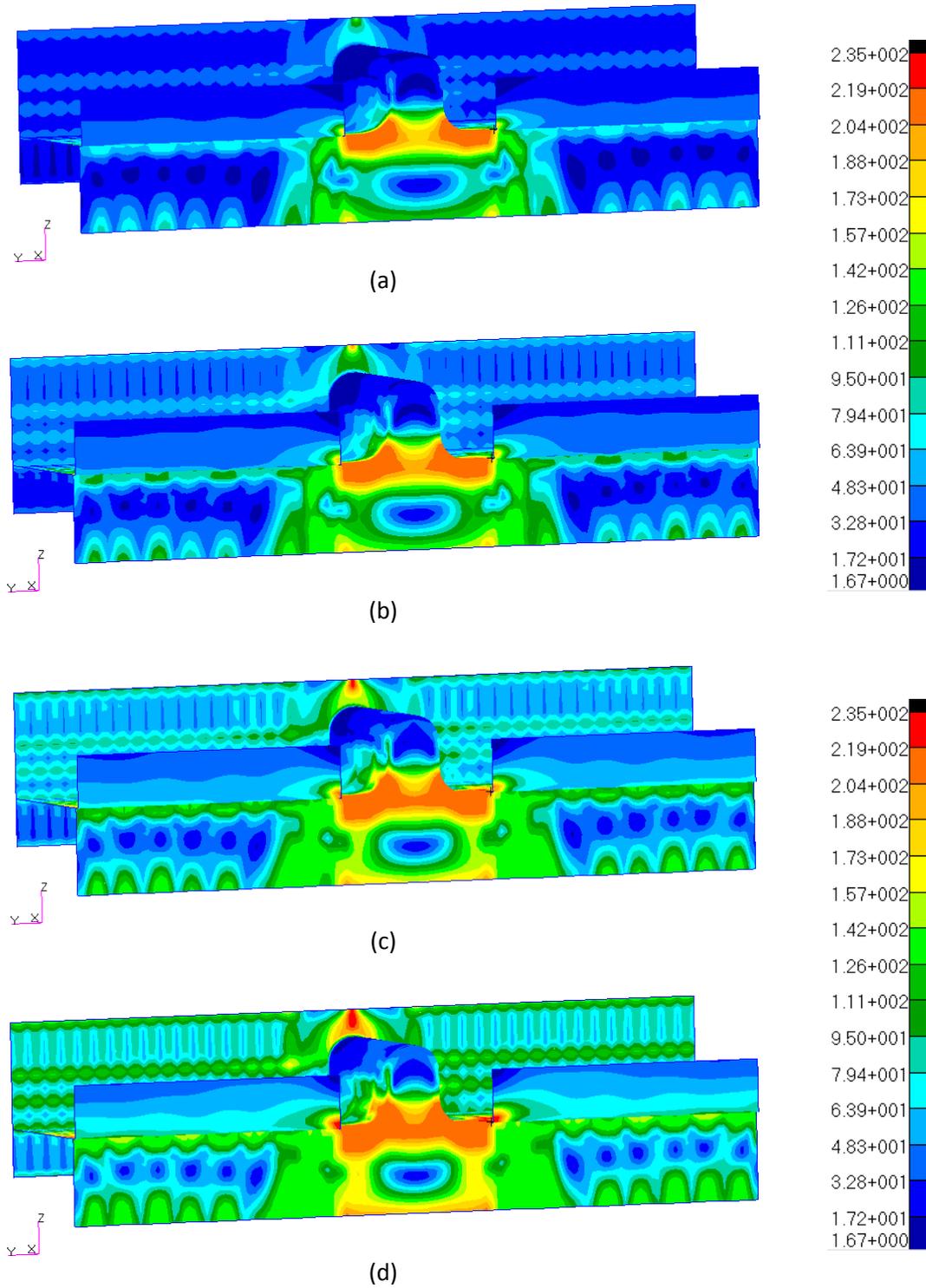


Figura 4. 72: Tensión de Von Mises [MPa] para un 35%, 50%, 75% y 100%, respectivamente, de la carga térmica aplicada sobre AISI 310.

4.4.4.4 – Comparación de Resultados

En la figura 4.71 realizaremos una comparación de cada uno de los materiales en los porcentajes de carga que se han considerado críticos. Uno de ellos será al 35%, pues es el momento en el que, para el material actual, se empieza a alcanzar el límite de fluencia. Nos interesa este caso para poder observar y comparar la respuesta del resto de materiales a esta temperatura aplicada.

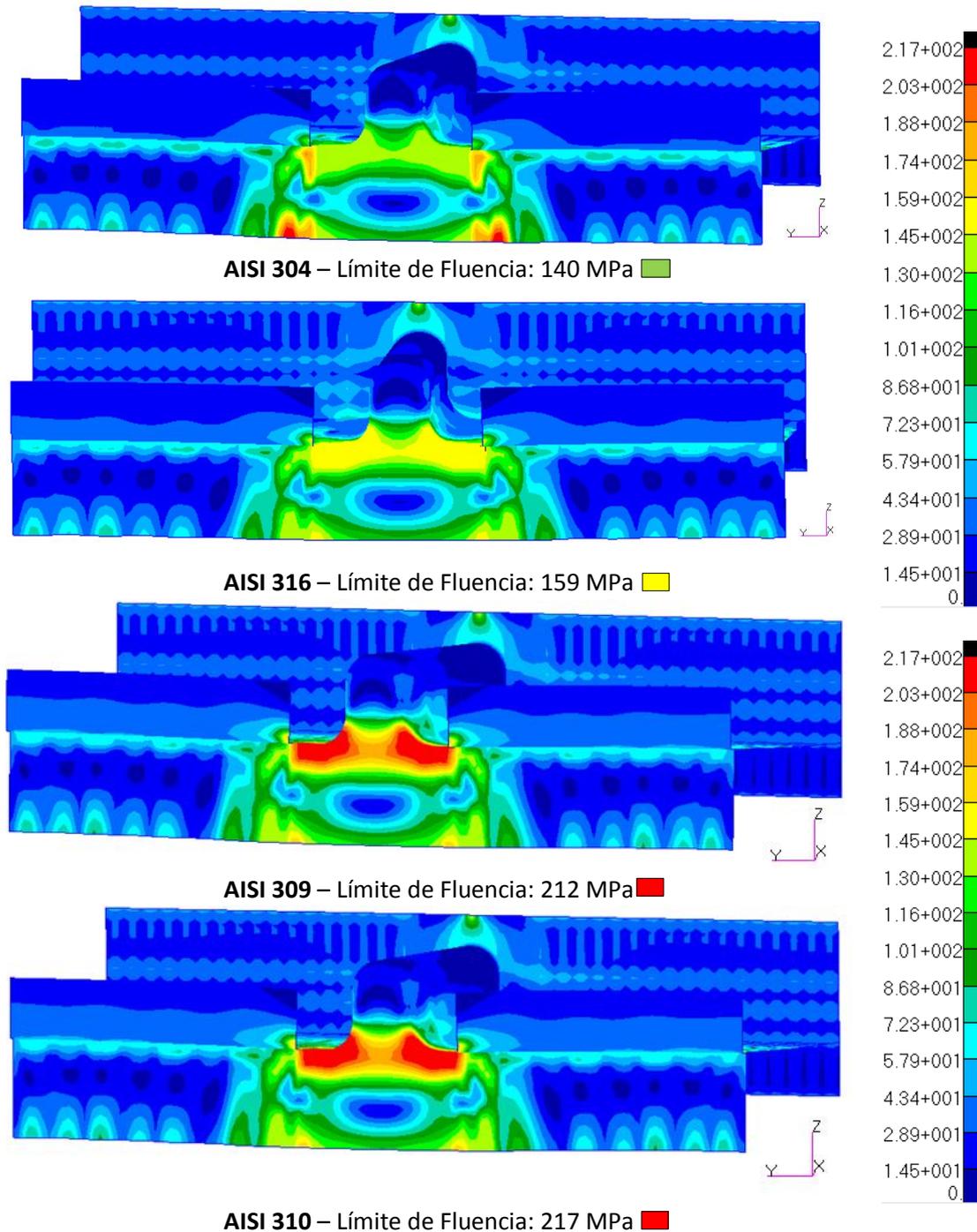


Figura 4. 73: Comparación de tensiones de Von Mises [MPa] para el 35% de carga térmica aplicada en los distintos materiales.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Comparación de resultados de las propuestas de material.*

Otro de los casos críticos es para el 100% de la carga térmica aplicada, puesto que es aquí donde mayor parte del dilatador entra en fluencia. La comparación entre las tensiones de Von Mises resultantes para cada uno de los materiales se puede ver en la figura 4.72.

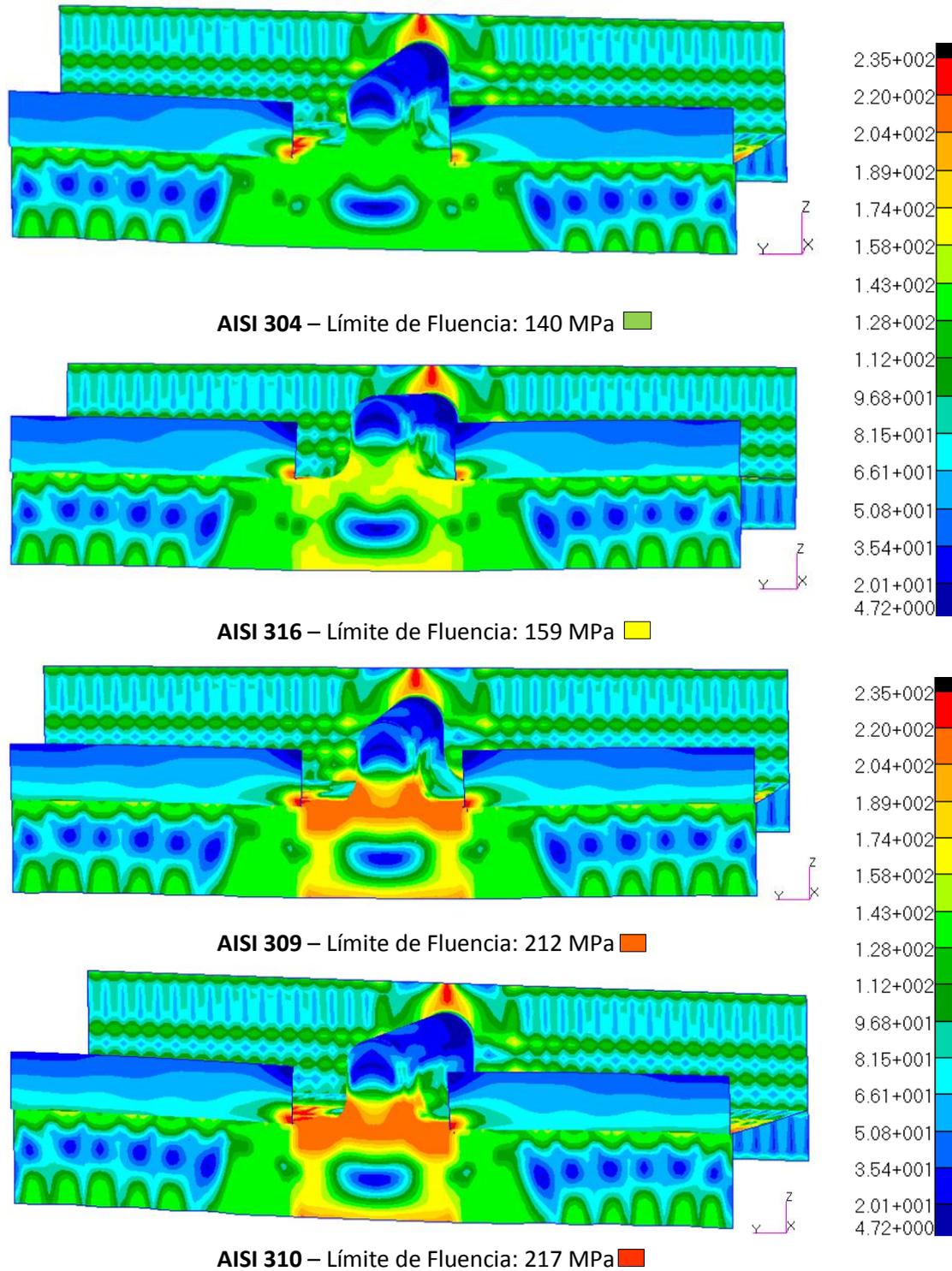


Figura 4. 74: Comparación de tensiones de Von Mises [MPa] para el 100% de carga térmica aplicada en los distintos materiales.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Comparación de resultados de las propuestas de material.*

En la figura 4.73 haremos una comparación entre el porcentaje de nodos que alcanza la fluencia en la tapa del dilatador, zona crítica del mismo, en cada uno de los modelos.

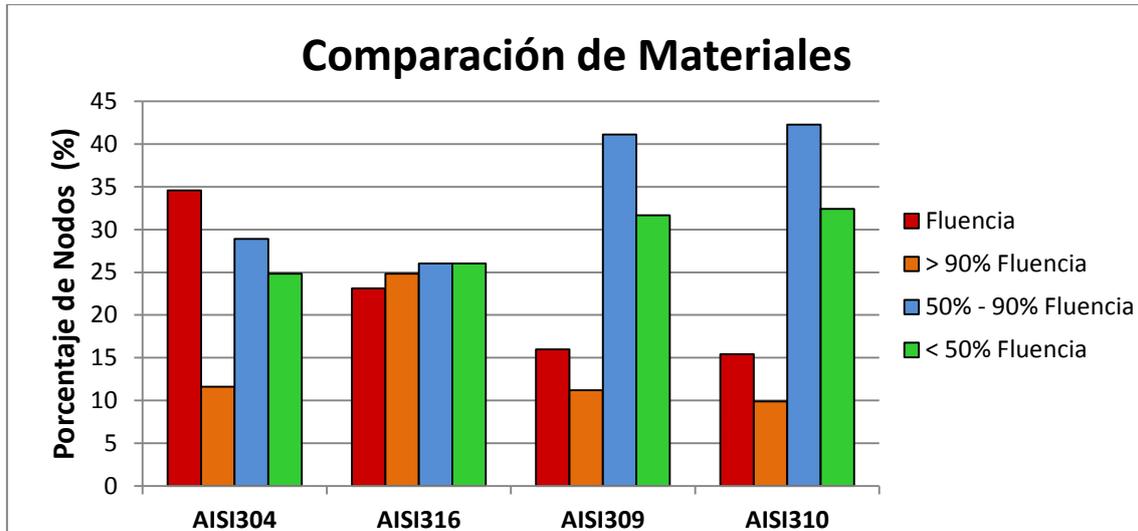


Figura 4. 75: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada material.

El número de nodos que entran en fluencia para el acero AISI 304, material del que inicialmente está formado el dilatador, ronda el 35 %, mientras que para un acero AISI 310 apenas se supera el 15 %.

De sustituir el material actual, AISI 304, por la mejor de las nuevas propuestas, acero inoxidable AISI 310, se llegaría a reducir la tensión, y por lo tanto reducir el número de nodos que entrasen en fluencia y consecuentemente provocasen el fallo del material, en algo más de un 50%.

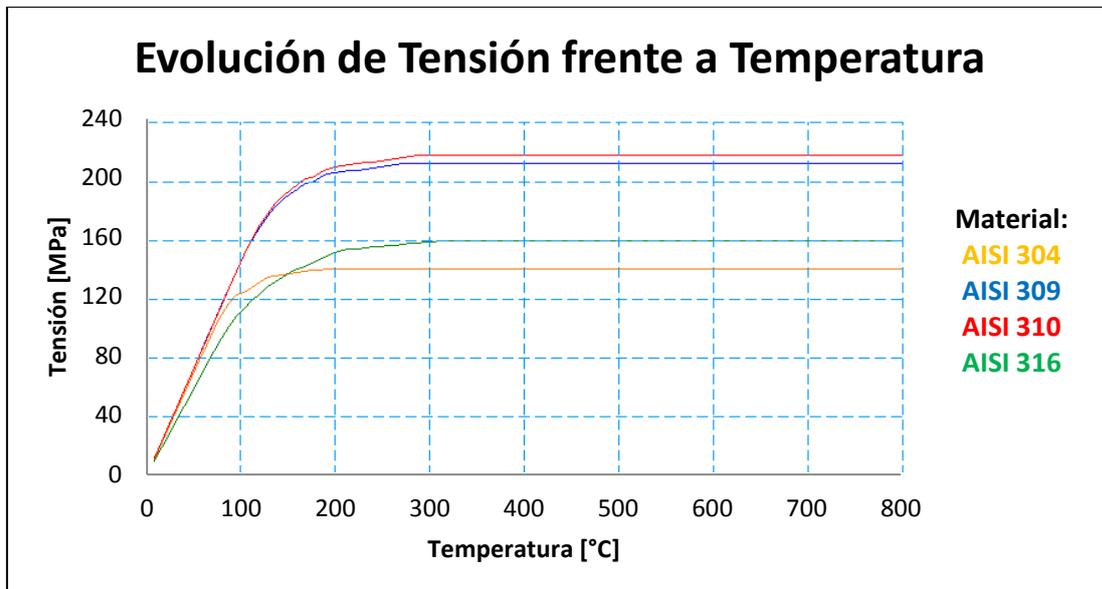


Figura 4. 76: Gráfico comparativo de tensiones de Von Mises [MPa] y llegada al límite de fluencia para cada material.

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Comparación de resultados de las propuestas de material.*

En la gráfica mostrada en la figura 4.74, se puede ver la respuesta de uno de los nodos críticos de la pieza según el material y el momento de entrada en fluencia del mismo, permitiendo así determinar el material óptimo para este modelo que, en este caso, sería el **AISI 310**.

4.4.5 – Conclusiones

Tras haber realizado el análisis por elementos finitos de las propuestas de diseño y material, y haber observado en qué caso se obtienen las menores tensiones y deformaciones para las zonas críticas consideradas con anterioridad y seleccionadas por haber sido comprobada experimentalmente su rotura, ver figura 4.75, se seleccionan como posibles soluciones al problema planteado a lo largo de este proyecto, dos de los diseños analizados.

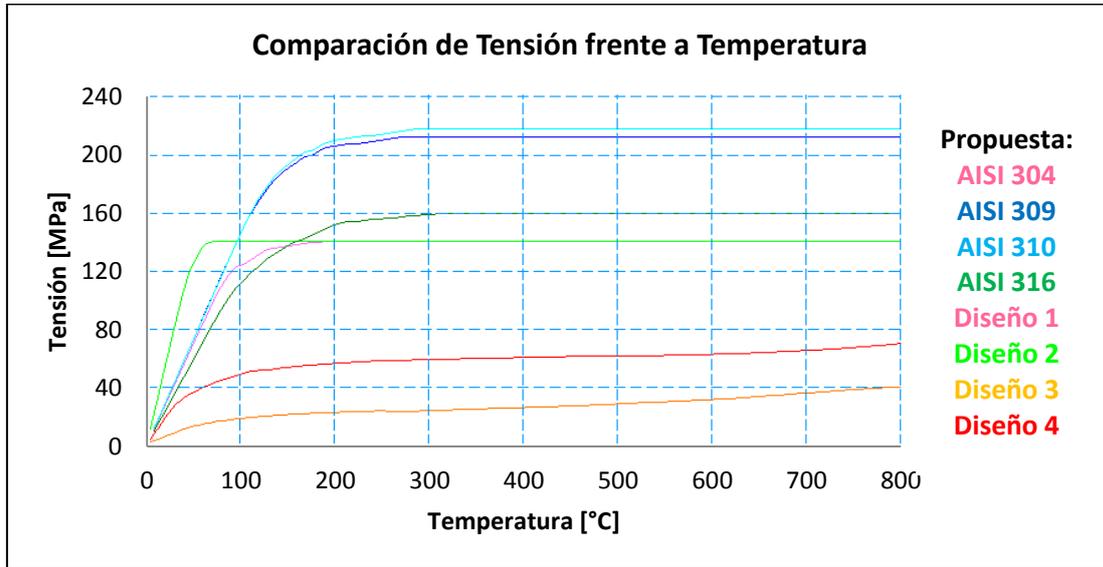


Figura 4. 77: Comparación de tensiones de Von Mises frente a temperatura para cada una de los diseños y materiales propuestos en el proyecto.

Las soluciones elegidas son la **propuesta de diseño 3**, introducción de mejora de silicona en el dilatador, y la **propuesta de cambio de material 3**, sustituir el acero inoxidable AISI 304 del dilatador y su correspondiente tapa, por un acero inoxidable refractario AISI 310.

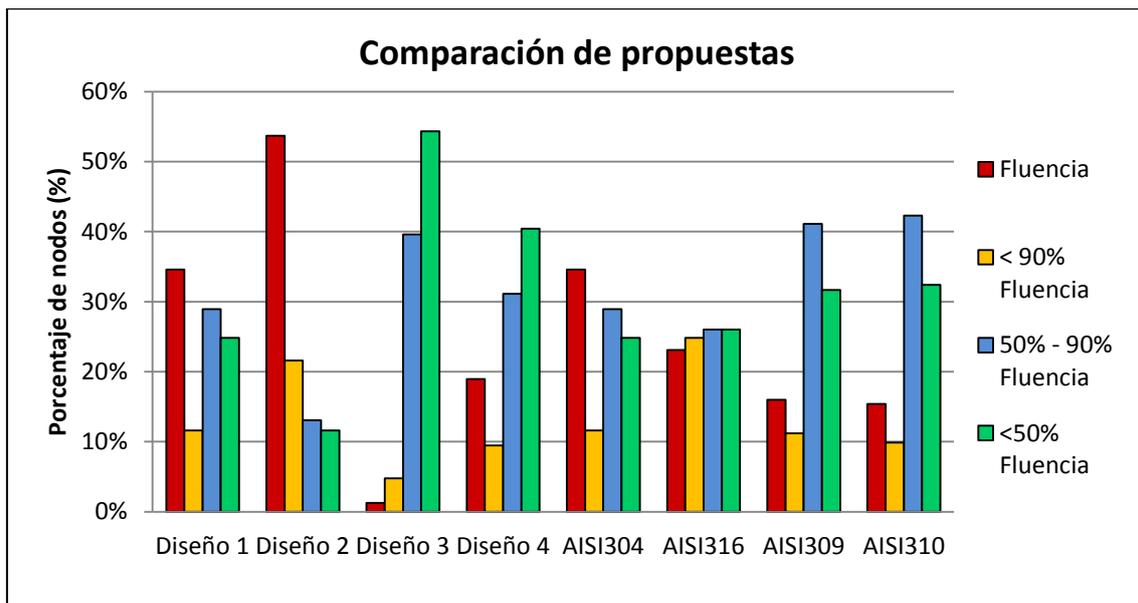


Figura 4. 78: Porcentaje de nodos de la tapa del dilatador que entran en fluencia para cada propuesta

*CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS.
Conclusiones.*

En el caso de elegir la propuesta de cambio de **material 3**, se conseguiría reducir en algo más de un 50% el número de roturas en la tapa del dilatador.

Por otra parte, con la introducción del **Diseño 3** en los hornos, conseguiríamos evitar prácticamente cualquier rotura en la tapa del dilatador, puesto que las tensiones disminuyen de tal forma que apenas se llegaría a fluencia en las zonas críticas del mismo.

Con estos resultados se ha decidido, con el consentimiento de SGL Carbon, probar experimentalmente la **propuesta de diseño 3** en uno de los hornos de cocción de la planta, cuya instalación se describe en el capítulo 5, por lo que este modelo se encuentra actualmente en fase de pruebas.

5 – INSTALACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO 3 EN SGL CARBON

5 – Instalación del Diseño 3 en SGL Carbon.

Una vez hecho el estudio de tensiones y haber sacado la conclusión de que el modelo óptimo es el propuesto en el Diseño 3, se procede a la reparación del faldón e instalación de este diseño.

Inicialmente, se corta y sustituye el tramo de faldón simple por el perfil del dilatador, que irá soldado a la chapa del horno y, por los laterales, a la pletina sobre la que se apoya la pared de ladrillos refractarios, como se puede apreciar en la figura 5.1.



Figura 5. 1: Perfil estructural que actúa como dilatador

Una vez colocado el dilatador, se suelda la pletina que evitará la salida de los compuestos volátiles generados durante la cocción de los electrodos.



Figura 5. 2: Pletina soldada a la chapa del horno

Como bien se ha comentado en la descripción del diseño, ésta se suelda a la chapa del horno y a la tapa del dilatador, quedando los laterales completamente libres de restricciones.

Una vez la pletina está soldada a la chapa del horno, como se puede ver en la figura 5.3, se rellena el hueco entre la pletina y el dilatador con lana de roca, que ejercerá de material aislante del calor y evitando la acumulación y calentamiento de gases en el interior.



Figura 5. 3: Colocación de lana de roca en el interior del dilatador

Posteriormente se coloca la tapa, que irá soldada a la chapa ondulada y al frente de la pletina.

El contorno de la tapa coincidente con el dilatador, que en modelos anteriores se soldaba, irá en este caso sin ningún tipo de restricción, como se ve en la figura 5.4, y por lo tanto tendrá libertad de movimiento.



Figura 5. 4: Instalación de la tapa del dilatador

Por último, la holgura existente entre la pletina colocada bajo el dilatador y el resto del faldón, se sellará con la silicona resistente a altas temperaturas seleccionada, ver imágenes de la figura 5.5.



(a)



(b)

Figura 5. 5: Sellado de las juntas entre la pletina y el tramo de faldón con silicona (a) y soldadura frontal de la tapa del dilatador con la pletina.

Actualmente, este diseño se encuentra instalado en uno de los hornos de cocción de solera móvil de la planta, concretamente en el Horno 5, por lo que se encuentra en fase de pruebas y a la espera de que los resultados experimentales confirmen la reducción de roturas y fisuras en el faldón como se comprobó en los análisis mediante el método de los elementos finitos.

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO
Coste de instalación de las propuestas

6.1 - Coste de instalación de las propuestas

Tabla 6. 1: Tabla de presupuestos para la instalación de la propuesta de diseño 3 en los hornos de cocción

| Concepto | Unidades | Precio | IMPORTE |
|--|----------|----------------------------------|-------------|
| MATERIALES | | | |
| Dilatador AISI 304 <i>Perfil metálico en acero inoxidable AISI 304 correspondiente a elemento dilatador y tapa (Según planos).</i> | 6 Uds. | 62,00 €/ud | 372,00 € |
| Sellante de Silicona <i>Recipientes de Silicona Soudal Silrub HT° - N (310 ml/ud).</i> | 3 Uds. | 8,00 €/ud | 24,00 € |
| Fibra Cerámica <i>Sacos de fibra cerámica Cerafiber-520 (20 Kg/ud).</i> | 1 Uds. | 48,80 €/ud | 48,80 € |
| CALDERERÍA | | | |
| Soldadura y montaje <i>Mano de obra correspondiente a la instalación del diseño dilatador (precio por unidad instalada).</i> | 6 Uds. | 160,00 €/ud | 960,00 € |
| COSTE TOTAL POR HORNO | | | 1.404,80 € |
| COSTE TOTAL DE LA INSTALCIÓN EN PLANTA (12 Hornos) | | | |
| IMPORTE DE EJECUCIÓN MATERIAL | | | 16.857,60 € |
| | | GASTOS GENERALES (13%) | 2.191,49 € |
| | | BENEFICIO INDUSTRIAL (6%) | 1.011,46 € |
| IMPORTE DE EJECUCIÓN | | | 20.060,54 € |
| | | I.V.A (21%) | 4.212,71 € |
| IMPORTE DE CONTRATA | | | 24.273,26 € |

El importe de contrata del proyecto asciende a **24.273,26 €** (veinticuatro mil doscientos setenta y tres con veintiséis euros).

PRESUPUESTO
Coste de instalación de las propuestas

Tabla 6. 2: Tabla de presupuestos para la instalación de la propuesta de cambio de material 3 en los hornos

| Concepto | Unidades | Precio (€) | IMPORTE |
|--|----------|-------------|-------------|
| MATERIALES | | | |
| Dilatador AISI 304 <i>Perfil metálico en acero inoxidable AISI 304 correspondiente a elemento dilatador y tapa (Según planos).</i> | 6 Uds. | 132,33 €/ud | 793,98 € |
| Fibra Cerámica <i>Sacos de fibra cerámica Cerafiber-520 (20 Kg/ud).</i> | 1 Uds. | 48,80 €/ud | 48,80 € |
| CALDERERÍA | | | |
| Soldadura y montaje <i>Mano de obra correspondiente a la instalación del diseño dilatador (precio por unidad instalada).</i> | 6 Uds. | 160,00 €/ud | 960,00 € |
| COSTES POR HORNO | | | 1.802,78 € |
| COSTE DEL TOTAL DE LA INSTALACIÓN EN PLANTA (12 Hornos) | | | |
| IMPORTE DE EJECUCIÓN MATERIAL | | | 21.633,36 € |
| GASTOS GENERALES (13%) | | 2.812,34 € | |
| BENEFICIO INDUSTRIAL (6%) | | 1.298,00 € | |
| IMPORTE DE EJECUCIÓN | | | 25.743,70 € |
| I.V.A (21%) | | 5.406,18 € | |
| IMPORTE DE CONTRATA | | | 31.149,88 € |

El importe de contrata del proyecto asciende a **31.149,88 €** (*treinta y un mil ciento cuarenta y nueve con ochenta y ocho euros*)

6.2 - Plazo de recuperación de la inversión

El plazo de recuperación de una inversión es un criterio estático de valoración de inversiones utilizado por las empresas para seleccionar un determinado proyecto sobre la base de cuánto tiempo se tardará en recuperar la inversión inicial.

Este criterio no considera los flujos de caja que se generan una vez recuperada la inversión y no actualiza los flujos de caja, por lo que no tiene en cuenta el valor temporal del dinero por lo que, si bien el análisis es más sencillo, no es tan completo como si se realizase un método de selección dinámico, como podría ser el VAN o el TIR.

SGL Carbon se ha basado en este tipo de análisis para poder conocer el plazo de recuperación de la inversión que supondría la instalación de las propuestas de mejoras desarrolladas a lo largo del proyecto, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis.

AÑO 2015

- Se parte de que todos los hornos en la planta se encuentran sin ningún tipo de dilatador instalado, de manera que únicamente tendríamos el faldón original del horno.
- Los mantenimientos ordinarios consisten en soldar aquellas zonas del faldón que se encuentren en mal estado.
- En cada gran mantenimiento de los hornos se instalan los dilatadores necesarios (6 por cada horno) y se reparan las fisuras en el faldón.

AÑO 2016

- Se realizarán los mismos mantenimientos ordinarios que en 2015 y consistirán únicamente en la reparación de la silicona sellante entre las uniones.
- En cada gran mantenimiento se repararán las tapas de los dilatadores, soldando las zonas de curvatura de aquellos en los que haya algún tipo de daño, y las juntas de dilatación con silicona. Se hace esta suposición tras haber instalado y comprobado experimentalmente que únicamente se encuentran en mal estado esas zonas mencionadas.

El hecho de considerar que tras la instalación de la propuesta de diseño en los hornos se realizarán los mismos mantenimientos ordinarios que en el año 2015 es una medida tomada desde un punto de vista pesimista, puesto que los análisis realizados muestran un resultados mucho mejores que los observados experimentalmente en los hornos originales.

En las tablas se pueden ver los costes de mantenimiento realizados en el año 2015 y los esperados para el año 2016, así como el plazo de recuperación de la inversión hecha para la instalación de la propuesta de diseño.

PRESUPUESTO
Plazo de recuperación de la inversión

Tabla 6. 3: Costes de mantenimiento y plazo de recuperación de la inversión para la propuesta de diseño 3.

| AÑO 2015 | | | |
|---|-------------------------------|-------------|-------------------|
| Órdenes de trabajo | Unidades (Órdenes de trabajo) | Importe (€) | |
| | 147 | - | |
| Mantenimiento ordinario | - | 16003,70 € | |
| Grandes mantenimientos | | | |
| Mano de Obra | Precio (€/Ud.) | Unidades | Importe (€) |
| Enero | 160,00 €/Ud. | 0 | 0,00 € |
| Febrero | 180,00 €/Ud. | 0 | 0,00 € |
| Marzo | 185,00 €/Ud. | 6 | 1110,00 € |
| Mayo | 185,00 €/Ud. | 2 | 370,00 € |
| Junio | 185,00 €/Ud. | 3 | 555,00 € |
| Julio | 185,00 €/Ud. | 8 | 1480,00 € |
| Agosto | 185,00 €/Ud. | 2 | 370,00 € |
| Noviembre | 185,00 €/Ud. | 3 | 555,00 € |
| Costes de Grandes Mantenimientos por horno | | | 4440,00 € |
| TOTAL COSTES DE MANTENIMIENTO (12 HORNOS) | | | 20443,70 € |

| AÑO 2016 | | | |
|---|----------------|----------|------------------|
| Mantenimiento ordinario (reposición de silicona) | Precio (€/Ud.) | Unidades | Importe (€) |
| | 24,00 €/Ud. | 147 | 3528,00 € |
| Grandes mantenimientos | | | |
| Mano de obra de reparación de dilatadores | Precio (€/Ud.) | Unidades | Importe (€) |
| | 100,00 €/Ud. | 1 | 100,00 € |
| Silicona | 8,00 €/Ud. | 3 | 24,00 € |
| Costes de Grandes Mantenimientos por horno | | | 124,00 € |
| TOTAL COSTES DE MANTENIMIENTO (12 HORNOS) | | | 5016,00 € |

| | |
|--------------------------------|------------|
| AHORRO | 14329,78 € |
| COSTE INSTALACIÓN | 24275,26 € |
| PERÍODO DE RECUPERACIÓN | 1,70 años |

El período de recuperación de la inversión realizada para la instalación de la propuesta de diseño 3 es de, aproximadamente, **1 año y 8 meses**.

PRESUPUESTO
Plazo de recuperación de la inversión

Tabla 6. 4: Costes de mantenimiento y período de retorno de la inversión para la propuesta de material 3

| AÑO 2015 | | | |
|---|----------------|----------|-------------|
| Órdenes de trabajo | Unidades | | Importe (€) |
| | 147 | | - |
| Mantenimientos ordinarios | - | | 16003,70 € |
| Grandes mantenimientos | | | |
| Mano de Obra | Precio (€/Ud.) | Unidades | Importe (€) |
| Mes 1 | 160,00 € | 0 | 0,00 € |
| Mes 2 | 180,00 € | 0 | 0,00 € |
| Mes 3 | 185,00 € | 6 | 1110,00 € |
| Mes 4 | 185,00 € | 2 | 370,00 € |
| Mes 5 | 185,00 € | 3 | 555,00 € |
| Mes 6 | 185,00 € | 8 | 1480,00 € |
| Mes 7 | 185,00 € | 2 | 370,00 € |
| Mes 8 | 185,00 € | 3 | 555,00 € |
| Costes de Grandes Mantenimientos por horno | | | 4440,00 € |
| TOTAL COSTES DE MANTENIMIENTO (12 HORNOS) | | | 20443,70 € |

Para el año 2016, y según los resultados en tensiones obtenidos tras los análisis, se ha hecho la hipótesis de que los mantenimientos ordinarios se reducirán a la mitad, y por lo tanto los costes de mantenimiento también serán la mitad, de tal forma que en lugar de las 147 órdenes de trabajo que se realizaron en 2015, se realizarán aproximadamente 74.

| AÑO 2016 | | | |
|---|----------------|----------|-------------|
| Órdenes de trabajo | Unidades | | Importe (€) |
| | 74 | | - |
| Mantenimientos ordinarios | - | | 7454,30 € |
| Grandes mantenimientos | | | |
| Mano de obra de reparación de dilatadores | Precio (€/Ud.) | Unidades | Importe |
| | 100,00 € | 1 | 100,00 € |
| Costes de Grandes Mantenimientos por horno | | | 100,00 € |
| TOTAL COSTES DE MANTENIMIENTO (12 HORNOS) | | | 8654,30 € |

| | |
|---------------------------|------------|
| AHORRO | 11789,40 € |
| COSTE INSTALACIÓN | 31149,55 € |
| PERÍODO DE RETORNO | 2,60 años |

El período de recuperación de la inversión realizada para la instalación de la propuesta de material 3 es de, aproximadamente, **2 año y 7 meses**.

PRESUPUESTO
Plazo de recuperación de la inversión

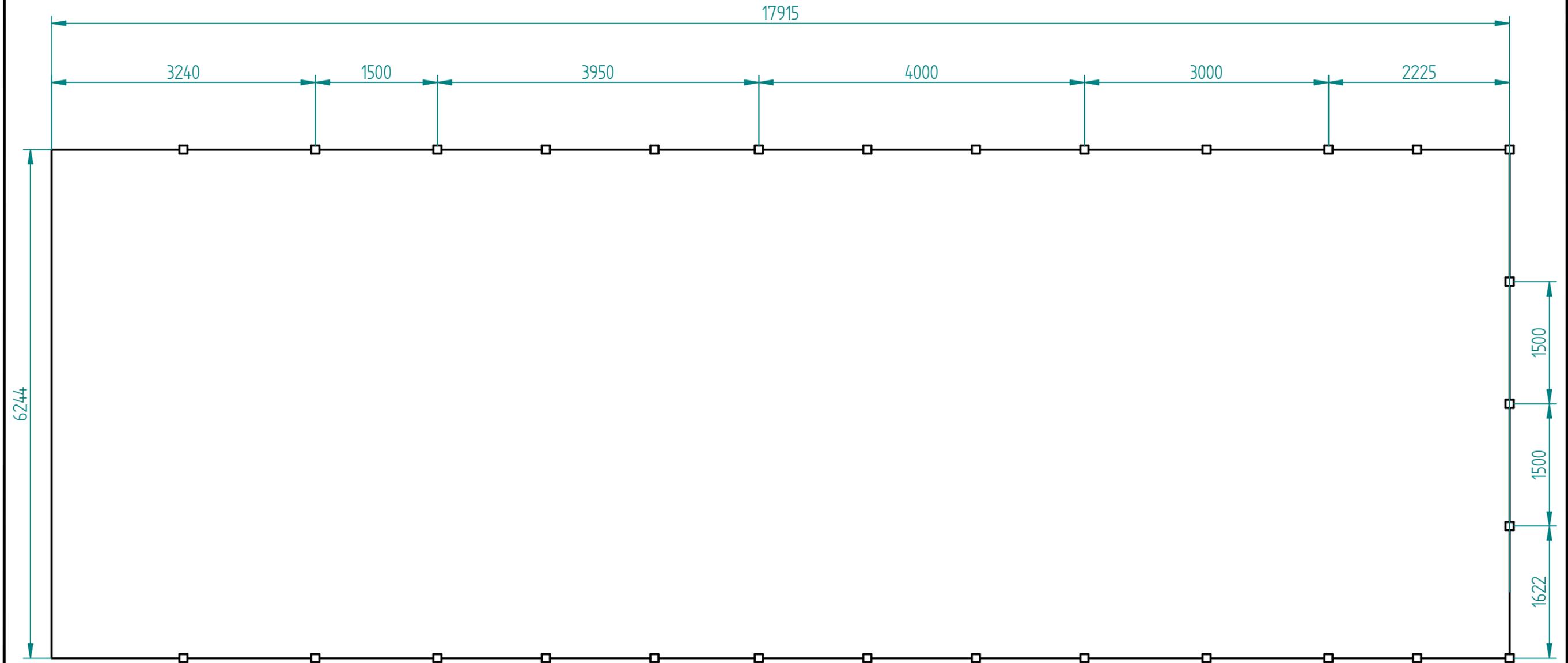
Habiendo calculado los costes de mantenimiento en cada uno de las propuestas, y teniendo en cuenta el coste de instalación de las mismas, se ha podido calcular el período de retorno para cada caso, permitiéndonos así determinar qué inversión es la más adecuada (ver tabla 6.5).

Tabla 6. 5: Comparación de los períodos de retorno de las inversiones para cada propuesta

| | Propuesta de Diseño | Propuesta de Material |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Período de retorno | 1 año y 8 meses | 2 años y 7 meses |

Existe aproximadamente un año de diferencia en el período de retorno entre cada una de las propuestas, siendo menor la correspondiente a la propuesta de diseño, por lo que ha sido ésta la que, inicialmente, se ha decidido instalar en SGL Carbon.

PLANOS



UNIVERSIDADE DA CORUÑA
ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR

TÍTULO:
APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE
FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNO DE
SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES

PLANO Nº:
1

AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO

FIRMA:

ESCALA: 1:50

PLANO:
HORNO DE COCCIÓN. DISTRIBUCIÓN DE PILARES EN PLANTA

FECHA: FEBRERO 2016

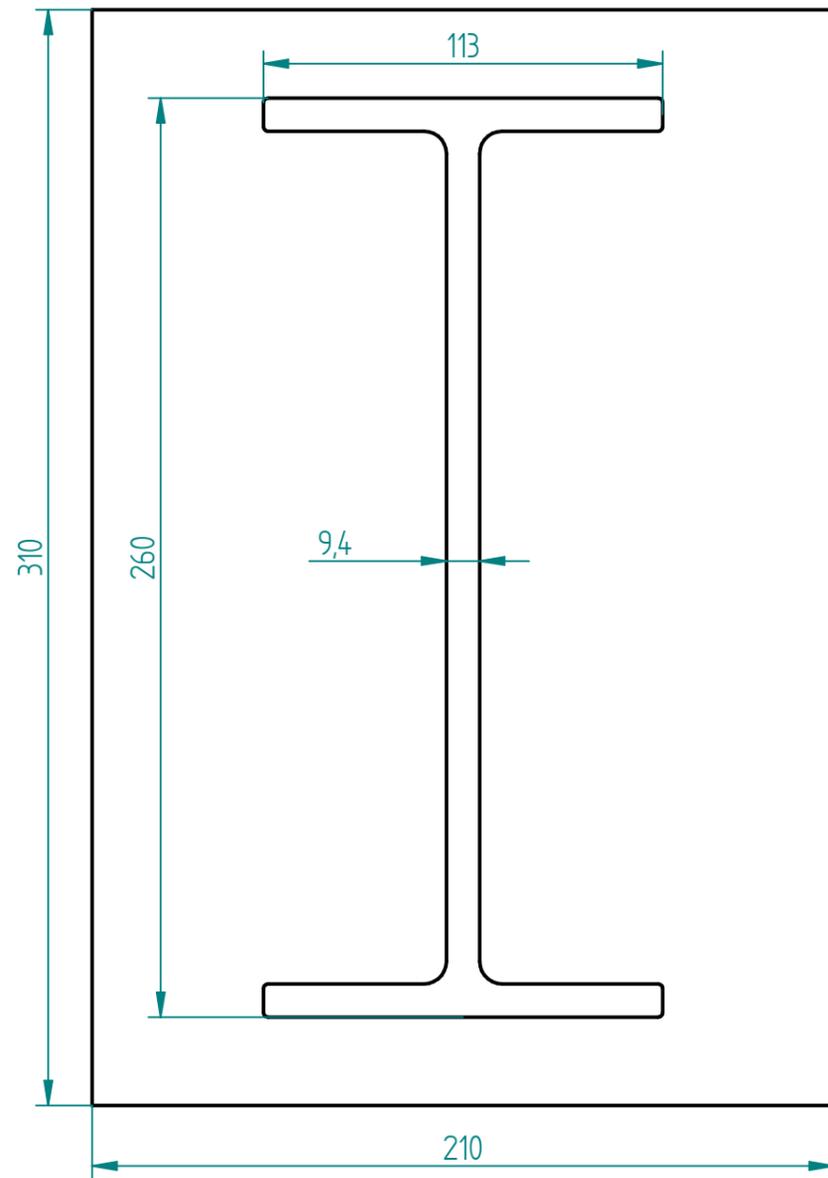


FIGURA 1

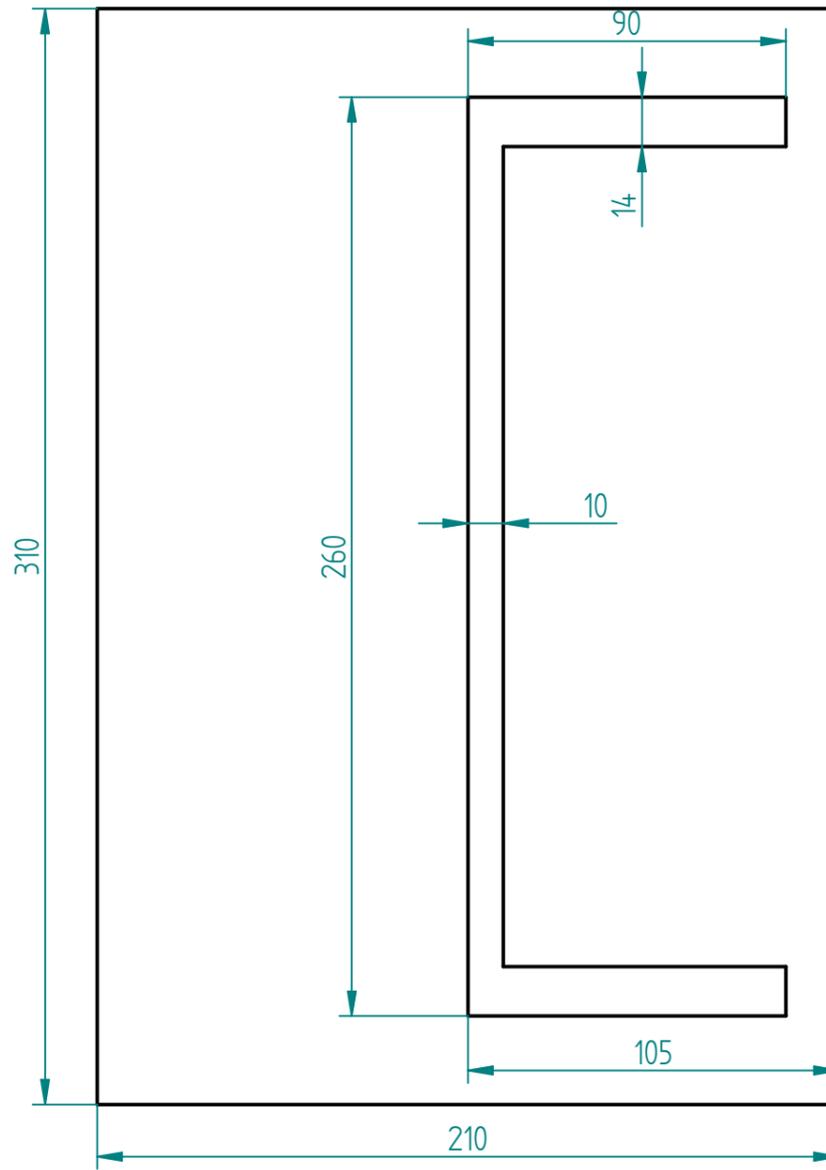


FIGURA 2

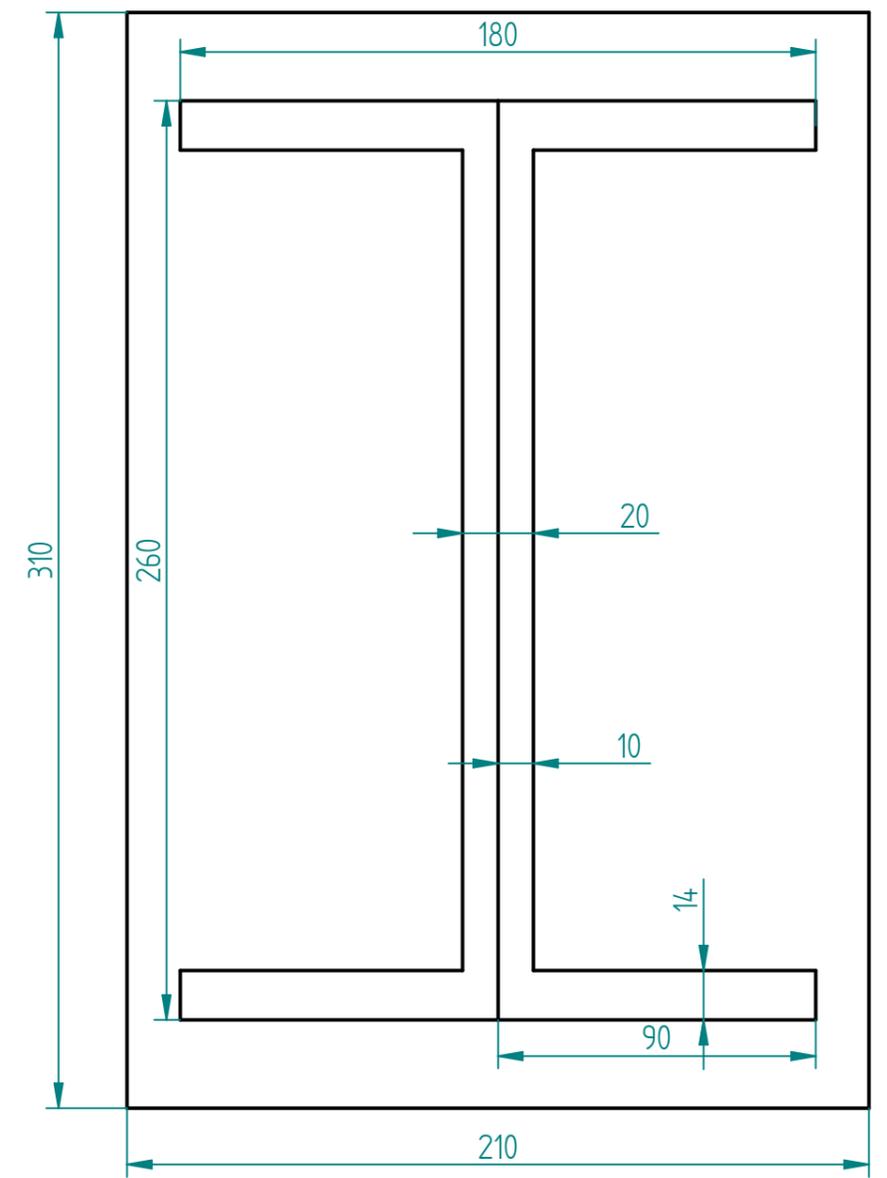
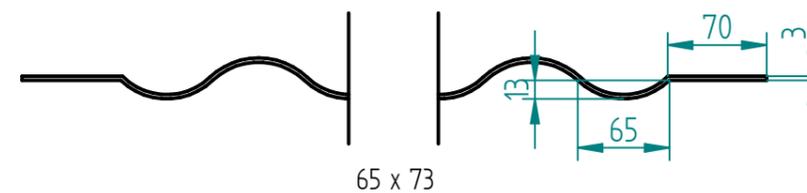
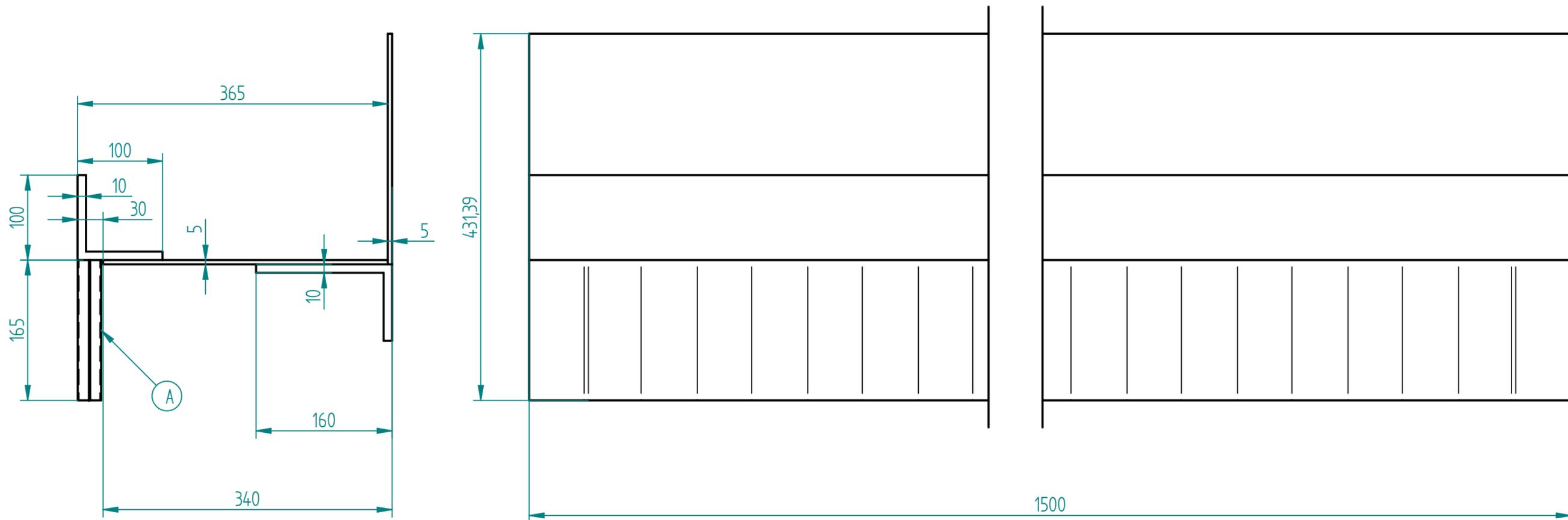


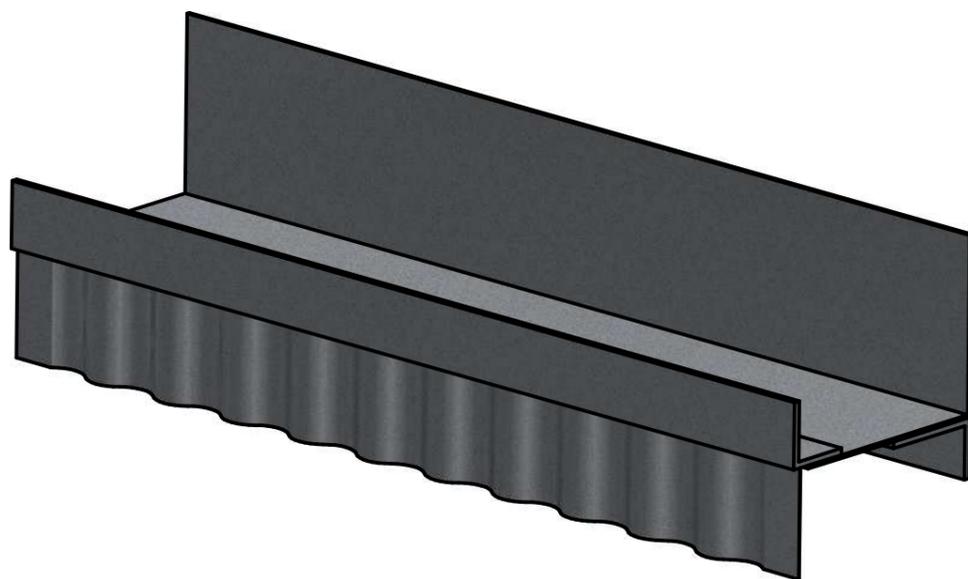
FIGURA 3

| PERFILES | |
|----------|-----------------------------|
| Figura 1 | IPN 260 |
| Figura 2 | UPN 260 |
| Figura 3 | Pilar Doble (Doble UPN 260) |

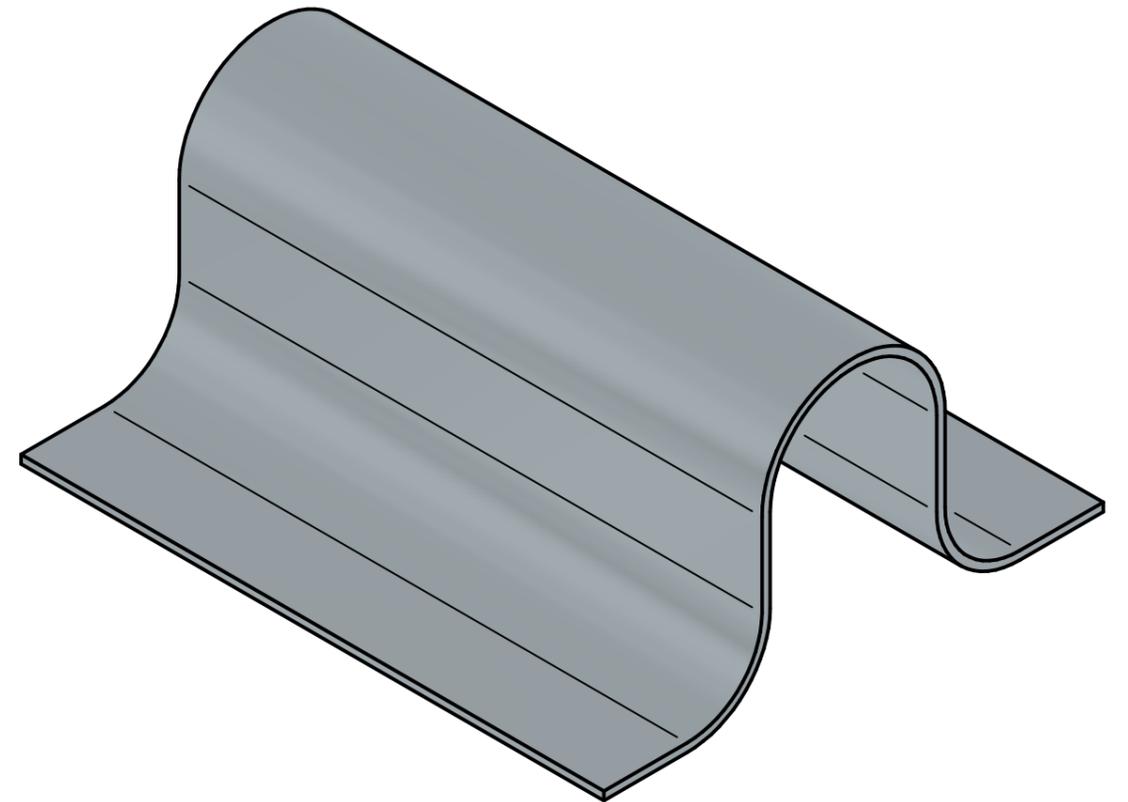
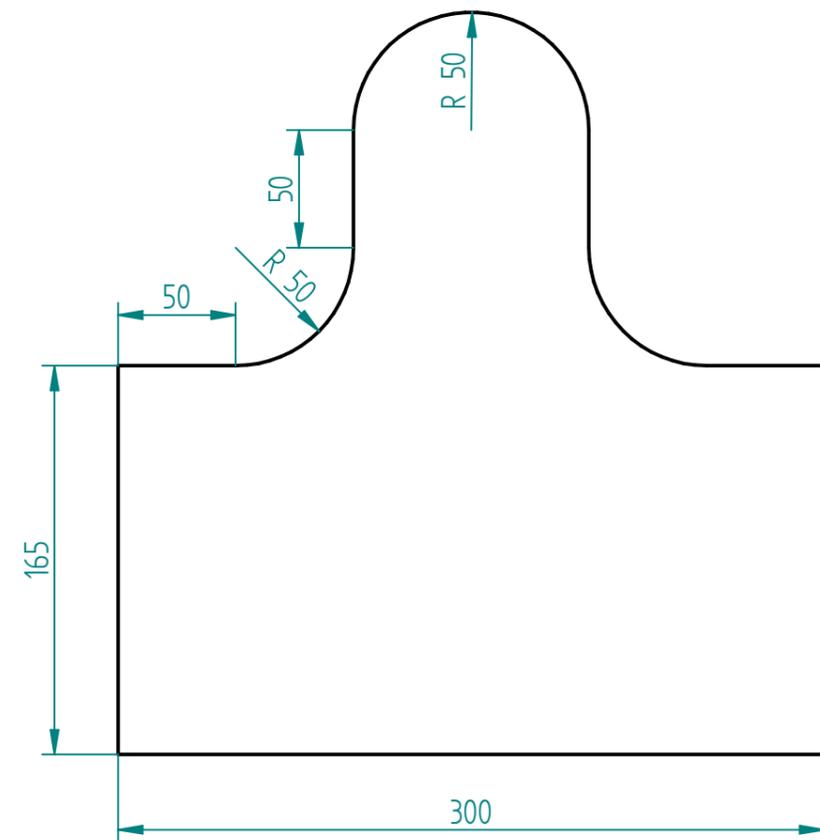
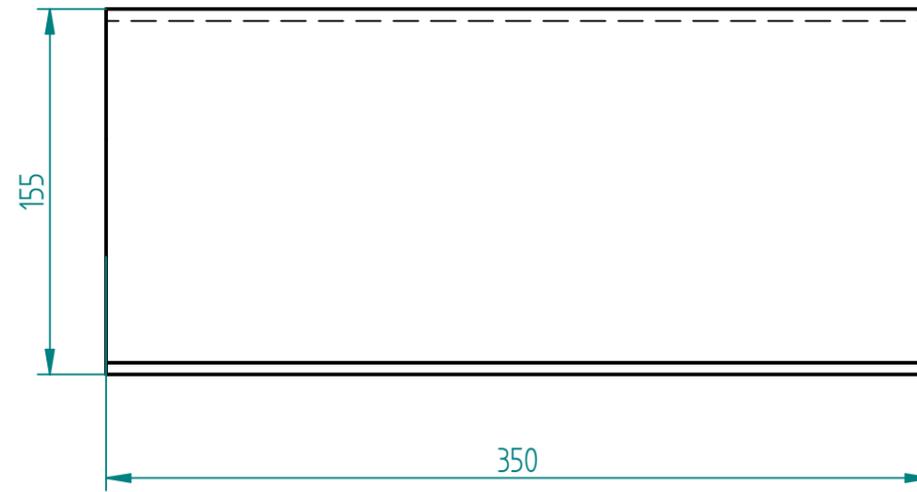
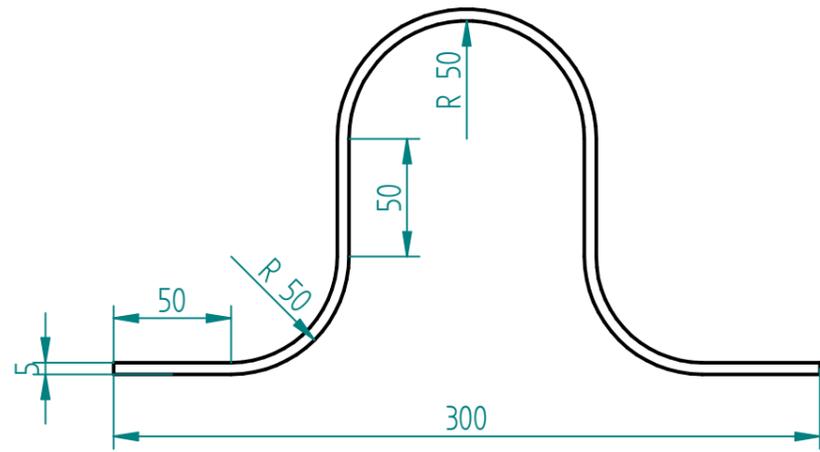
| | |
|--|---|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | PLANO Nº: 2 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | FIRMA: |
| ESCALA: 1 : 2 FECHA: FEBRERO 2016 | PLANO: PERFILES ESTRUCTURALES DE LA ARMADURA DEL HORNO. |



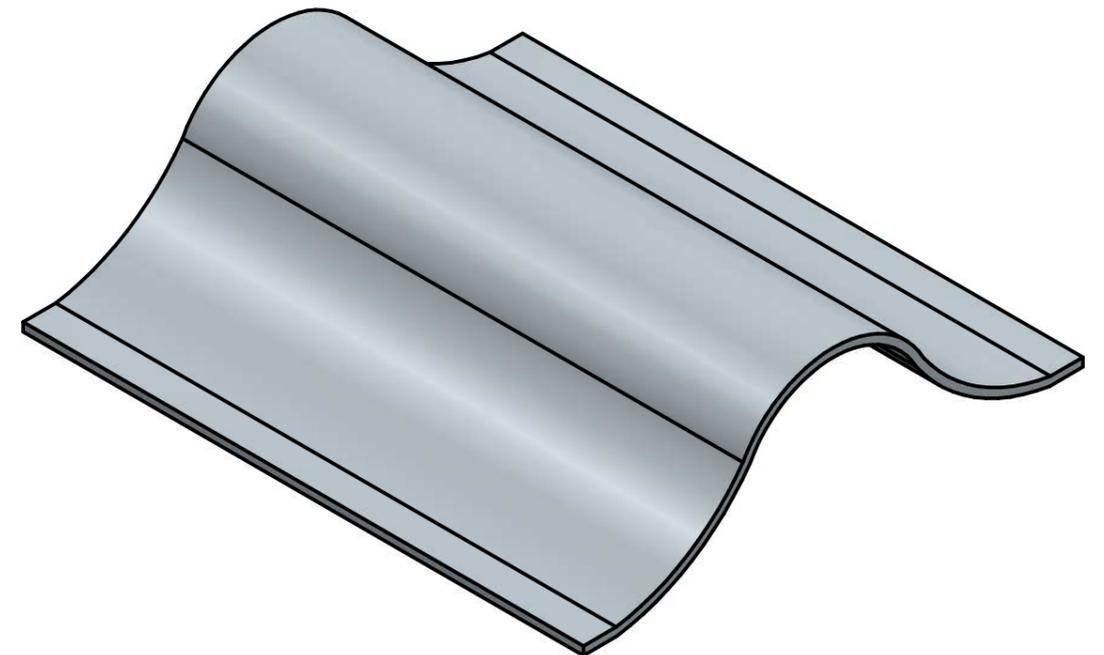
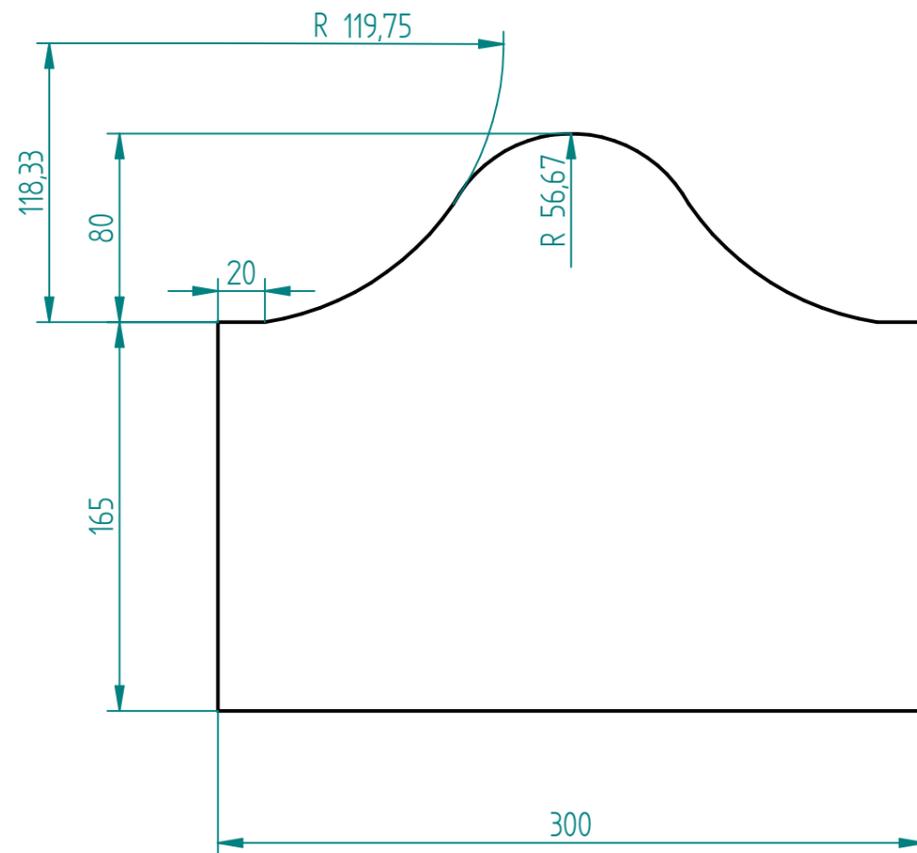
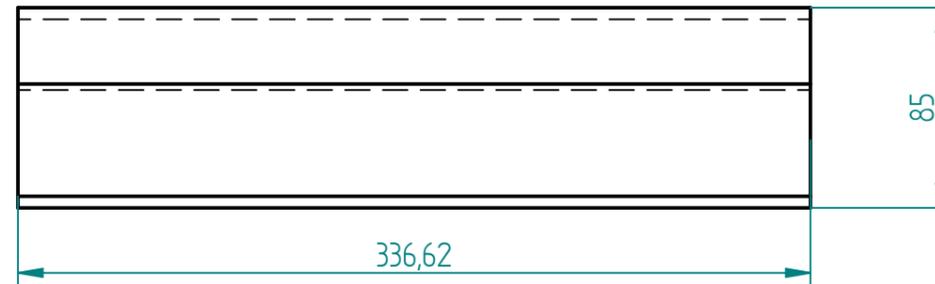
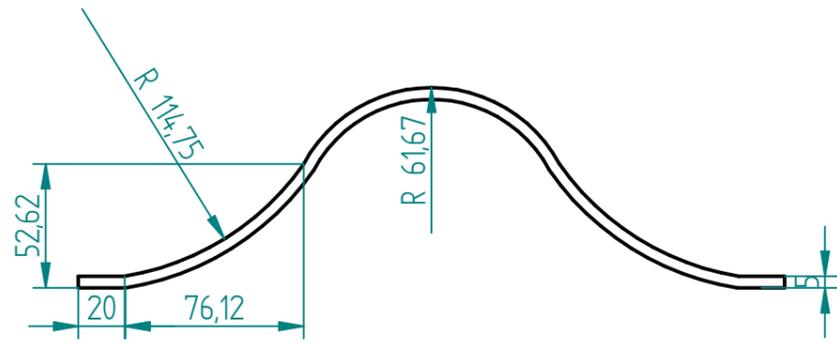
DETALLE A



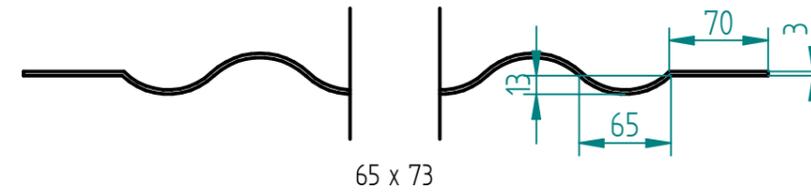
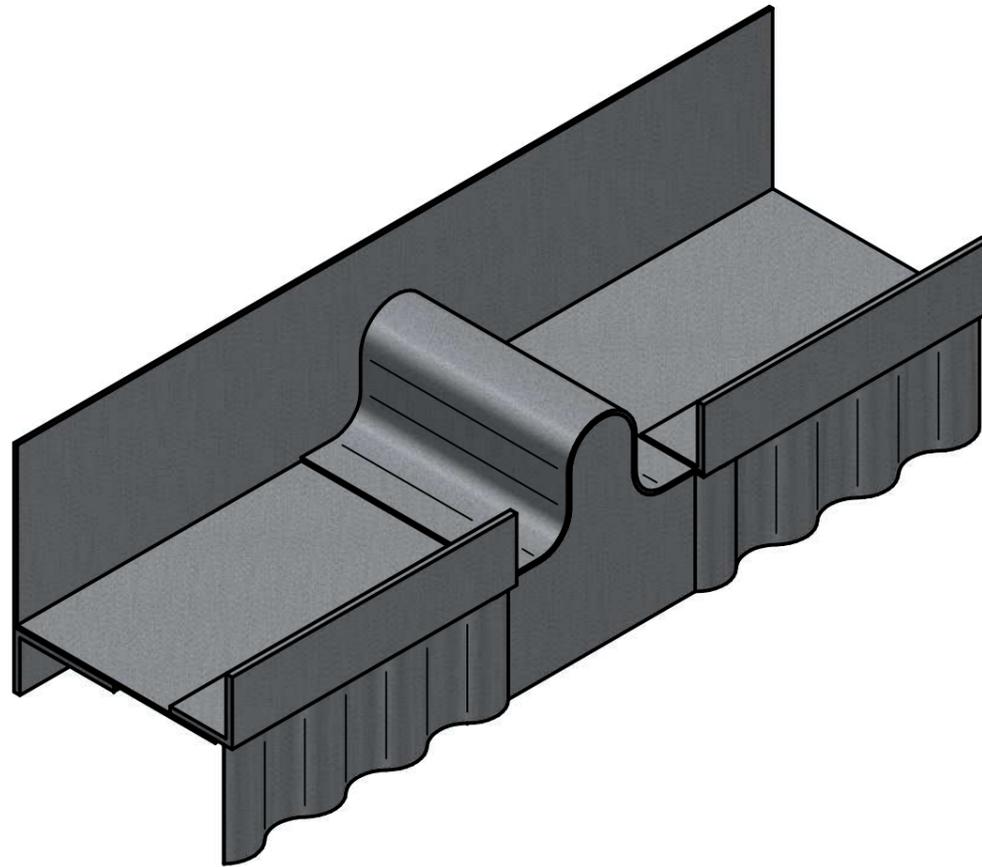
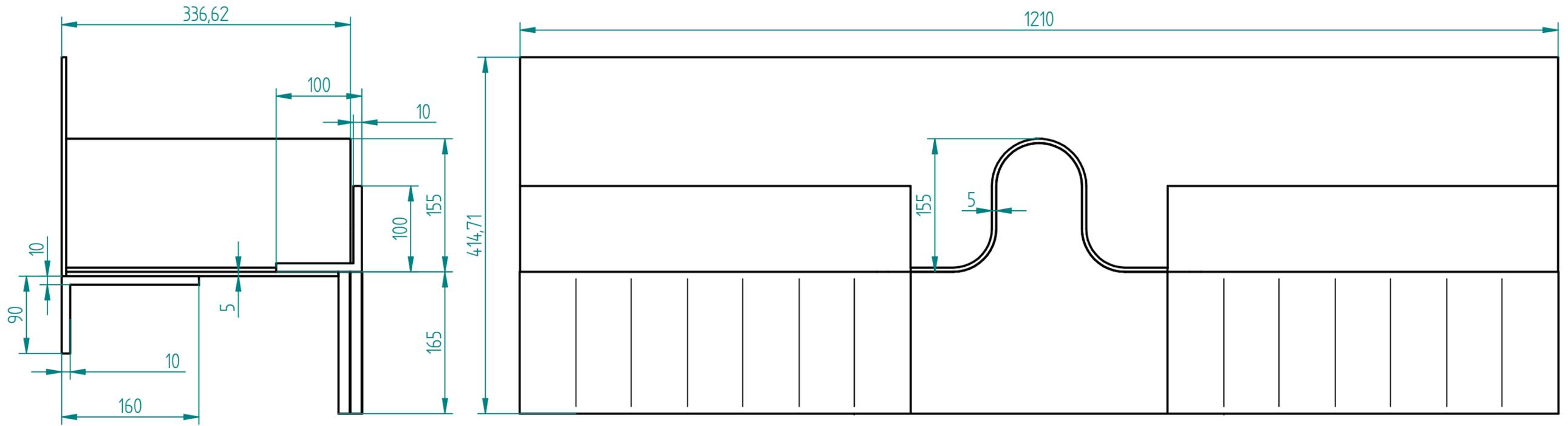
| | | |
|--|-----------------------------------|-----------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | PLANO Nº: |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | 3 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1:5 FECHA: FEBRERO 2016 | PLANO: SUBESTRUCTURA DE FALDÓN | |



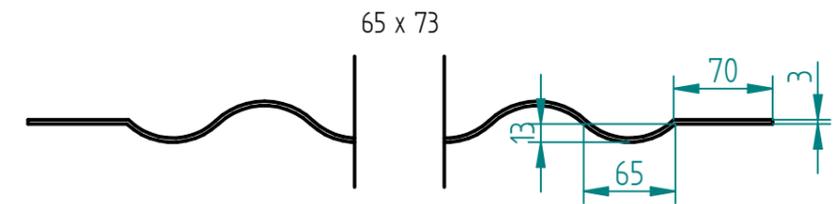
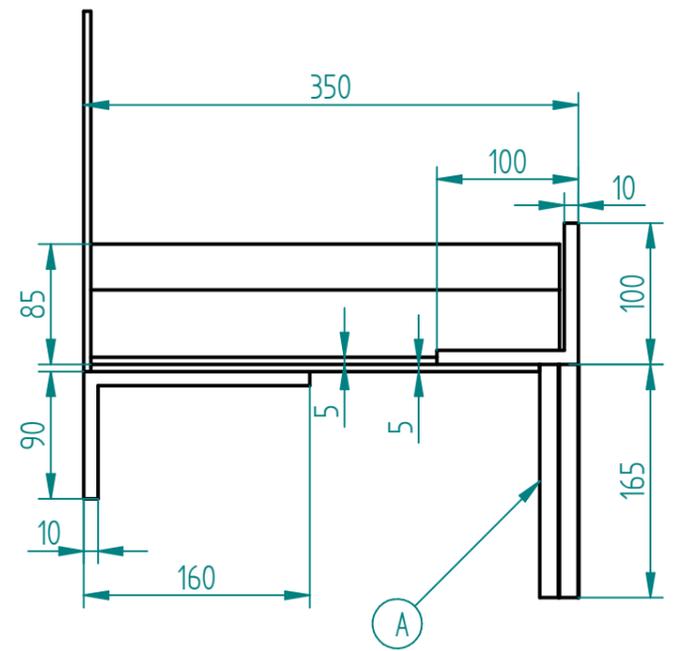
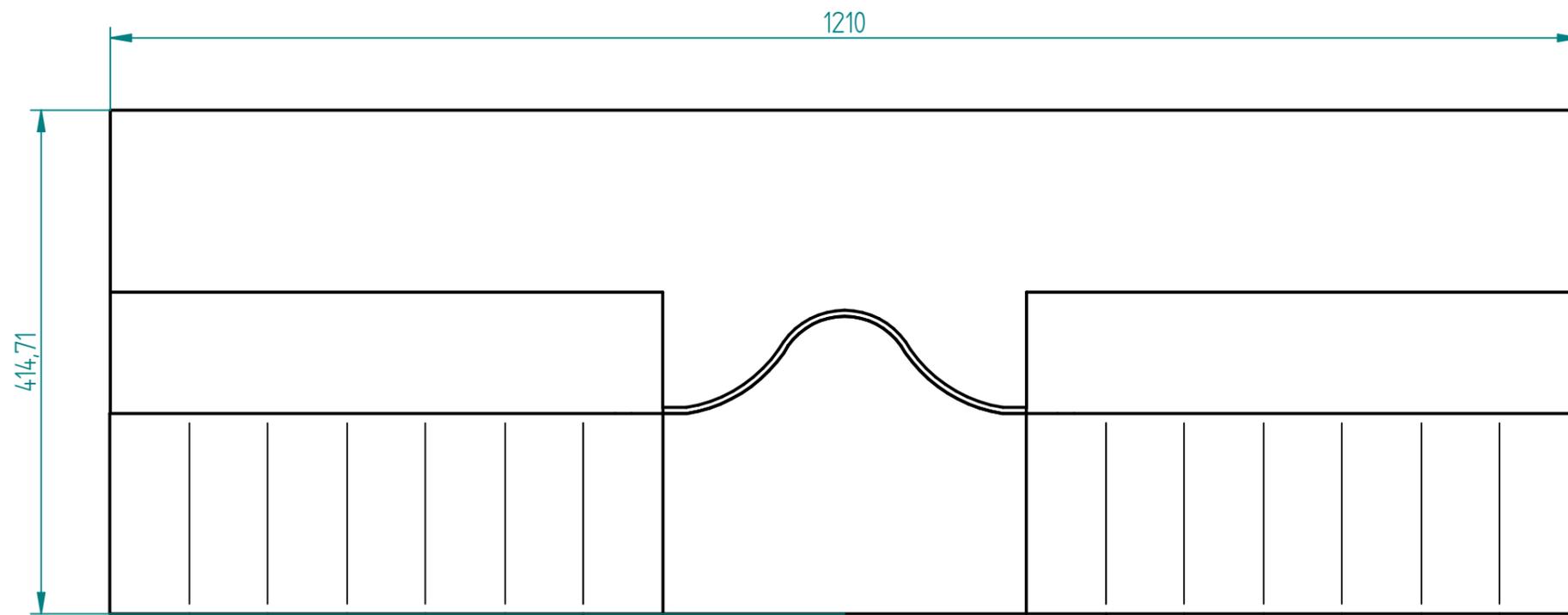
| | | |
|--|--|----------------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | PLANO Nº: 4 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1:3 | PLANO: CUERPO Y TAPA DE DILATADOR. DISEÑOS 1 Y 3. | |
| FECHA: FEBRERO 2016 | | |



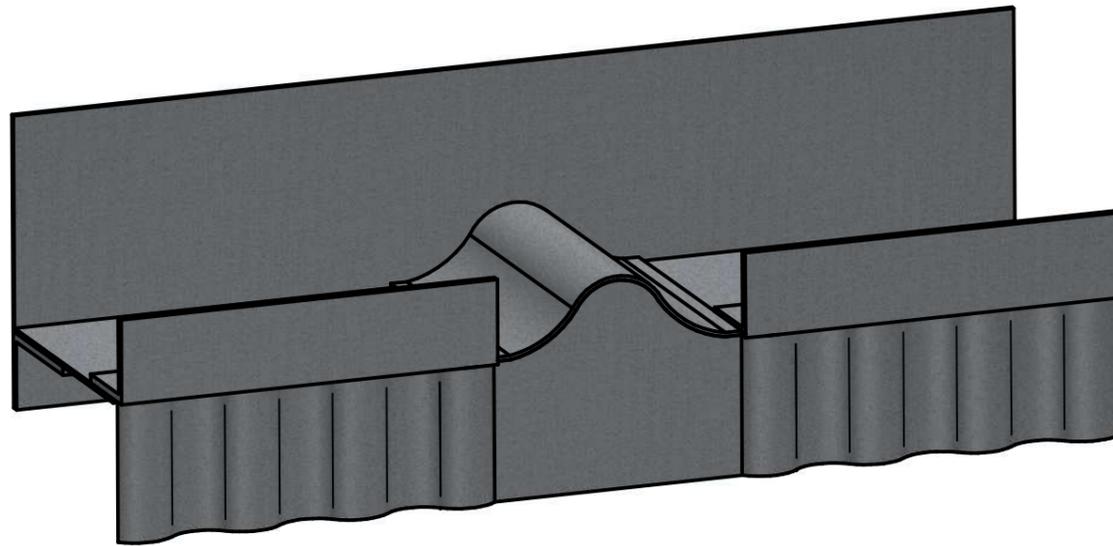
| | |
|---|---|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | |
| PLANO Nº: 5 | |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | |
| FIRMA: | |
| ESCALA: 1:3 | PLANO: CUERPO Y TAPA DE DILATADOR. DISEÑOS 2 Y 4. |
| FECHA: FEBRERO 2016 | |



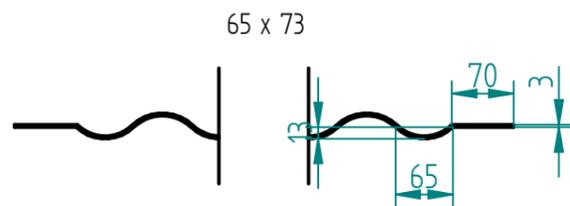
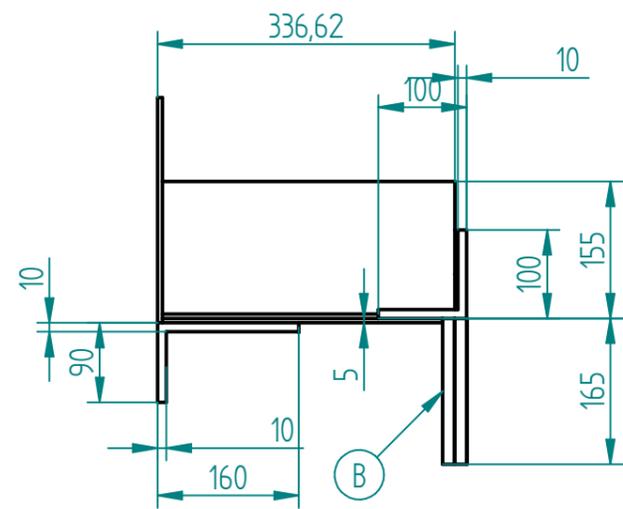
| | | |
|--|--------|-----------------------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | PLANO Nº: |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | 6 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1:5 | PLANO: | PROPUESTA DE DISEÑO 1 |
| FECHA: FEBRERO 2016 | | |



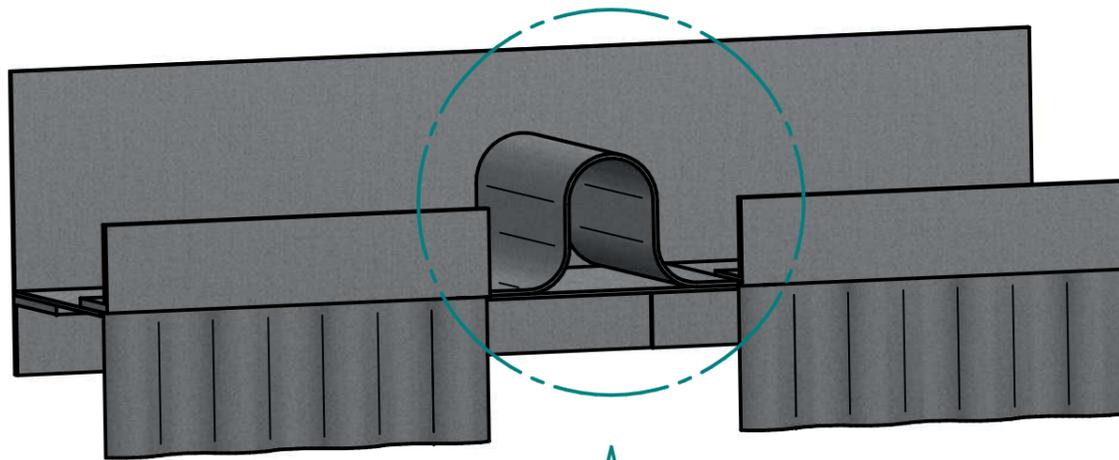
DETALLE A



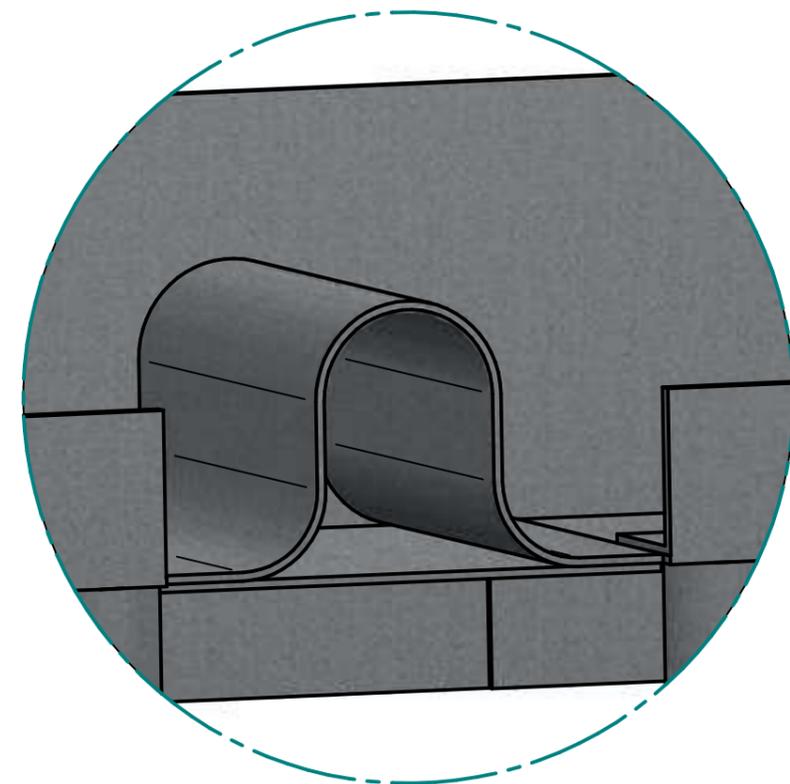
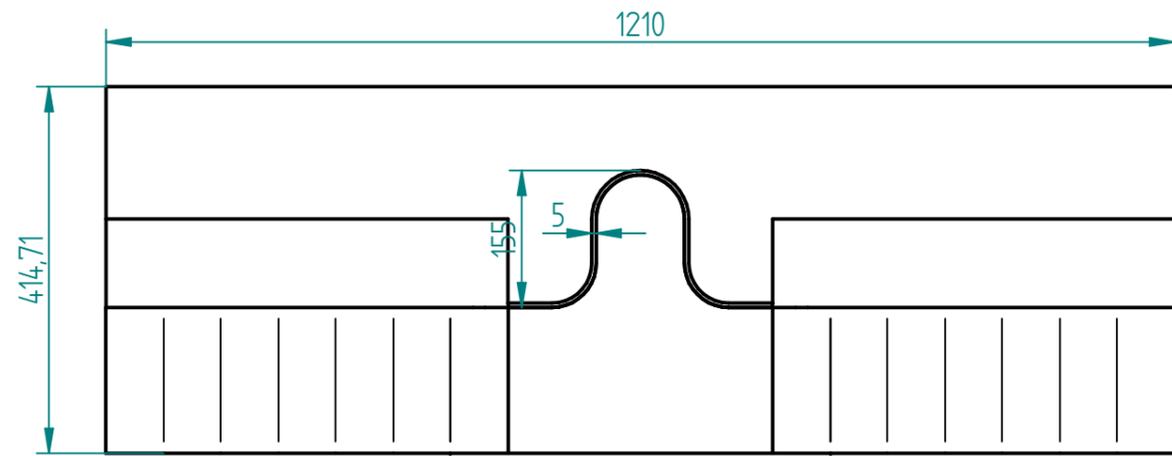
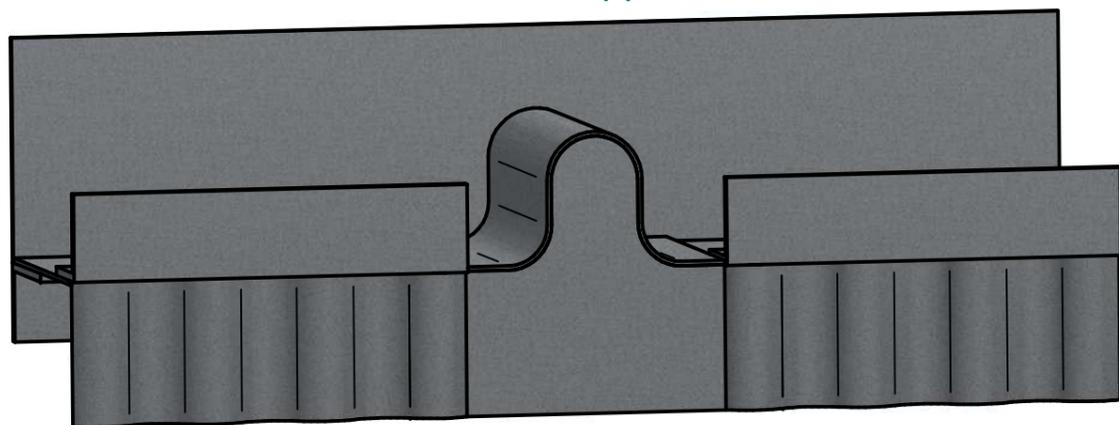
| | | |
|--|---------------------------------|-----------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | PLANO Nº: |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | 7 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1 : 5 FECHA: FEBRERO 2016 | PLANO: PROPUESTA DE DISEÑO 2 | |



DETALLE B

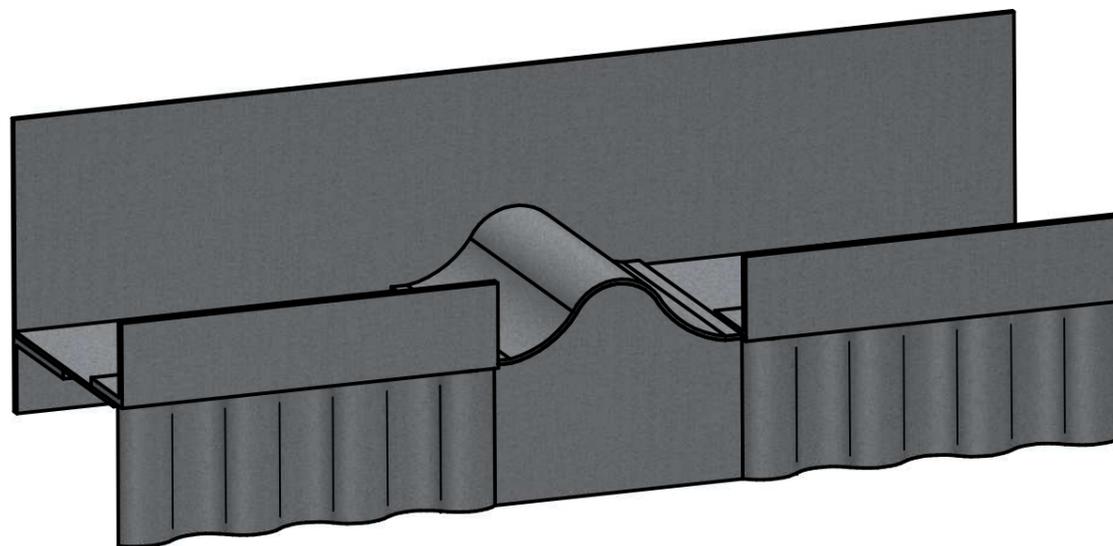
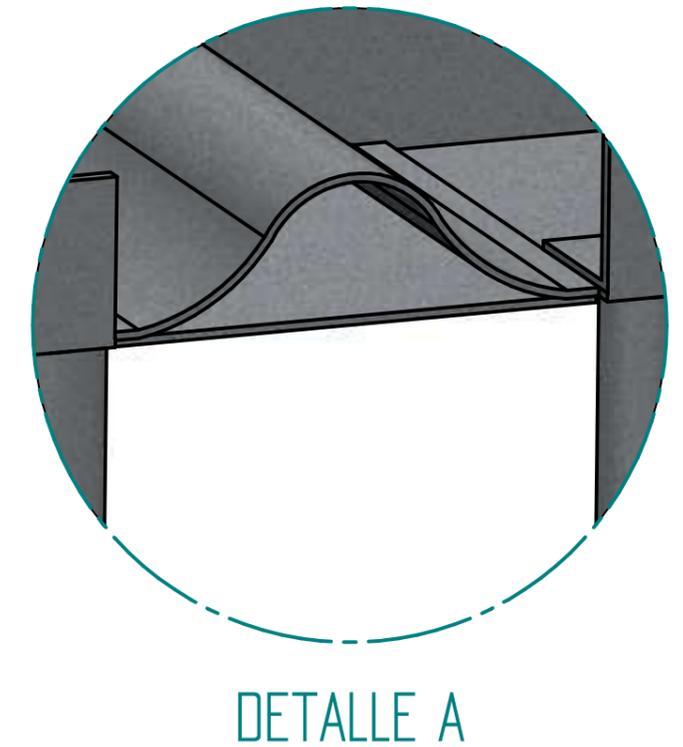
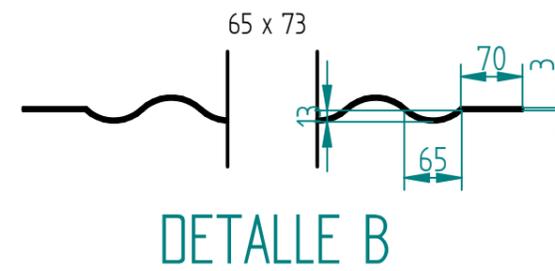
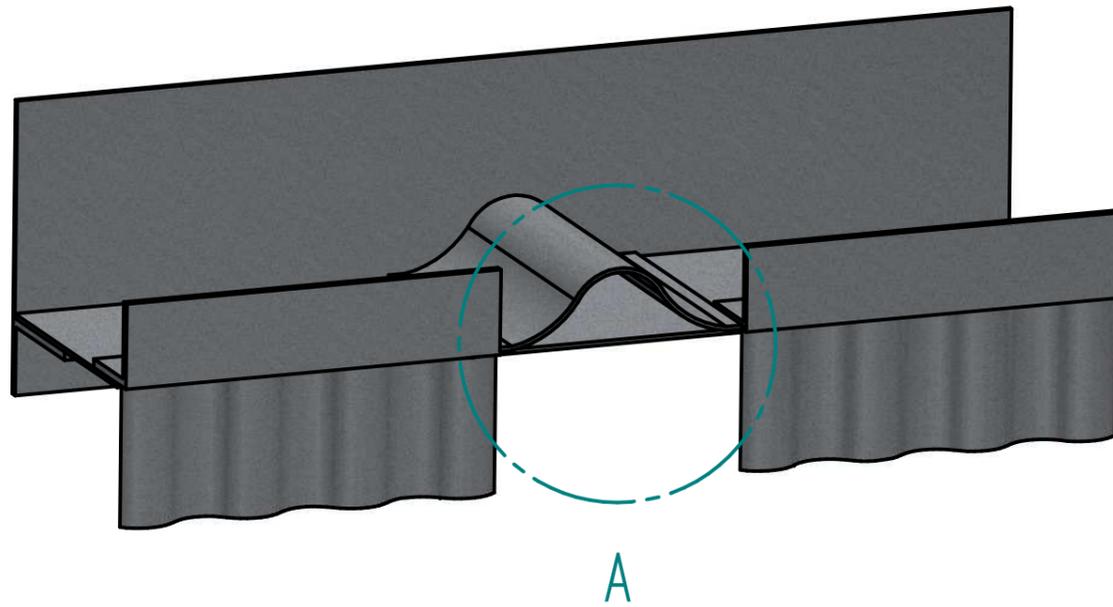
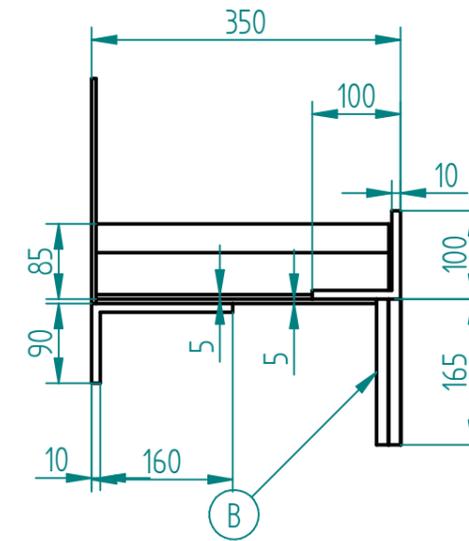
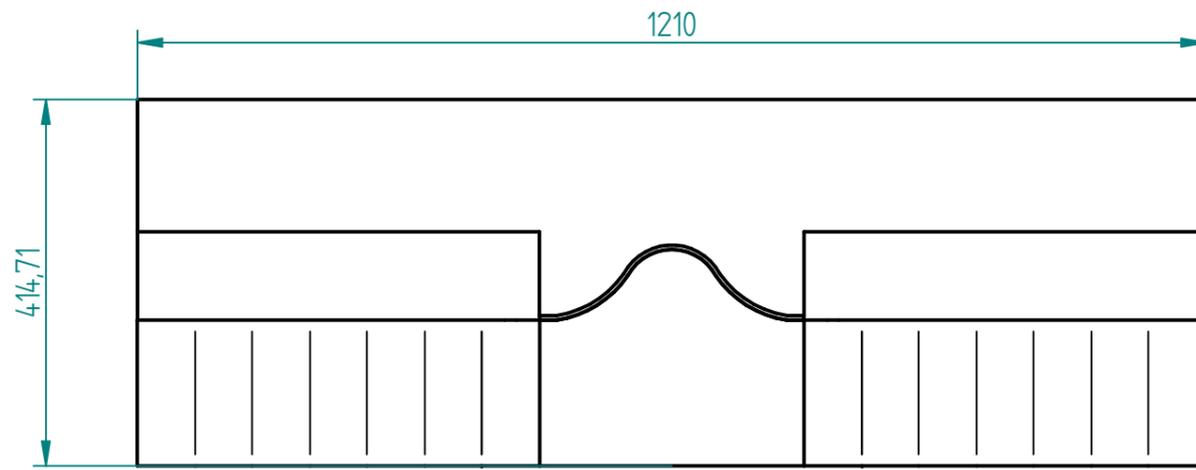


A



DETALLE A

| | | |
|--|--------|-----------------------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | PLANO Nº: |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | 8 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1 : 8 | PLANO: | PROPUESTA DE DISEÑO 3 |
| FECHA: FEBRERO 2016 | | |



| | | |
|--|--------|------------------------|
|  UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR | | |
| TÍTULO: APLICACIÓN DEL CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS AL DISEÑO DE FALDONES INFERIORES PARA LA ESTANQUEIDAD DE HORNOS DE SOLERA MÓVIL INDUSTRIALES | | PLANO Nº: 9 |
| AUTOR: BEGOÑA LOUREIRO DOPICO | | FIRMA: |
| ESCALA: 1 : 8 | PLANO: | PROPUESTA DE DISEÑO 4. |
| FECHA: FEBRERO 2016 | | |

ANEXOS

ANEXO I:
FIBRA CERÁMICA

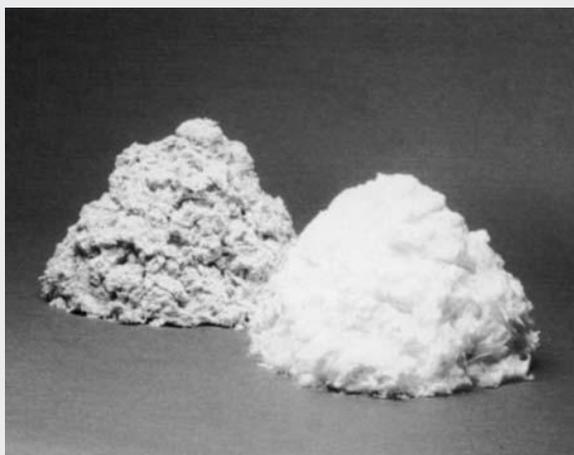
Cerafiber / Cerachem Fiber / Cerachrome Fiber



Datasheet Code 5-5-06 S

MSDS Code 104-9-EURO REACH

© 2009 Morgan Thermal Ceramics, a business within the Morgan Ceramics Division of The Morgan Crucible Company plc



DESCRIPCIÓN

Cerafiber: Fibras refractarias centrifugadas, elaboradas a partir de sílice y alúmina electrofundidos .

Cerachem Fiber: Fibras refractarias centrifugadas, elaboradas a partir de alúmina, sílice y zirconio electrofundidos.

Cerachrome Fiber: Fibras refractarias centrifugadas, elaboradas a partir de alúmina, sílice y cromo electrofundidos.

Estos tres tipos de fibras son muy resistentes a los ataques químicos, excepto a los ácidos fluorhídricos y fuertes concentraciones de alcalis.

TIPO

Fibras refractarias a granel.

TEMPERATURA MÁXIMA DE UTILIZACIÓN EN CONTÍNUO

| | |
|--------------------|--------|
| Cerafiber ®: | 1260°C |
| Cerachem® Fiber: | 1425°C |
| Cerachrome® Fiber: | 1425°C |

La temperatura máxima de utilización en continuo depende de la aplicación. En caso de duda le recomendamos que contacte con el distribuidor de Morgan Thermal Ceramics el cual le aconsejará.

TIPOS

Cerafiber 10, Cerachem Fiber 50 & Cerachrome Fiber 40:

Fibra básica, larga, no lubricada, destinada para mezclas en la fabricación de productos moldeados al vacío.

Cerafiber 11:

Fibra larga, no lubricada, con bajo contenido de infibrilizados, para la fabricación de textiles.

Cerafiber 520, Cerachem Fiber 51 & Cerachrome Fiber 41:

Fibra básica, larga, lubricada para relleno y juntas de dilatación.

BENEFICIOS

- Excelente estabilidad térmica gracias a una buena resistencia a la devitrificación a alta temperatura
- Baja conductividad térmica
- Insensible al choque térmico
- Gran estabilidad química
- No contiene ligantes ni componentes corrosivos
- Alta resiliencia tanto en baja como en alta temperatura
- Baja acumulación térmica
- Buen aislante acústico
- La densidad de las fibras a granel en el embalaje oscila entre 90 y 200kg/m³, y depende de la fuerza aplicada en su embalaje. Es muy difícil obtener densidades superiores a 200kg/m³ por embalaje manual.

APLICACIONES

- Materia prima para la fabricación de productos terminados: placas, papel, piezas conformadas, textiles...
- Relleno de volúmenes y huecos complejos o de difícil acceso
- Relleno de juntas de dilatación
- Reparaciones por relleno
- Fibras de refuerzos para hormigones y cementos aislantes
- Precursor de fibras técnicas

Cerafiber / Cerachem Fiber / Cerachrome Fiber



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

| Temperatura máxima de uso continuo | °C | Cerafiber 1260 | Cerachem Fiber 1425 | Cerachrome Fiber 1425 |
|--|--------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Características medidas en ambiente (23°C/50% HR) | | | | |
| Color | | blanco | blanco | blanco/verde |
| Densidad relativa | kg/dm ³ | 2.65 | 2.65 | 2.65 |
| Diámetro medio de las fibras | micras | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Calor específico | | | | |
| Capacidad de calor específica | | | | |
| 540°C | kJ/kg.K | 1.05 | 1.05 | 1.05 |
| 109°C | kJ/kg.K | 1.13 | 1.13 | 1.13 |
| Composición química | | | | |
| SiO ₂ | % | 56 | 50.0 | 54.3 |
| Al ₂ O ₃ | % | 44 | 34.9 | 42.6 |
| CaO+ MgO | % | 0.5 | 0.09 | 0.10 |
| Cr ₂ O ₃ | % | - | - | 2.8 |
| ZrO ₂ | % | - | 15.2 | - |
| Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ | % | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| Na ₂ O + K ₂ O | % | 0.10 | 0.10 | 0.10 |

Presentación y embalaje

Estos tres tipos de fibra, se suministran en sacas de 20kg o en balas de 60-80kg

The values given herein are typical values obtained in accordance with accepted test methods and are subject to normal manufacturing variations. They are supplied as a technical service and are subject to change without notice. Therefore, the data contained herein should not be used for specification purposes. Check with your Thermal Ceramics office to obtain current information.

ANEXO II:

ACEROS INOXIDABLES REFRACTARIOS

A DESIGNERS'
HANDBOOK SERIES

Nº 9004

HIGH-TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF STAINLESS STEELS

NiDI

Distributed by
NICKEL
DEVELOPMENT
INSTITUTE



Produced by
AMERICAN
IRON AND STEEL
INSTITUTE

TYPE 304 S30400

| CHEMICAL COMPOSITION, (Maximum unless noted otherwise) | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|------|-----------------|----------------|---|----|----|----|-------|
| C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | N | Mo | Ti | Al | Cb+Ta |
| 0.08 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 1.00 | 18.00/ 20.00 | 8.00/ 10.50 | | | | | |

| REPRESENTATIVE MECHANICAL PROPERTIES (Annealed sheet unless noted otherwise) | | | | | | | | |
|---|------|-------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Test Temperature | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | Hardness Rockwell |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % | B |
| 80 | 27 | 42 | 290 | 84 | 579 | 55 | | 80 |
| 300 | 149 | 26.4 | 182 | 68.4 | 472 | 50 | 77 | |
| 500 | 260 | 21.8 | 150 | 64.1 | 442 | 42 | 75 | |
| 700 | 371 | 19.5 | 134 | 61.9 | 427 | 38 | 73 | |
| 900 | 482 | 18.1 | 125 | 60 | 414 | 36 | 69 | |
| 1100 | 593 | 16.4 | 113 | 53.2 | 367 | 35 | 65 | |
| 1300 | 704 | 13.8 | 95 | 35 | 241 | 35 | 51 | |
| 1500 | 816 | 9.9 | 68 | 18 | 124 | 38 | 42 | |
| 1700 | 927 | – | | 8.9 | 61 | 45 | 45 | |
| 1900 | 1038 | – | | 4.8 | 33 | 88 | 69 | |
| 2000 | 1093 | – | | 3.4 | 23 | 95 | 75 | |

| REPRESENTATIVE CREEP AND RUPTURE PROPERTIES | | | | | | | | | |
|--|-----|--|-----|--|-----|--------------------------|-----|--------------|-----|
| Test Temperature | | Stress for a Creep Rate of | | | | Stress for Rupture in | | | |
| | | 0.0001% per Hour (1% in 10,000 Hours) | | 0.00001% per Hour (1% in 100,000 Hours) | | 1,000 Hours | | 10,000 Hours | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa |
| 1000 | 538 | 25.5 | 176 | 17.9 | 123 | 49.8 | 343 | 36 | 248 |
| 1100 | 593 | 16.5 | 114 | 11.1 | 77 | 31 | 214 | 22.2 | 153 |
| 1200 | 649 | 10.8 | 74 | 7.2 | 50 | 19 | 131 | 13.8 | 95 |
| 1300 | 704 | 7 | 48 | 4.5 | 31 | 11.9 | 82 | 8.5 | 59 |
| 1400 | 760 | 4.6 | 32 | 2.9 | 20 | 7.7 | 53 | 5.3 | 37 |
| 1500 | 816 | 3 | 21 | 1.8 | 12 | 4.7 | 32 | 3.3 | 23 |

| EFFECT OF PROLONGED EXPOSURE AT ELEVATED TEMPERATURES | | | | | | | | |
|--|-----|-------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|----------------------|----|
| Representative Mechanical Properties at Room Temperature | | | | | | | | |
| 100,000 Hours (Without Stress) Exposure Temp. | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | | | |
| 900 | 482 | 34 | 234 | 85.1 | 587 | 67 | | 74 |
| 1050 | 566 | 31.4 | 216 | 85.9 | 592 | 63 | | 75 |
| 1200 | 649 | 32.3 | 223 | 85.2 | 587 | 58 | | 64 |

| PHYSICAL PROPERTIES | | | | | |
|---|-----------|----------------|--------|------------------------------|------------|
| Thermal Conductivity | | | | | |
| Btu/hr/sq ft/ft²/°F W/m•K | | | | | |
| 212°F (100°C)— | | 9.4 | 0.113 | | |
| 932°F (500°C)— | | 12.4 | 0.149 | | |
| Mean Coefficient of Thermal Expansion per Degree °F (°C) (×10⁶) | | | | | |
| 32 to 212°F (0 to 100°C)— | | 9.6 | (17.2) | | |
| 32 to 600°F (0 to 315°C)— | | 9.9 | (17.9) | | |
| 32 to 1000°F (0 to 538°C)— | | 10.2 | (18.4) | | |
| 32 to 1200°F (0 to 649°C)— | | 10.4 | (18.8) | | |
| Modulus of Elasticity | | | | | |
| Temperature | | Modulus | | psi (×10⁶) | GPa |
| °F | °C | | | | |
| 80 | 27 | Tension | 28.0 | 193 | |
| | | Shear | 12.5 | 86 | |
| 200 | 93 | Tension | 27.9 | 192 | |
| | | Shear | 11.1 | 77 | |
| 300 | 149 | Tension | 27.1 | 187 | |
| | | Shear | 10.8 | 74 | |
| 400 | 204 | Tension | 26.6 | 183 | |
| | | Shear | 10.5 | 72 | |
| 500 | 260 | Tension | 26.0 | 179 | |
| | | Shear | 10.2 | 70 | |
| 600 | 316 | Tension | 25.6 | 177 | |
| | | Shear | 9.9 | 68 | |
| 700 | 371 | Tension | 24.7 | 170 | |
| | | Shear | 9.7 | 67 | |
| 800 | 427 | Tension | 24.1 | 166 | |
| | | Shear | 9.5 | 66 | |
| 900 | 482 | Tension | 23.2 | 160 | |
| | | Shear | 9.2 | 63 | |
| 1000 | 538 | Tension | 22.5 | 155 | |
| | | Shear | 8.9 | 61 | |
| 1100 | 593 | Tension | 21.8 | 150 | |
| | | Shear | 8.6 | 59 | |
| 1200 | 649 | Tension | 21.1 | 145 | |
| | | Shear | 8.3 | 57 | |
| 1300 | 704 | Tension | 20.4 | 141 | |
| | | Shear | 8.0 | 55 | |
| 1400 | 760 | Tension | 19.4 | 134 | |
| | | Shear | 7.7 | 53 | |
| 1500 | 816 | Tension | 18.1 | 125 | |
| | | Shear | 7.4 | 51 | |

TYPE 309 S30900

| CHEMICAL COMPOSITION, (Maximum unless noted otherwise) | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|-----------|-----------------|-----------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | N | Mo | Ti | Al | Cb + Ta |
| 0.20 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 1.00 | 22.00/ 24.00 | 12.00/ 15.00 | | | | | |

| REPRESENTATIVE MECHANICAL PROPERTIES (Annealed sheet unless noted otherwise) | | | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------------------|------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| Test Temperature | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | Hardness Rockwell | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % | B | |
| 80 | 27 | 45 | 310 | 90 | 621 | 45 | | 85 | |
| 300 | 149 | 35.2 | 243 | 80.3 | 554 | 48 | 70 | | |
| 500 | 260 | 33.2 | 229 | 77 | 531 | 45 | 67 | | |
| 700 | 371 | 30.8 | 212 | 74 | 510 | 42 | 64 | | |
| 900 | 482 | 27.8 | 192 | 69 | 476 | 39 | 57 | | |
| 1100 | 593 | 24.8 | 171 | 60 | 414 | 37 | 43 | | |
| 1300 | 704 | 21.6 | 149 | 43 | 296 | 36 | 49 | | |
| 1500 | 816 | 18.2 | 125 | 27 | 186 | 38 | 42 | | |
| 1700 | 927 | | | 16 | 110 | 45 | 43 | | |
| 1900 | 1038 | | | 8.5 | 59 | 58 | 61 | | |
| 2000 | 1093 | | | 4 | 28 | 71 | 73 | | |

| REPRESENTATIVE CREEP AND RUPTURE PROPERTIES | | | | | | | | | |
|--|-----------|--|------------|--|------------|----------------------------------|------------|---------------------|------------|
| Test Temperature | | Stress for a Creep Rate of | | | | Stress for Rupture in | | | |
| | | 0.0001% per Hour (1% in 10,000 Hours) | | 0.00001% per Hour (1% in 100,000 Hours) | | 1,000 Hours | | 10,000 Hours | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa |
| 800 | 427 | 36.5 | 252 | 25.5 | 176 | | | | |
| 900 | 482 | 23 | 159 | 16.1 | 111 | 60 | 414 | 55 | 379 |
| 1000 | 538 | 16 | 110 | 10.4 | 72 | 42 | 290 | 36.6 | 252 |
| 1100 | 593 | 11 | 76 | 7 | 48 | 29.2 | 201 | 24.5 | 169 |
| 1200 | 649 | 7 | 48 | 4.2 | 29 | 19.2 | 132 | 14.3 | 99 |
| 1300 | 704 | 4 | 28 | 2 | 14 | 11 | 76 | 7.7 | 53 |
| 1400 | 760 | 2 | 14 | 1 | 7 | 6.8 | 47 | 4.3 | 30 |
| 1500 | 816 | 1 | 7 | 0.4 | 3 | 4.1 | 28 | 2.5 | 17 |

| EFFECT OF PROLONGED EXPOSURE AT ELEVATED TEMPERATURES | | | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------------------|------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|------------------------------|--|--|
| Representative Mechanical Properties at Room Temperature | | | | | | | | | |
| 10,000 Hours (Without Stress) Exposure Temp. | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % | | |
| 900 | 482 | 34.4 | 237 | 83.3 | 574 | 62 | 78 | | |
| 1050 | 566 | 36.1 | 249 | 86.9 | 599 | 57 | 66 | | |
| 1200 | 649 | 34.5 | 238 | 87.4 | 603 | 53 | 60 | | |

| PHYSICAL PROPERTIES | | | | |
|--|-----------|---------------------------|---------------------------------------|------------|
| Thermal Conductivity | | | | |
| | | Btu/hr/sq ft/ft/°F | W/m•K | |
| 212°F (100°C)— | | 9.0 | 0.108 | |
| 932°F (500°C)— | | 10.8 | 0.130 | |
| Mean Coefficient of Thermal Expansion per Degree °F (°C) ($\times 10^6$) | | | | |
| 32 to 212°F (0 to 100°C) — | | 8.3 | (15.0) | |
| 32 to 600°F (0 to 315°C) — | | 9.3 | (16.6) | |
| 32 to 1000°F (0 to 538°C) — | | 9.6 | (17.2) | |
| 32 to 1200°F (0 to 649°C) — | | 10.0 | (18.0) | |
| 32 to 1800°F (0 to 981°C) — | | 11.5 | (20.6) | |
| Modulus of Elasticity | | | | |
| Temperature | | Modulus | psi ($\times 10^6$) | GPa |
| °F | °C | | | |
| 80 | 27 | Tension | 29.0 | 200 |
| 800 | 427 | Tension | 23.1 | 159 |
| 1000 | 538 | Tension | 22.6 | 156 |
| 1200 | 649 | Tension | 21.8 | 150 |
| 1300 | 704 | Tension | 21.2 | 146 |
| 1500 | 816 | Tension | 19.8 | 137 |
| 1600 | 871 | Tension | 19.2 | 132 |

TYPE 310 S31000

| CHEMICAL COMPOSITION, (Maximum unless noted otherwise) | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|------|-----------------|-----------------|---|----|----|----|---------|
| C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | N | Mo | Ti | Al | Cb + Ta |
| 0.25 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 1.50 | 24.00/ 26.00 | 19.00/ 22.00 | | | | | |

| REPRESENTATIVE MECHANICAL PROPERTIES (Annealed sheet unless noted otherwise) | | | | | | | | | |
|---|------|-------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| Test Temperature | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | Hardness Rockwell | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % | B | |
| 80 | 27 | 45 | 310 | 95 | 655 | 45 | | 85 | |
| 300 | 149 | 34.9 | 241 | 82.1 | 566 | 38 | 69 | | |
| 500 | 260 | 32.5 | 224 | 77.6 | 535 | 35 | 63 | | |
| 700 | 371 | 29.6 | 204 | 75.5 | 521 | 35 | 57 | | |
| 900 | 482 | 26.3 | 181 | 69.5 | 479 | 35 | 53 | | |
| 1100 | 593 | 22.7 | 157 | 61.5 | 424 | 38 | 47 | | |
| 1300 | 704 | 19 | 131 | 45.5 | 314 | 31 | 42 | | |
| 1500 | 816 | 15 | 103 | 29.5 | 203 | 30 | 38 | | |
| 1700 | 927 | | | 17 | 117 | 49 | 48 | | |
| 1900 | 1038 | | | 11 | 76 | 56 | 46 | | |
| 2000 | 1093 | | | 7 | 48 | 57 | 48 | | |

| REPRESENTATIVE CREEP AND RUPTURE PROPERTIES | | | | | | | | | |
|--|-----|--|-----|--|-----|--------------------------|-----|--------------|-----|
| Test Temperature | | Stress for a Creep Rate of | | | | Stress for Rupture in | | | |
| °F | °C | 0.0001% per Hour (1% in 10,000 Hours) | | 0.00001% per Hour (1% in 100,000 Hours) | | 1,000 Hours | | 10,000 Hours | |
| | | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa |
| 900 | 482 | 22.8 | 157 | 15 | 103 | | | | |
| 1000 | 538 | 17.6 | 121 | 11.8 | 81 | 37.6 | 259 | 32.4 | 223 |
| 1100 | 593 | 12.8 | 88 | 8.8 | 61 | 23.6 | 163 | 20 | 138 |
| 1200 | 649 | 8.4 | 58 | 6 | 41 | 13.4 | 92 | 11 | 76 |
| 1300 | 704 | 5 | 34 | 3.7 | 25 | 8.7 | 60 | 6.9 | 48 |
| 1400 | 760 | 2.4 | 17 | 2 | 14 | 6 | 41 | 4.5 | 31 |
| 1500 | 816 | 1 | 7 | 0.8 | 6 | 4.5 | 31 | 3.3 | 23 |

| EFFECT OF PROLONGED EXPOSURE AT ELEVATED TEMPERATURES | | | | | | | |
|--|-----|-------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|----------------------|
| Representative Mechanical Properties at Room Temperature | | | | | | | |
| 10,000 Hours (Without Stress) Exposure Temp. | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % |
| 900 | 482 | 37.2 | 256 | 90.2 | 622 | 54 | 69 |
| 1050 | 566 | 42.3 | 292 | 93.5 | 645 | 46 | 54 |
| 1200 | 649 | 58.1 | 401 | 117.9 | 813 | 4 | 4 |

PHYSICAL PROPERTIES

Thermal Conductivity

| | Btu/hr/sq ft/ft°F W/m•K | |
|----------------|-------------------------|-------|
| 212°F (100°C)— | 8.2 | 0.099 |
| 932°F (500°C)— | 10.8 | 0.130 |

Mean Coefficient of Thermal Expansion per Degree °F (°C) (×10⁶)

| | | |
|----------------------------|------|--------|
| 32 to 212°F (0 to 100°C)— | 8.8 | (15.9) |
| 32 to 600°F (0 to 315°C)— | 9.0 | (16.2) |
| 32 to 1000°F (0 to 538°C)— | 9.4 | (17.0) |
| 32 to 1200°F (0 to 649°C)— | 9.7 | (17.5) |
| 32 to 1800°F (0 to 981°C)— | 10.6 | (19.1) |

Modulus of Elasticity

| Temperature | | Modulus | psi (×10 ⁶) | GPa |
|-------------|-----|---------|-------------------------|-----|
| °F | °C | | | |
| 80 | 27 | Tension | 29.0 | 200 |
| 200 | 93 | Tension | 28.2 | 194 |
| | | Shear | 10.9 | 75 |
| 300 | 149 | Tension | 27.5 | 190 |
| | | Shear | 10.6 | 73 |
| 400 | 204 | Tension | 26.8 | 185 |
| | | Shear | 10.3 | 71 |
| 500 | 260 | Tension | 26.2 | 181 |
| | | Shear | 10.0 | 69 |
| 600 | 316 | Tension | 25.5 | 176 |
| | | Shear | 9.7 | 67 |
| 700 | 371 | Tension | 24.9 | 172 |
| | | Shear | 9.4 | 65 |
| 800 | 427 | Tension | 24.2 | 167 |
| | | Shear | 9.1 | 63 |
| 900 | 482 | Tension | 23.6 | 163 |
| | | Shear | 8.8 | 61 |
| 1000 | 538 | Tension | 23.0 | 159 |
| | | Shear | 8.5 | 59 |
| 1100 | 593 | Tension | 22.4 | 154 |
| | | Shear | 8.2 | 57 |
| 1200 | 649 | Tension | 21.8 | 150 |
| | | Shear | 7.9 | 54 |
| 1300 | 704 | Tension | 21.2 | 146 |
| | | Shear | 7.6 | 52 |
| 1400 | 760 | Tension | 20.5 | 141 |
| | | Shear | 7.2 | 50 |
| 1500 | 816 | Tension | 19.0 | 131 |
| | | Shear | 6.9 | 48 |
| 1600 | 871 | Tension | 19.2 | 132 |
| | | Shear | 6.6 | 46 |

TYPE 316 S31600

| CHEMICAL COMPOSITION, (Maximum unless noted otherwise) | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|-----------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------|-----------|----------------|
| C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | N | Mo | Ti | Al | Cb + Ta |
| 0.08 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 1.00 | 16.00/ 18.00 | 10.00/ 14.00 | | 2.00/ 3.00 | | | |

| REPRESENTATIVE MECHANICAL PROPERTIES (Annealed sheet unless noted otherwise) | | | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------------------|------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| Test Temperature | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area | Hardness Rockwell | |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % | B | |
| 80 | 27 | 42 | 290 | 84 | 579 | 50 | | 79 | |
| 300 | 149 | 29.2 | 201 | 75 | 517 | 53 | 77 | | |
| 500 | 260 | 25 | 172 | 73 | 503 | 49 | 75 | | |
| 700 | 371 | 23 | 159 | 72.5 | 500 | 47 | 69 | | |
| 900 | 482 | 21.5 | 148 | 70.2 | 484 | 47 | 69 | | |
| 1100 | 593 | 20.3 | 140 | 65.5 | 452 | 44 | 63 | | |
| 1300 | 704 | 19 | 131 | 50 | 345 | 43 | 58 | | |
| 1500 | 816 | 16 | 110 | 27 | 186 | 42 | 55 | | |
| 1700 | 927 | | | 11.6 | 80 | 67 | 60 | | |
| 1900 | 1038 | | | 5.6 | 39 | 60 | 47 | | |
| 2000 | 1093 | | | 4 | 28 | 75 | 55 | | |

| REPRESENTATIVE CREEP AND RUPTURE PROPERTIES | | | | | | | | | |
|--|-----|--|------------|--|------------|----------------------------------|------------|---------------------|------------|
| Test Temperature | | Stress for a Creep Rate of | | | | Stress for Rupture in | | | |
| | | 0.0001% per Hour (1% in 10,000 Hours) | | 0.00001% per Hour (1% in 100,000 Hours) | | 1,000 Hours | | 10,000 Hours | |
| | | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa |
| 1000 | 538 | 35.5 | 245 | 20.1 | 139 | 50 | 345 | 43 | 296 |
| 1100 | 593 | 22.5 | 155 | 12.4 | 85 | 34 | 234 | 26.5 | 183 |
| 1200 | 649 | 14.2 | 98 | 7.9 | 54 | 23 | 159 | 16.2 | 112 |
| 1300 | 704 | 8.9 | 61 | 4.8 | 33 | 15.4 | 106 | 9.9 | 68 |
| 1400 | 760 | 5.6 | 39 | 3 | 21 | 10.3 | 71 | 6 | 41 |
| 1500 | 816 | 3.6 | 25 | 1.9 | 13 | 6.7 | 46 | 3.7 | 26 |

| EFFECT OF PROLONGED EXPOSURE AT ELEVATED TEMPERATURES | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------------------|------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Representative Mechanical Properties at Room Temperature | | | | | | | |
| 10,000 Hours (Without Stress) Exposure Temp. | | Yield Strength 0.2% Offset | | Tensile Strength | | Elongation in 2" (50.80mm) | Reduction of Area |
| °F | °C | ksi | MPa | ksi | MPa | % | % |
| 900* | 482 | 45 | 310 | 91.9 | 634 | 60 | 73 |
| 1050 | 566 | 41.8 | 288 | 97.2 | 670 | 49 | 65 |
| 1200* | 649 | 50.5 | 348 | 113 | 779 | 31 | 49 |

*100,000 Hours

PHYSICAL PROPERTIES

Thermal Conductivity

| | Btu/hr/sq ft/ft/°F W/m•K | |
|----------------|--------------------------|-------|
| 212°F (100°C)— | 9.4 | 0.113 |
| 932°F (500°C)— | 12.4 | 0.149 |

Mean Coefficient of Thermal Expansion per Degree °F (°C) (×10⁶)

| | | |
|----------------------------|------|--------|
| 32 to 212°F (0 to 100°C)— | 8.9 | (15.9) |
| 32 to 600°F (0 to 315°C)— | 9.0 | (16.2) |
| 32 to 1000°F (0 to 538°C)— | 9.7 | (17.5) |
| 32 to 1200°F (0 to 649°C)— | 10.3 | (18.6) |
| 32 to 1500°F (0 to 815°C)— | 11.1 | (20.0) |

Modulus of Elasticity

| Temperature | | Modulus | psi (×10 ⁶) | GPa |
|-------------|-----|---------|-------------------------|-----|
| °F | °C | | | |
| 80 | 27 | Tension | 28.0 | 193 |
| 200 | 93 | Tension | 28.1 | 194 |
| | | Shear | 11.0 | 76 |
| 300 | 149 | Tension | 27.5 | 190 |
| | | Shear | 10.6 | 73 |
| 400 | 204 | Tension | 26.9 | 185 |
| | | Shear | 10.3 | 71 |
| 500 | 260 | Tension | 26.3 | 181 |
| | | Shear | 10.0 | 69 |
| 600 | 316 | Tension | 25.6 | 177 |
| | | Shear | 9.7 | 67 |
| 700 | 371 | Tension | 24.9 | 172 |
| | | Shear | 9.4 | 65 |
| 800 | 427 | Tension | 24.2 | 167 |
| | | Shear | 9.1 | 63 |
| 900 | 482 | Tension | 23.5 | 162 |
| | | Shear | 8.8 | 61 |
| 1000 | 538 | Tension | 22.8 | 157 |
| | | Shear | 8.5 | 59 |
| 1100 | 593 | Tension | 22.2 | 153 |
| | | Shear | 8.3 | 57 |
| 1200 | 649 | Tension | 21.5 | 148 |
| | | Shear | 8.1 | 56 |
| 1300 | 704 | Tension | 20.8 | 143 |
| | | Shear | 7.9 | 54 |
| 1400 | 760 | Tension | 20.0 | 138 |
| | | Shear | 7.7 | 53 |
| 1500 | 816 | Tension | 19.1 | 132 |
| | | Shear | 7.5 | 52 |

ANEXO III:
SILICONA SOUDAL HT-N

Silirub HT°-N

Revision: 10/09/2015

Page 1 from 2

Technical data

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Basis | Polysiloxane |
| Consistency | Stable paste |
| Curing system | Moisture curing |
| Skin formation* (20°C / 65% R.H.) | Ca. 5 min |
| Curing speed * (20°C / 65% R.H.) | 2 mm/24h |
| Hardness | 40 ± 5 Shore A |
| Density | Ca. 1,18 g/ml |
| Elastic recovery (ISO 7389) | > 80 % |
| Maximum allowed distortion | ± 15 % |
| Temperature resistance | -50 °C → 280 °C |
| Max. tension (DIN 53504) | 3,00 N/mm ² |
| Elasticity modulus 100% (DIN 53504) | 1,10 N/mm ² |
| Elongation at break (DIN 53504) | > 300 % |
| Application temperature | 5 °C → 35 °C |

(*) these values may vary depending on environmental factors such as temperature, moisture, and type of substrates.

Product description

Silirub HT°-N is an elastic, single component engineering sealant based on silicone which withstands very high temperatures.

Properties

- Permanent elastic after curing
- Neutral curing, high modulus
- High adhesion force
- Temperature resistance up to 280°C

Applications

- Sealing of heating installations.
- Sealing in pumps and engines.
- All sealing applications that require high temperature resistance.

Packaging

Colour: black

Packaging: 310 ml cartridge

Shelf life

12 months in unopened packaging in a cool and dry storage place at temperatures between +5°C and +25°C.

Substrates

Substrates: all usual building substrates, all metals

Nature: clean, dry, free of dust and grease.

Surface preparation: Porous surfaces in water loaded applications should be primed with Primer 150. All smooth surfaces can be treated with Surface Activator.

There is no adhesion on PE, PP, PTFE (Teflon®) and bituminous substrates. We recommend a preliminary adhesion test on every surface.

Joint dimensions

Min. width for joints: 5 mm

Max. width for joints: 30 mm

Min. depth for joints: 5 mm

Recommendation sealing jobs: joint width = 2 x joint depth.

Application method

Application method: With manual- or pneumatic caulking gun.

Cleaning: Clean with white spirit or Surface Cleaner immediately after use.

Finishing: With a soapy solution or Soudal Finishing Solution before skinning.

Repair: With the same material

Remark: This technical data sheet replaces all previous versions. The directives contained in this documentation are the result of our experiments and of our experience and have been submitted in good faith. Because of the diversity of the materials and substrates and the great number of possible applications which are out of our control, we cannot accept any responsibility for the results obtained. Since the design, the quality of the substrate and processing conditions beyond our control, no liability under this publication are accepted. In every case it is recommended to carry out preliminary experiments. Soudal reserves the right to modify products without prior notice.

Silirub HT°-N

Revision: 10/09/2015

Page 2 from 2

Health- and Safety Recommendations

Take the usual labour hygiene into account.
Consult label for more information.

Remarks

- Do not use on natural stones like marble, granite,...(staining). Use Soudal Silirub MA or Silirub+ S8800 for this application.
- Direct contact with the secondary sealing of insulating glass units (insulation) and the PVB-film of safety glass must be avoided.
- When finished with a finishing solution or soapy solution, make sure that the surfaces are not touched by this solution. This will cause the sealant not to adhere to that surface. Therefore we recommend to only dip the finishing tool in this solution.
- We strongly recommend not to apply the product in full sunlight as it will dry very fast.
- Do not use in applications where continuous water immersion is possible.

Environmental clauses

Lead regulation:

Silirub HT°-N conforms to the requirements of LEED. Low –Emitting Materials: Adhesives and Sealants. SCAQMD rule 1168. Complies with USGBC LEED® 2009 Credit 4.1: Low-Emitting Materials – Adhesives & Sealants concerning the VOC-content.

Liability

The content of this technical data sheet is the result of tests, monitoring and experience. She is general in nature and does not constitute any liability. It is the responsibility of the user to determine by his own tests whether the product is suitable for the application.

Remark: This technical data sheet replaces all previous versions. The directives contained in this documentation are the result of our experiments and of our experience and have been submitted in good faith. Because of the diversity of the materials and substrates and the great number of possible applications which are out of our control, we cannot accept any responsibility for the results obtained. Since the design, the quality of the substrate and processing conditions beyond our control, no liability under this publication are accepted. In every case it is recommended to carry out preliminary experiments. Soudal reserves the right to modify products without prior notice.