

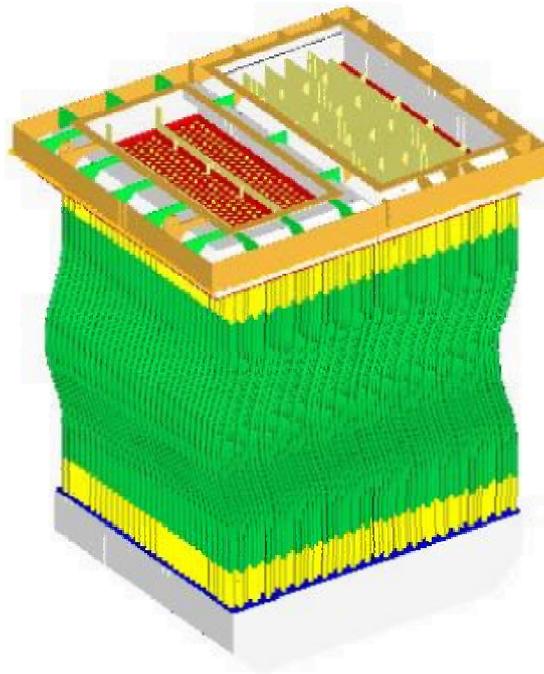


CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



PROYECTO FIN DE CARRERA

**CÁLCULO RESISTENTE POR EL MÉTODO DE
LOS ELEMENTOS FINITOS DE UN
INTERCAMBIADOR DE CALOR CONSIDERANDO
ACOPLAMIENTO TERMO-ELÁSTICO**



Realizado por
Pablo Martínez Pascual

Dirigido por
Elvio A. Heidenreich

Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Departamento de Ingeniería Mecánica

Zaragoza, Junio 2006

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia y amigos su apoyo, tanto en estos años de carrera como en otros aspectos de la vida.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han ayudado en la realización de este Proyecto, a los componentes del Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, y en especial a Elvio A. Heidenreich y José Manuel García Aznar por su apoyo.

Zaragoza, Junio 2006

Pablo Martínez Pascual

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Origen del proyecto.....	1
1.2. Descripción del problema	1
1.3. Alcance y objetivos del proyecto	2
2. Materiales y Método	5
2.1. Geometría.....	5
2.2. Módulo de elementos finitos.....	6
2.2.1. Malla.....	6
2.2.2. Material.....	7
2.3. Condiciones de contorno.....	9
2.4. Cargas.....	10
2.5. Post-procesado de los datos.....	12
3. Resultados	13
3.1. Resultados del modelo 1	13
3.1.1. Tensiones; tensión de Von Mises	13
3.1.2. Índice de Tensión de Fluencia (I.T.F.)	17
3.2. Comparación de resultados	21
4. Conclusiones	25
4.1. Conclusiones de la investigación	25
4.2. Cumplimiento de objetivos	26
4.3. Líneas futuras de trabajo	26
Anexo A: Mallado	27
A.1. Modelo 1: modelo original.....	27
A.2. Modelo 2: Esquinas de las tolvas liberadas.....	30
A.3. Modelo 3: Esquinas de las tolvas liberadas, acero AISI-310.....	31
A.4. Modelo 4: modelo 2+ bandejas inferiores libres.....	31
A.5. Modelo 5: modelo 4 + cambio rigidez escuadras.....	32
A.6. Modelo 6: modelo 6 en acero AISI-310.....	32
Anexo B: Materiales	33
B.1. Introducción: aceros inoxidables.....	33
B.2. Efectos de la temperatura	36

B.3. Aceros empleados en el modelo.....	38
B.3.1. Material 1: Acero 1.4845	38
B.3.2 Material 2: Acero 1.4878	41
B.3.3 Material 3: Acero 1.4541	43
B.3.4 Material 4: Acero 1.4301	46
B.3.5 Material 5: Acero 1.4818	48
B.3.6 Material 6: Acero 1.4828	51
Anexo C: Puntos de comparación de modelos	55
Anexo D: Resultados	59
D.1. Modelo 1	59
D.1.1 Modelo1 :Peso propio.....	59
D.1.2 Modelo 1: Temperatura	61
D.1.3 Modelo1: Peso propio + temperatura	62
D.2. Modelo 2	65
D.3. Modelo 3	68
D.4. Modelo 4	71
D.5. Modelo 5	74
D.6. Modelo 6	77
Anexo E: Fotos de rotura del modelo real.....	81
Anexo F: Determinación de I.T.F.	85
Bibliografía.....	89

Índice de Figuras

Figura 1.1: Esquema del problema	2
Figura 2.1: Geometría	5
Figura 2.2: De la geometría real a la malla	7
Figura 2.3: Módulo elástico de los diferentes aceros.....	8
Figura 2.4: Coeficiente de dilatación de los diferentes aceros.....	8
Figura 2.5: Tensión de fluencia (30.000 h)	9
Figura 2.6: condiciones de contorno	10
Figura 2.7: Temperaturas.....	11
Figura 2.8: Gráfica de temperaturas	11
Figura 3.1: modelo1 tensión de Von Mises (MPa).....	14
Figura 3.2: modelo1 tensión en tubos y desplazamientos	14
Figura 3.3: Modelo1:tensión en tolvas (MPa).....	15
Figura 3.4: Modelo 1: bandeja superior y cajón retorno.....	15
Figura 3.5: Esquina tolva salida.....	16
Figura 3.6: Modelo1. ITF-1	17
Figura 3.7: Modelo1. ITF-2	18
Figura 3.8: Modelo1. ITF-3	19
Figura 3.9: Modelo1. ITF-4	20
Figura 3.10: Tabla 1. Comparación de tensiones	21
Figura 3.11: Gráfico. Comparación de tensiones	21
Figura 3.12: Tabla 2. Variación respecto modelo 1 (%)	22
Figura 3.13: Gráfica. Variación respecto modelo 1 (%).....	22
Figura A1.....	27
Figura A2.....	28
Figura A3.....	28
Figura A4.....	29
Figura A5.....	29

Figura A6.....	30
Figura A7.....	30
Figura A8.....	31
Figura A9.....	32
Figura B.1: Tabla materiales.....	34
Figura B.2. Tensiones de rotura para aceros inoxidables.....	37
Figura B.3. Coeficiente α . Acero 1.4845	39
Figura B.4. Módulo elástico. Acero 1.4845.....	39
Figura B.5. Tensión de fluencia. Acero 1.4845.....	40
Figura B.6 Componentes material 1	40
Figura B.7. Coeficiente α . Acero 1.4878	41
Figura B.8. Módulo elástico. Acero 1.4878.....	42
Figura B.9. Tensión de fluencia. Acero 1.4878.....	42
Figura B.10 Componentes material 2	43
Figura B.11. Coeficiente α . Acero 1.4541	44
Figura B.12. Módulo elástico. Acero 1.4878.....	44
Figura B.13. Tensión de fluencia. Acero 1.4878.....	45
Figura B.14 Componentes material 3	45
Figura B.15. Coeficiente α . Acero 1.4301	46
Figura B.16. Módulo elástico. Acero 1.4301.....	47
Figura B.17. Tensión de fluencia. Acero 1.4301.....	47
Figura B.18 Componentes material 4	48
Figura B.19. Coeficiente α . Acero 1.4818	49
Figura B.20. Módulo elástico. Acero 1.4818.....	49
Figura B.21. Tensión de fluencia. Acero 1.4818.....	50
Figura B.22 Componentes material 5	50
Figura B.23. Coeficiente α . Acero 1.4828	51
Figura B.24. Módulo elástico. Acero 1.4828.....	52
Figura B.25. Tensión de fluencia. Acero 1.4828.....	52
Figura B.26 Componentes material 6	53
Figura C1: Tabla. Puntos de comparación de modelos	55
Figura C2: Punto 1	56
Figura C3: Puntos 2 y 3.....	56
Figura C4: Puntos 4 y 5.....	57
Figura C5: Puntos 6 y 9.....	57
Figura C6: Puntos 7 y 8.....	58
Figura C7: Puntos 10, 11 y 12.....	58
Figura D1: Modelo 1. Peso propio. Tensión en tubos (MPa).....	59
Figura D2: Modelo 1. Peso propio. Tensión 1.....	60
Figura D3: Modelo 1. Peso propio. Tensión 2.....	60
Figura D4: Modelo 1. Temperatura. Tensión en tubos (MPa).....	61
Figura D5: Modelo 1. Temperatura. Tensión 1	61

Figura D6: Modelo 1. Temperatura. Tensión 2	62
Figura D7: Modelo 1. pp+Temp. Tensión en tubos (MPa)	62
Figura D8: Modelo 1. pp+Temp. Tensión 1	63
Figura D9: Modelo 1. pp+temp. Tensión 2.....	63
Figura D10: Modelo 1. I.T.F.-1	64
Figura D11: Modelo 1. I.T.F.-2	64
Figura D13: Modelo 2. Tensión en tubos (MPa).....	65
Figura D14: Modelo 2. Tensión 1	66
Figura D15: Modelo 2.Tensión 2	66
Figura D15: Modelo 2.I.T.F.-1	67
Figura D16: Modelo 2.I.T.F.-2	67
Figura D17: Modelo 2.I.T.F.-3	68
Figura D18: Modelo 3. Tensión en tubos (MPa).....	68
Figura D19: Modelo 3. Tensión 1	69
Figura D20: Modelo 3.Tensión 2	69
Figura D21: Modelo 3.I.T.F.-1	70
Figura D22: Modelo 3.I.T.F.-2	70
Figura D23: Modelo 3.I.T.F.-3	71
Figura D24: Modelo 4. Tensión en tubos (MPa).....	71
Figura D25: Modelo 4. Tensión 1	72
Figura D26: Modelo 4.Tensión 2	72
Figura D27: Modelo 4.I.T.F.-1	73
Figura D28: Modelo 4.I.T.F.-2	73
Figura D29: Modelo 4.I.T.F.-3	74
Figura D30: Modelo 5. Tensión en tubos (MPa).....	74
Figura D31: Modelo 5. Tensión 1	75
Figura D32: Modelo 5.Tensión 2	75
Figura D30: Modelo 5.I.T.F.-1	76
Figura D31: Modelo 5.I.T.F.-2	76
Figura D32: Modelo 5.I.T.F.-3	77
Figura D33: Modelo 6. Tensión en tubos (MPa).....	77
Figura D34: Modelo 6. Tensión 1	78
Figura D35: Modelo 6.Tensión 2	78
Figura D36: Modelo 6.I.T.F.-1	79
Figura D37: Modelo 6.I.T.F.-2	79
Figura D38: Modelo 6.I.T.F.-3	80
Figura E.1: Rotura en esquina tolva de salida.....	81
Figura E.2: Tolva de salida, tubos-1	82
Figura E.3: Primera hilera de tubos	82
Figura E.4: Tolva de salida, tubos-2	83
Figura E.5: Tolva de salida, tubos-3	83
Figura E.6: Tolva de salida, tubos-4	84

Figura E.7: Tolva de salida, tubos-5	84
Figura F.1: Esquema de cálculo de I.T.F.	86

1. Introducción

1.1. Origen del proyecto

Este proyecto surge a raíz de un acuerdo de colaboración entre KALFRISA S.A. ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE y el área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras (MMyTE) de la Universidad de Zaragoza. KALFRISA S.A. acude al área de MMyTE para que se realice un estudio de un determinado modelo de intercambiador de calor, el modelo tiene ciertos problemas que se desean subsanar. Se decide comenzar el estudio del intercambiador de calor mediante un proyecto final de carrera, a partir de este estudio se tomarán las primeras soluciones.

1.2. Descripción del problema

Se trata de un intercambiador de calor gases- aire, gases provenientes de una incineración de gas natural que pasan por este intercambiador a unos 900 °C, el aire a calentar entra a una temperatura de 20°C y sale a unos 800 °C. El aire entra por la tolva de entrada, pasa a lo largo de 630 tubos, donde se produce el intercambio de calor con los gases provenientes de la incineración, al terminar los tubos, el aire llega al cajón de retorno, allí cambian la dirección del flujo y suben hacia la tolva de salida recorriendo otros 630 tubos, por los cuales continua la transferencia de calor. Este proceso se puede ver en la figura 1.

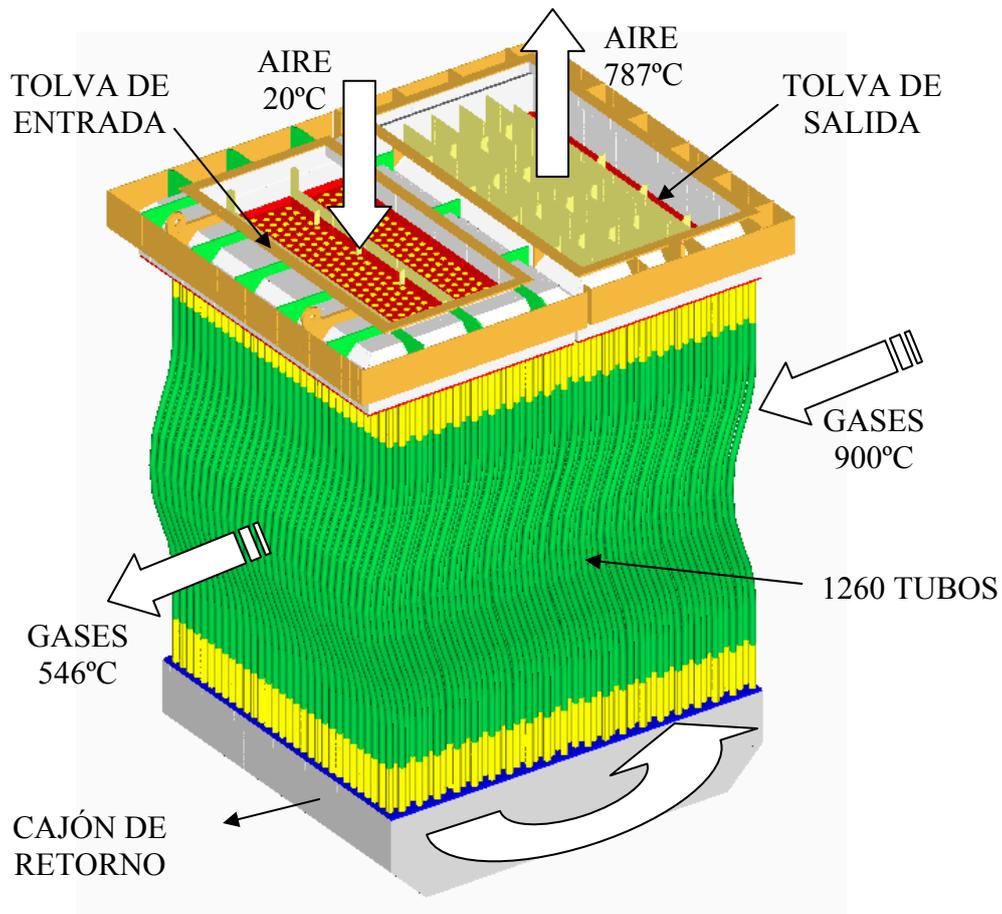


Figura 1.1: Esquema del problema

1.3. Alcance y objetivos del proyecto

El problema real es muy largo; el problema de mecánica de fluidos y el de transferencia de calor. KALFRISA S.A. ha facilitado la geometría y las temperaturas que posee el intercambiador, tanto en tubos como en tolvas y cajón de retorno. Así pues, partiremos de estas temperaturas para comenzar nuestro modelo, estas temperaturas serán la carga que deba soportar nuestro modelo (además del peso propio), la temperatura produce una deformación, si hay restricción a dicha deformación, se producirá un incremento de tensión.

KALFRISA S.A. ha proporcionado los diferentes materiales con los que está construido el intercambiador, para su modelización se ha tenido en cuenta; la variación del coeficiente de dilatación con respecto a la temperatura ($\alpha [T]$), el módulo elástico del material frente a la temperatura ($E [T]$) y el límite de tensión de fluencia a con

respecto de la temperatura (σ_{creep} (nº horas) [T]). También han sido facilitadas fotos de los puntos de rotura del intercambiador.

La metodología de trabajo ha sido la siguiente:

- Realización de la malla en un programa de elementos finitos (NX NASTRAN) a partir de la geometría original del intercambiador. Obtener resultados y compararlo con los datos que ya teníamos de puntos de rotura. A partir de aquí se pudo validar la malla de elementos finitos.

- Una vez que se tiene la malla validada, se procede a realizar diferentes modificaciones para mejorar el modelo.

- Las diferentes mejoras se comparan, intentando buscar la solución óptima, para ello se establecen reuniones con la empresa y así ver la viabilidad de las soluciones (desde el punto de vista estructural) propuestas.

2. Materiales y Método

A lo largo de este capítulo se describen los pasos realizados para abordar el problema; reconstrucción de la geometría, mallado, materiales usados, condiciones de contorno, cargas y validación del modelo, para después ensayar mejoras en él.

2.1. Geometría

KALFRISA S.A. facilitó la geometría y materiales del intercambiador. La geometría se reconstruyó en NX NASTRAN a partir de planos en Autocad.

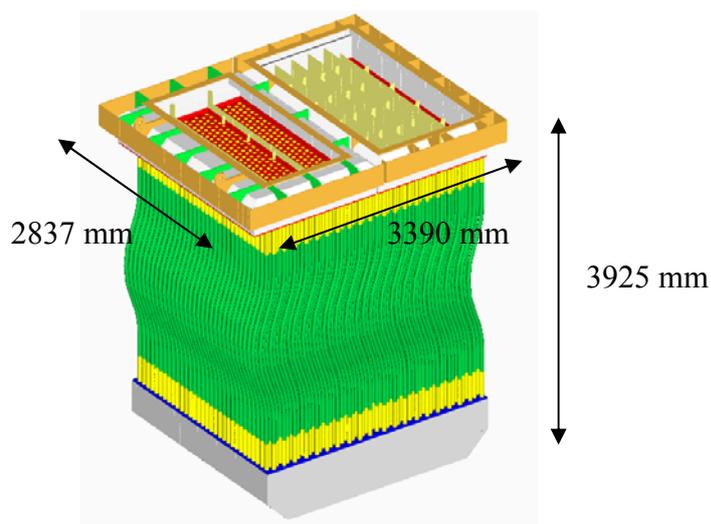


Figura 2.1: Geometría

Se comenzó dibujando las bandejas superiores e inferiores, unidas a los tubos, estos siete subconjuntos se enlazaron en otro archivo, después se dibujaron tolvas y el cajón de retorno. Las medidas generales del intercambiador son las siguientes; largo 3390 mm, ancho 2837 mm y de alto 3925 mm.

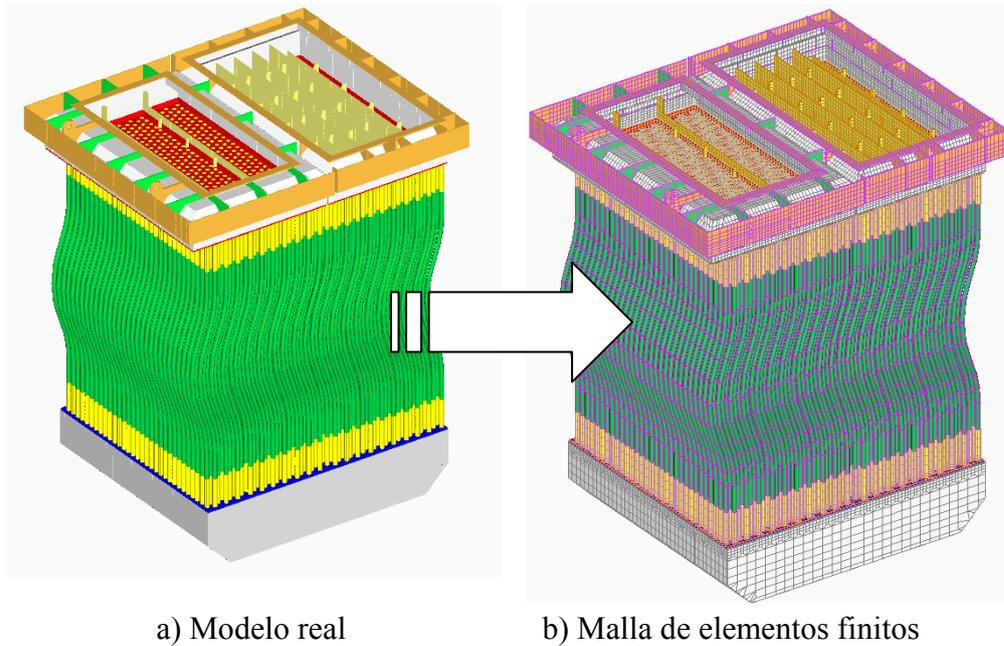
2.2. Módulo de elementos finitos

El programa comercial elegido ha sido NX Nastran, tanto para; mallado, cálculos y procesamiento posterior de los datos. En los siguientes apartados se explica; la malla elegida, tanto los tipos de elementos considerados como su tamaño, condiciones de contorno, cargas aplicadas y modelado de los materiales.

2.2.1. Malla

Dado que los datos disponibles para abordar el análisis mecánico no eran todo lo exactos que se requerían, sobretodo por las temperaturas, que no se conocen de forma exacta en todo el conjunto, se optó por un análisis global, los resultados obtenidos hay que interpretarlos como tendencias (aunque son bastante aproximados), es por ello que la malla no se ha afinado todo lo que se necesitaría para captar bien las tensiones en esquinas y uniones.

Dado que realizar un mallado automático del modelo era inviable desde el punto de vista del coste computacional, se optó por mallar de forma manual el conjunto. El intercambiador posee fenómenos de flexión (originado principalmente por los tubos), y dilataciones en las tres direcciones, se ha optado por un modelo de placas, para ello se ha propuesto el uso de cuadriláteros de 4 nodos y comportamiento lineal (en el módulo de elementos finitos "Plate Element"), los tubos se han modelado mediante elementos barra ("beam element").



a) Modelo real

b) Malla de elementos finitos

Figura 2.2: De la geometría real a la malla

El modelo se compone de de 165 221 elementos y 170 765 nodos, de los cuales 15 120 son elementos barras. Así pues tenemos $165\,221 - 15\,120 = 150\,101$ elementos placa, esto quiere decir que tenemos $150\,101 \times 5 + 15\,120 \times 6 = 841\,225$ grados de libertad a resolver.

El proceso de mallado viene explicado de forma detallada en el anexo A

2.2.2. Material

El intercambiador de calor se fabrica con distintos aceros, dependiendo de la zona de la estructura se colocan con unos aceros u otros. KALFRISA S.A. facilitó las propiedades de los aceros usados en la fabricación de del intercambiador.

Los distintos aceros se han modelizado en el módulo de elementos finitos a partir de las siguientes variables:

- Se supone material homogéneo, isótropo y lineal.
- Densidad; valor fijo para todos ellos de $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.
- Módulo elástico; varía para todos y es depende de la temperatura $E [T]$ (MPa). Ver figura 2.3
- Coeficiente de poisson; valor fijo para todos ellos $\nu = 0,3$.
- Coeficiente de dilatación térmica; varia para cada tipo de acero y depende de la temperatura. $\alpha [T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura 2.4.

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

- Tensión de fluencia para diferente número de horas dependiente con la temperatura, $\sigma_{creep}[n^{\circ} \text{ horas}, T]$ (MPa). Ver figura 2.5

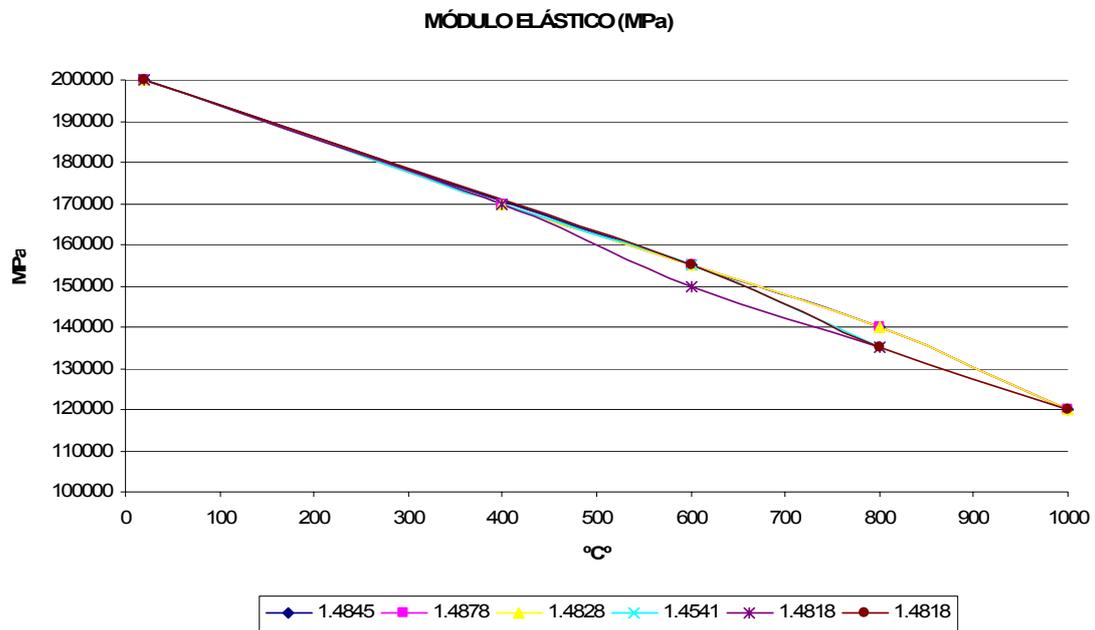


Figura 2.3: Módulo elástico de los diferentes aceros

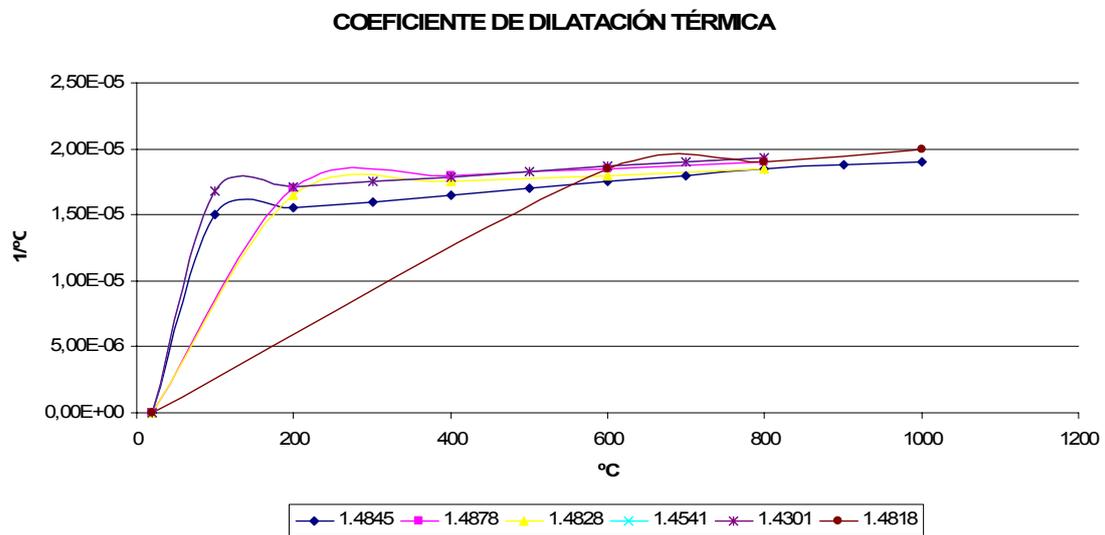


Figura 2.4: Coeficiente de dilatación de los diferentes aceros

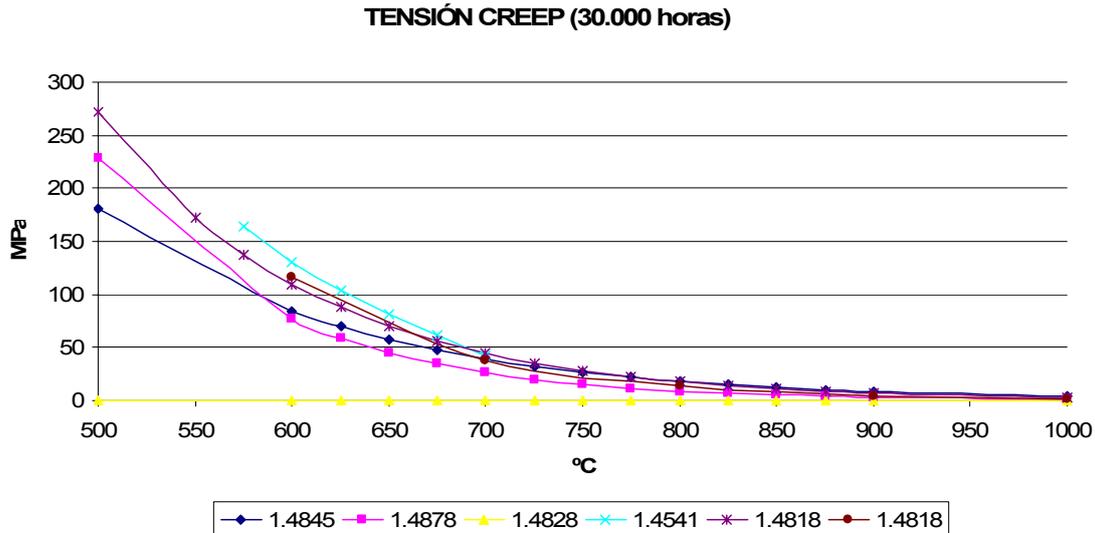


Figura 2.5: Tensión de fluencia (30.000 h)

En el anexo B se puede ver con más detalle información sobre cada acero.

2.3. Condiciones de contorno

El intercambiador se haya unido por las tolvas a unos conductos (entrada y salida de aire), esta unión se ha despreciado y se ha considerado sólo hasta las tolvas. El conjunto se haya apoyado en un armazón mediante los salientes que tienen las tolvas en su perímetro.

Los modelos; 1, 2 y 3 se han realizado restringiendo el desplazamiento vertical en los nodos del perímetro de las tolvas y cogiendo uno de la esquina de la tolva de salida como empotrado, para conseguir que el conjunto sea isostático en vez de un mecanismo. En la realidad serían todos esos nodos sin desplazamiento vertical y además tendríamos que añadir un rozamiento de esos nodos con el armazón, para que la estructura no fuera un mecanismo.

Los modelos 4, 5 y 6 también se han realizado restringiendo el desplazamiento vertical en los nodos del perímetro de las tolvas y cogiendo un nodo de una esquina de la tolva de salida y otro de la tolva de entrada como empotrados, de esta forma conseguimos que el conjunto sea isostático.

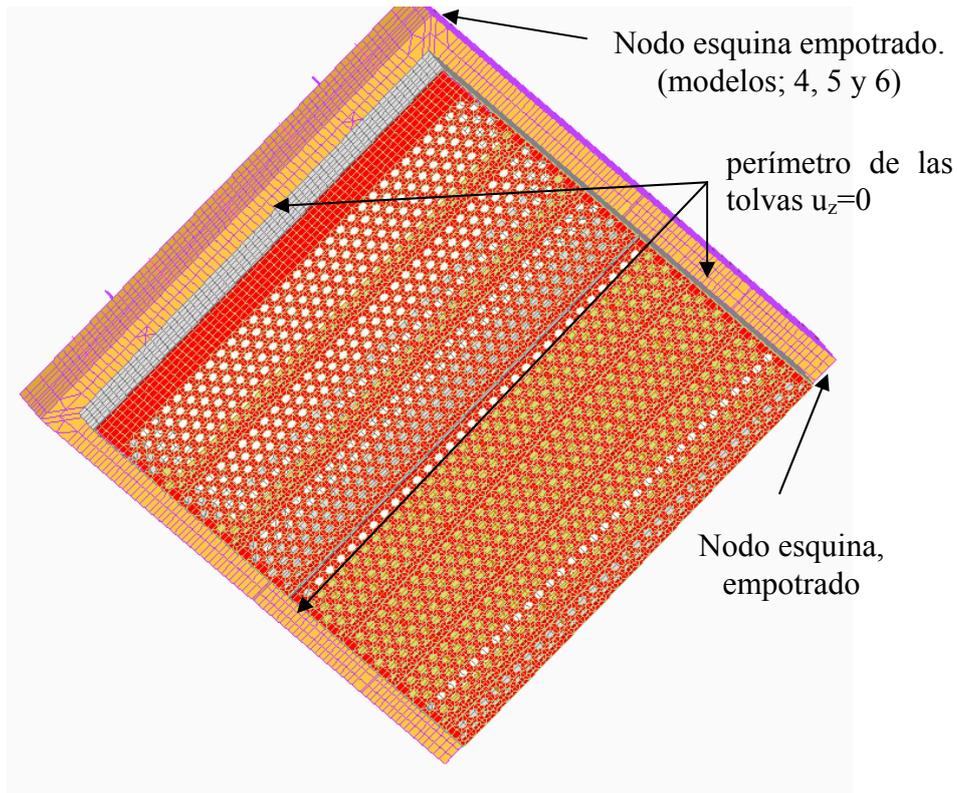


Figura 2.6: condiciones de contorno

2.4. Cargas

El conjunto se haya expuesto a dos cargas; el peso propio, y las dilataciones provenientes de la temperatura. Estas temperaturas han sido facilitadas por KALFRISA S.A. Se ha dividido la estructura en cinco zonas de temperatura.

- Tolva de entrada; posee una variación lineal de temperatura desde 330°C hasta 495°C a lo largo del eje y.
- Tolva de salida; desde 743°C hasta 853°C a lo largo del eje y.
- Cajón de retorno; desde 440 hasta 739°C
- Tubos, cada hilera de tubos posee una temperatura, desde 900°C hasta 546°C
- Perímetro de las tolvas, esta zona de apoyo posee 20°C menos que la zona de la tolva a la que pertenece, esta zona está menos caliente que el resto de la tolva ya que desde el punto vista de la transferencia de calor es una aleta que disipa.

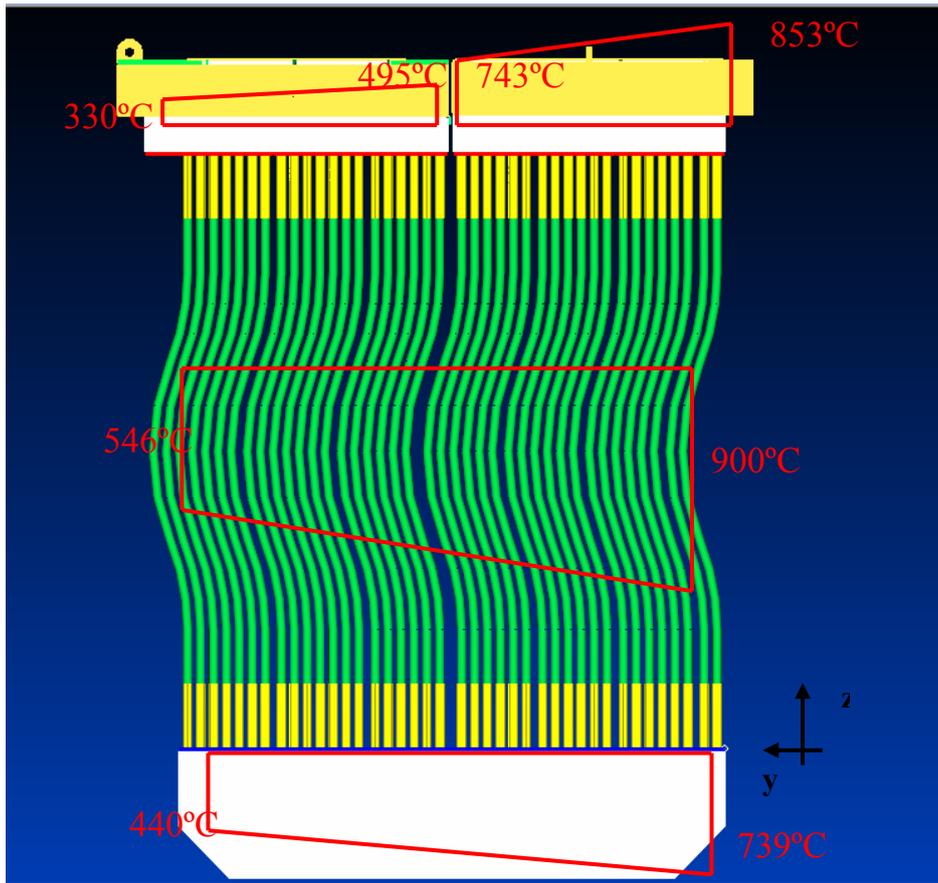


Figura 2.7: Temperaturas

A continuación se muestra un gráfico en el que podemos ver la variación de temperatura según la coordenada y.

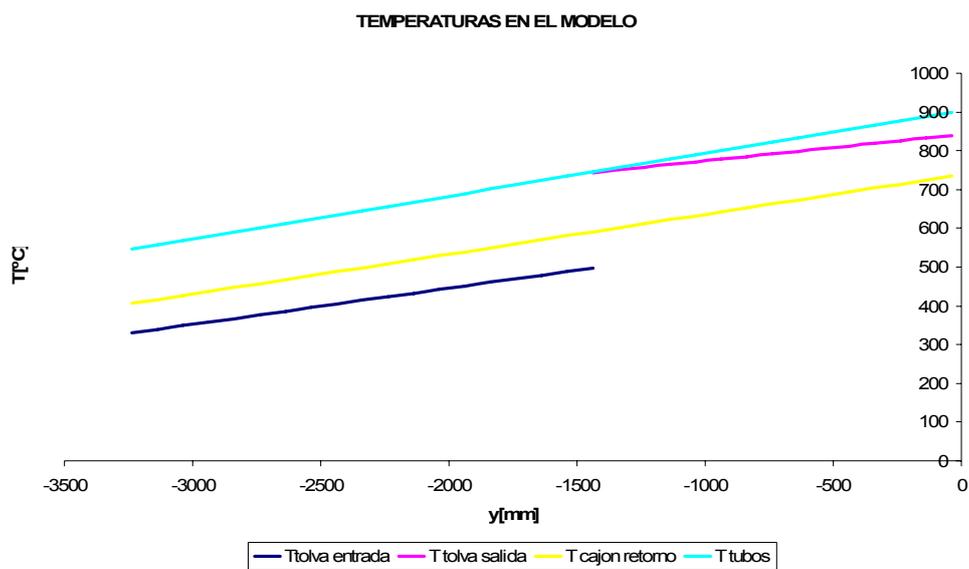


Figura 2.8: Gráfica de temperaturas

2.5. Post-procesado de los datos.

Una vez hemos obtenido los resultados de cada modelo se decide comparar la tensión de cada elemento con la tensión de fluencia, para ello se analiza el Índice de Tensión de Fluencia (I.T.F), que se puede ver en el anexo F. Este índice nos dará una idea de cuanto cerca estamos del fallo por fluencia, condición más restrictiva que la de la tensión de rotura.

Este índice es el cociente entre la tensión de Von Mises y la de fluencia del material. Ambas tensiones dependen de;

- La tensión de Von Mises; depende de la temperatura y de las características de cada material (módulo elástico y coeficiente de dilatación térmica).

- La tensión de fluencia; depende del material, del número de horas de trabajo y de la temperatura.

Este tratamiento de datos será externo al programa comercial, el procedimiento de programación de la subrutina y la posterior visualización de estos resultados se explica en el anexo F.

3. Resultados

Se han lanzado cálculos de 6 modelos diferentes, estos análisis los podemos consultar en el anexo C, en este apartado veremos los resultados para el modelo 1, después contrastaremos los diferentes resultados obtenidos, buscando el mejor diseño desde el punto de vista mecánico.

3.1. Resultados del modelo 1

En este apartado se muestran resultados del modelo original (modelo1); el primero de sus subapartados desde el criterio de la tensión equivalente de Von Mises, el siguiente a partir del criterio del Índice de Tensión de Fluencia (I.T.F., explicado en el anexo F).

3.1.1. Tensiones; tensión de Von Mises

El primer cálculo ha sido el del modelo 1, este modelo posee la geometría y materiales originales, en base al cual compararemos los restantes, analizando las mejoras obtenidas. A continuación se muestran resultados (figuras; 8, 9, 10 y 11), las tensiones reflejadas son las de Von Mises (MPa) y los desplazamientos los absolutos (mm).

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

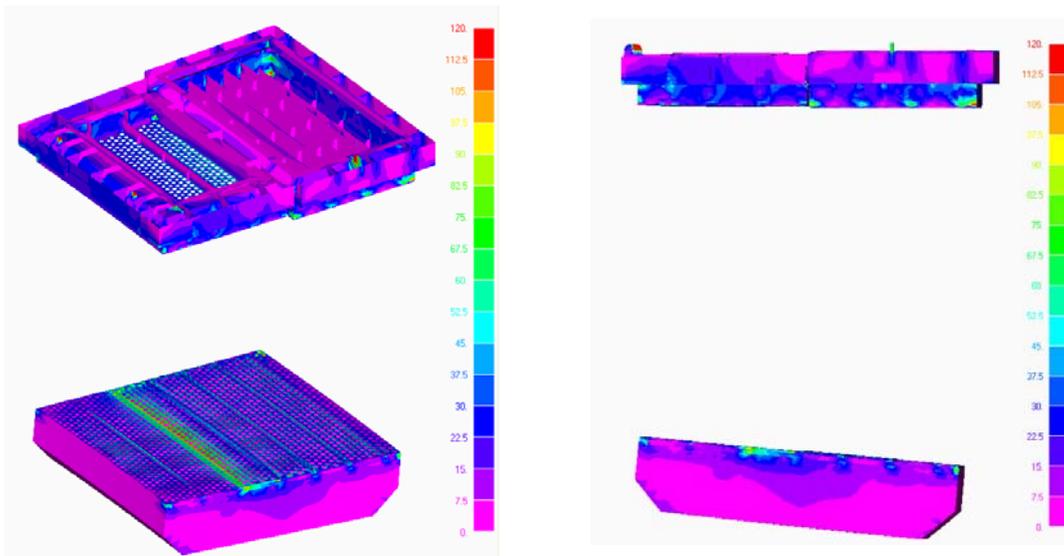


Figura 3.1: modelo1 tensión de Von Mises (MPa)

Los tubos se ven sometidos a una flexión originada por el gradiente de temperaturas, parte de este gradiente es absorbido por la flexión originada gracias a la curvatura de los tubos (figuras 3.1 y 3.2).

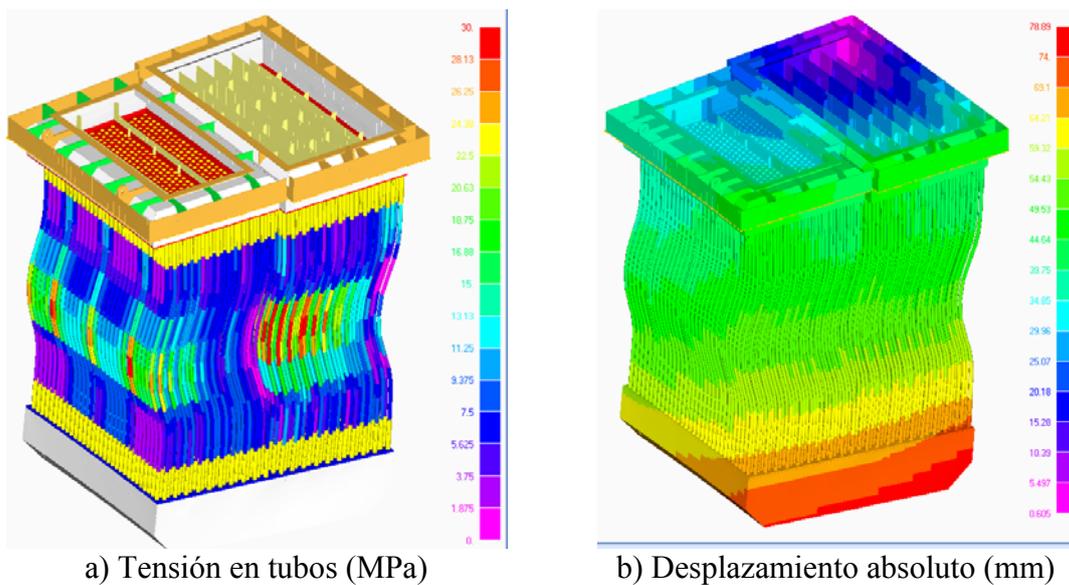


Figura 3.2: modelo1 tensión en tubos y desplazamientos

Las tolvas y bandeja superior se ven sometidas a los gradientes térmicos, sobretodo en las zonas de las esquinas (figuras 3.3 y 3.4 a)), ya que ahí tenemos concentrador de tensiones, además de variación del gradiente de temperatura correspondiente al perímetro de las tolvas (ver apartado 2.4 cargas).

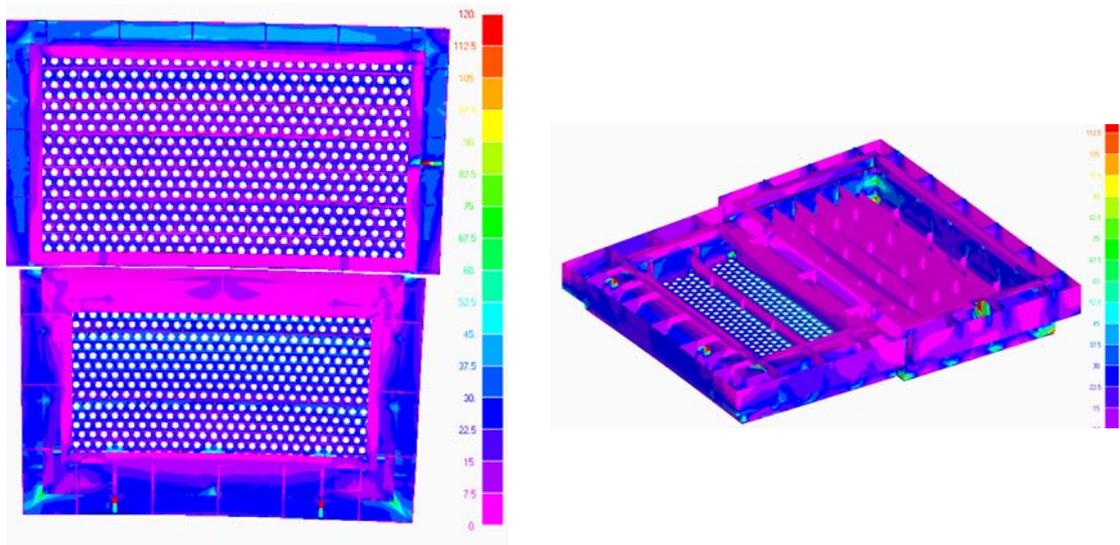
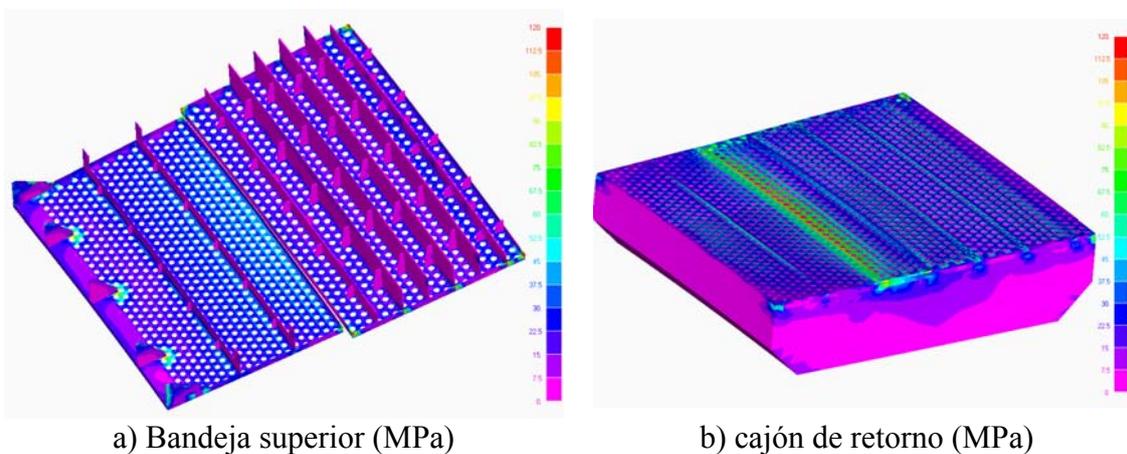


Figura 3.3: Modelo1:tensión en tolvas (MPa)

Otro punto de concentración de tensiones son los rigidizadores en escuadra de la tolva de entrada (figura 3.4.a)) y los rigidizadores con las paredes de las tolvas (figura 3.3).

La bandeja inferior posee una concentración de tensiones en la 5ª bandeja, debido a que en estas últimas cambia el material, siendo algo más rígido para esas temperaturas.



a) Bandeja superior (MPa)

b) cajón de retorno (MPa)

Figura 3.4: Modelo 1: bandeja superior y cajón retorno

Podemos comparar el modelo con la realidad a partir de las fotos proporcionadas por KALFRISA S.A. (anexo E). A continuación (figura 3.5), podemos observar una rotura en el intercambiador de calor con los resultados dados en el modelo 1. La foto ha sido tomada a la esquina de la tolva de salida, la zona de rotura se ha producido en la zona de unión de la placa perimetral que sirve de apoyo de las tolvas con el armazón, esto es debido a que las paredes de las tolvas intentan dilatar, pero esta placa perimetral ofrece una fuerte oposición, haciendo que se concentre en gran medida las tensiones.

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

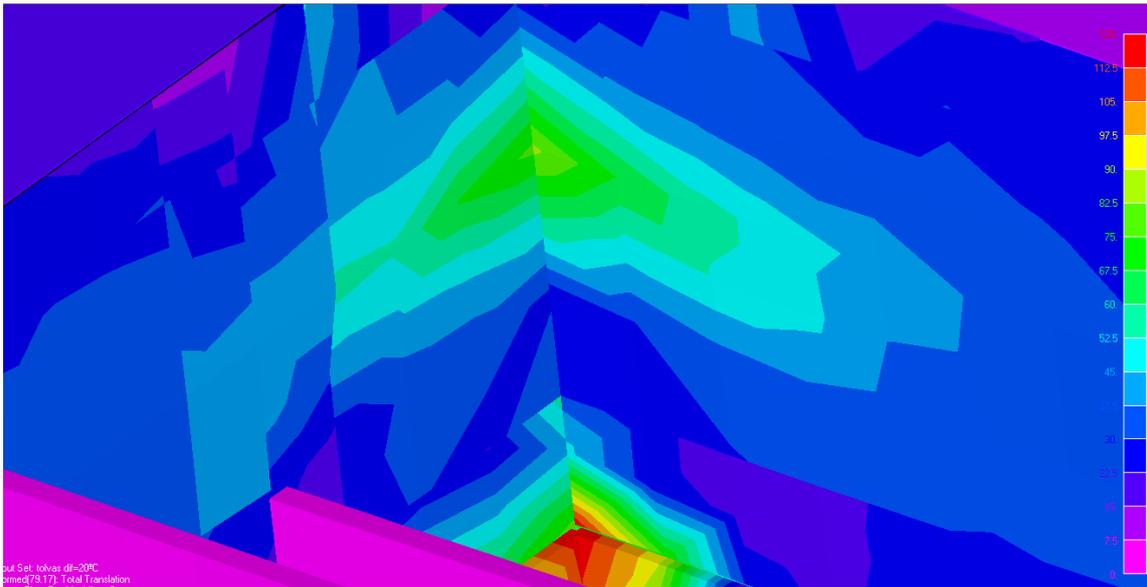
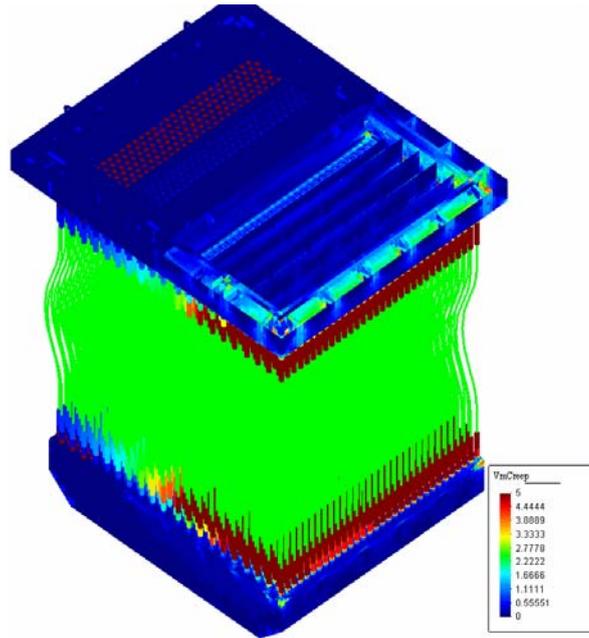


Figura 3.5: Esquina tolva salida

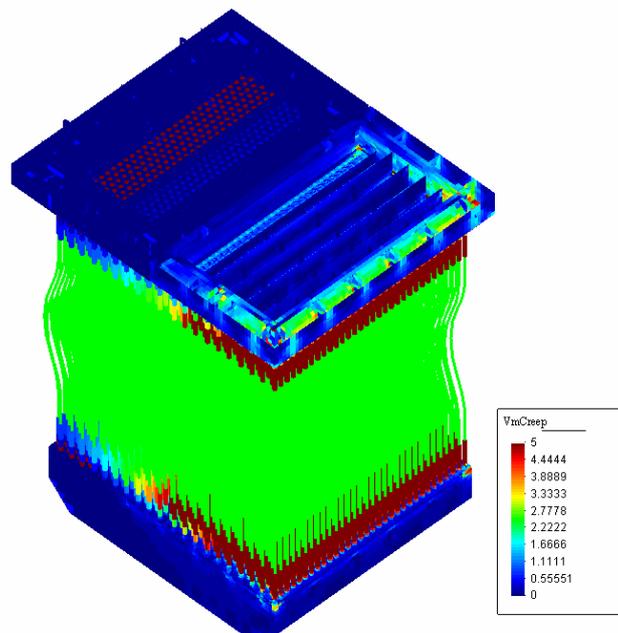
3.1.2. Índice de Tensión de Fluencia (I.T.F.)

Con este sencillo índice se va a examinar la tendencia del intercambiador a sufrir fenómenos de fluencia a lo largo de su vida útil. El modelo original ha sido probado para valores de I.T.F. de; 5000 h y 30.000 h.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para tolvas y cajón de retorno (figuras: 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), se ha representado un intervalo de ITF de 0 a 5.



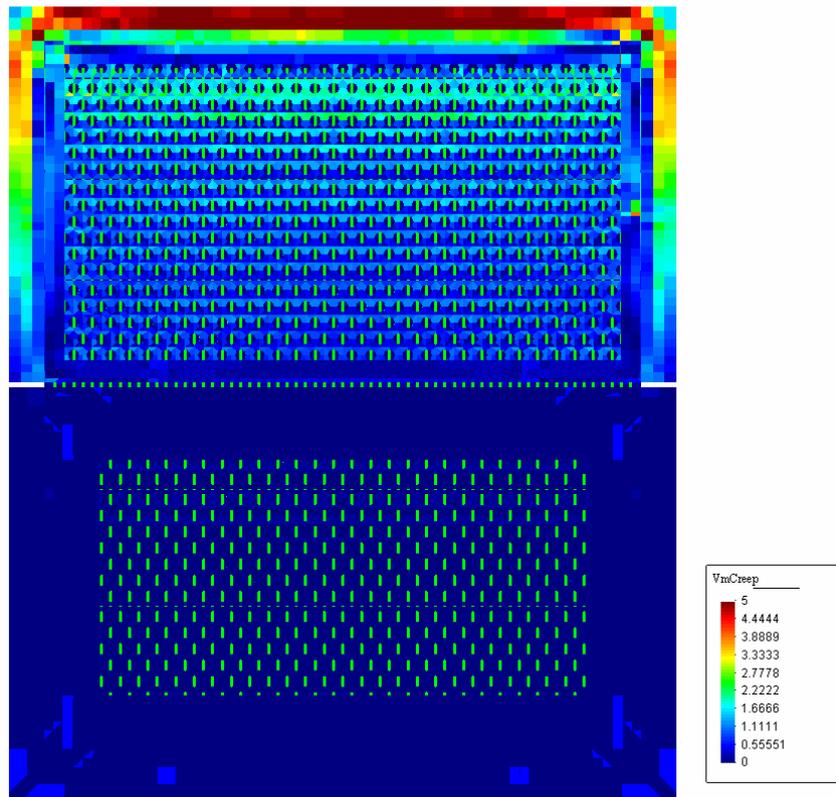
a) Para 5000 h de trabajo



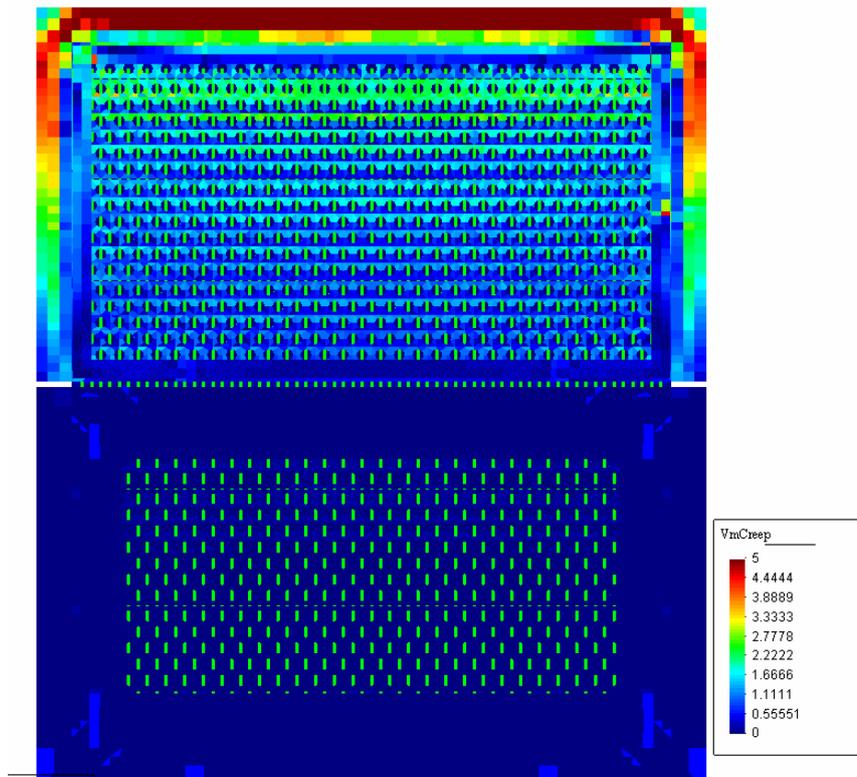
b) Para 30.000 h de trabajo

Figura 3.6: Modelo1. ITF-1

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

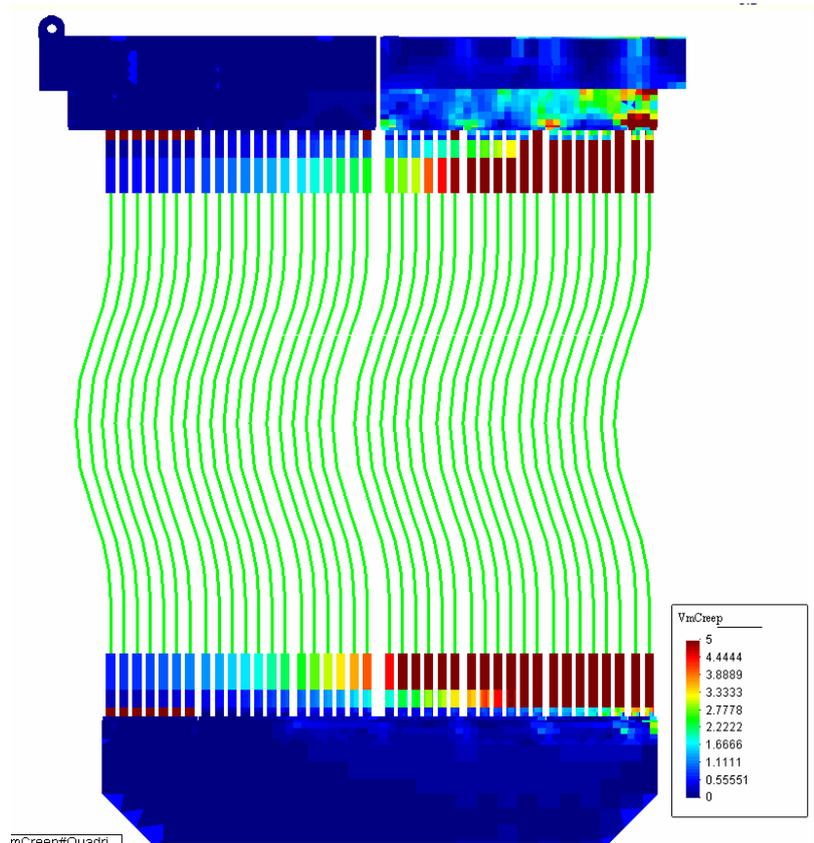


a) Para 5000 h de trabajo

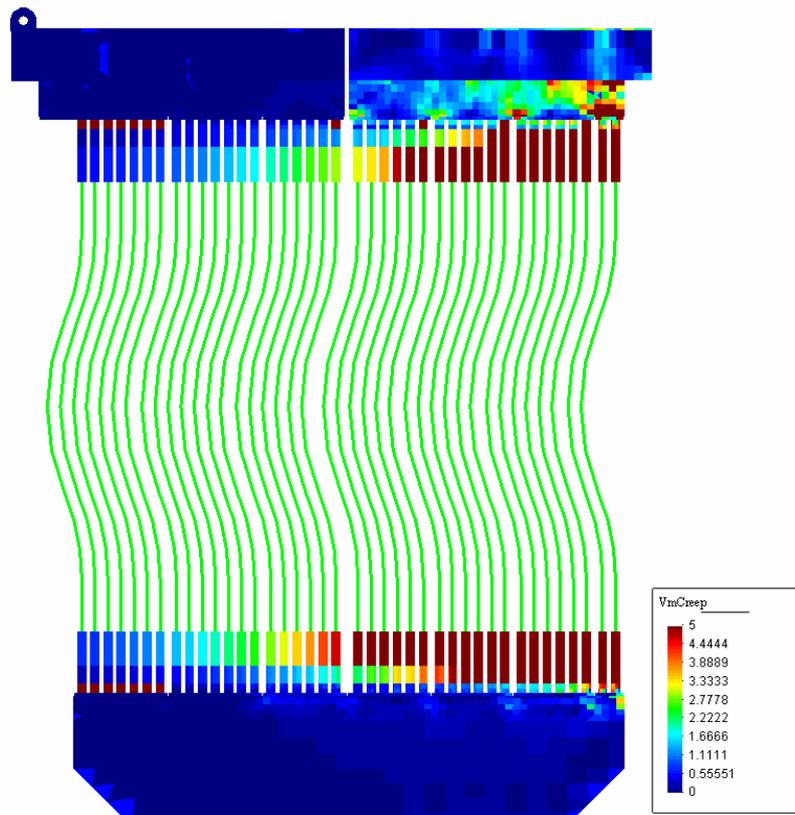


b) Para 30.000 h de trabajo

Figura 3.7: Modelo1. ITF-2

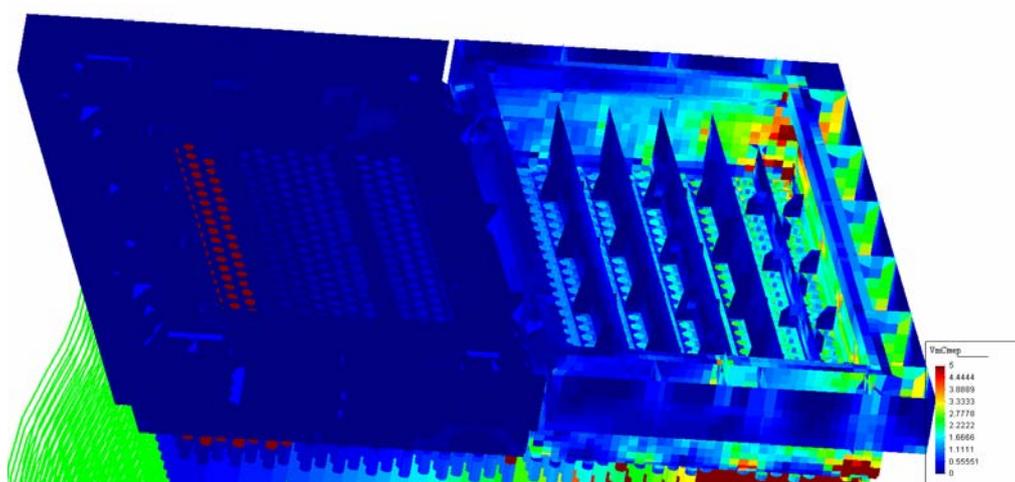


a) Para 5000 h de trabajo

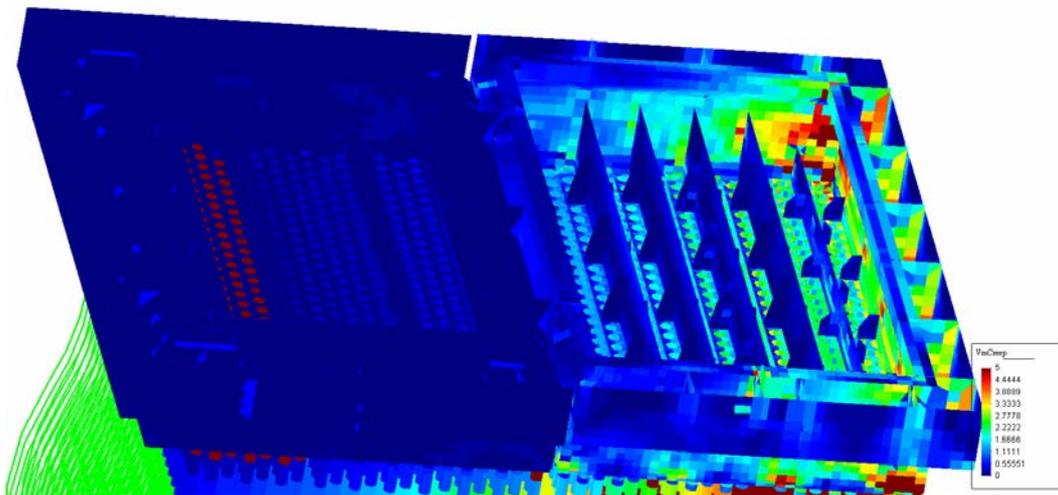


b) Para 30.000 h de trabajo

Figura 3.8: Modelo1. ITF-3



a) Para 5000 h de trabajo



b) Para 30.000 h de trabajo

Figura 3.9: Modelo1. ITF-4

Tras este análisis podemos sacar dos resultados claros;

- Las zonas más desfavorables son las esquinas de las tolvas y las zonas más calientes del modelo, donde la tensión de fluencia baja mucho. El resto del modelo posee un I.T.F. con valores entre 0 y 1. La mejora de las zonas de concentración de tensión también mejoraría este análisis.
- No existe una diferencia sustancial entre el estudio a 5000 h y el de 30.000h.

Tras este análisis se puede decir que este intercambiador es apto para trabajar hasta unas 30.000 h con excepción de las zonas de concentración de tensiones, que son las que se deben de mejorar.

El resto de resultados para cada modelo se puede ver en el anexo D.

3.2. Comparación de resultados

A continuación se muestran diferentes resultados obtenidos en 12 puntos significativos del intercambiador a lo largo de los seis modelos. Para conocer la ubicación de estos puntos se puede consultar el anexo C.

		Tensión de Von Mises (MPa)						
		PUNTO	MODELO					
			1	2	3	4	5	6
TENSIÓN EN TUBOS		P1	35	35	29,9	29,2	28,24	28,44
TOLVA ENTRADA	T.E. :ESQUINA CON BANDEJA	P2	95	95	95	95	95	95
	T.E. ESQUINAS TOLVA ENTRADA	P3	80	90	90	85	85	85
	T.E. UNIÓN RIGIDIZ A PAREDES	P4	45	55	55	65	70	75
	T.E. RIGIDIZ ESCUADRA A BANDEJA	P5	100	100	95	100	20	20
	T.E. TENSIÓN GENERAL EN BANDEJA	P6	50	50	30	45	45	35
TOLVA SALIDA	T.S.:ESQUINA CON BANDEJA	P7	150	150	150	150	150	150
	T.S.ESQUINA TOLVA SALIDA	P8	85	85	45	55	55	55
	T.S.TENSIÓN EN BANDEJA	P9	30	30	22	20	20	17
CAJÓN RETORNO	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA CALIENTE	P10	45	45	40	35	35	32
	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA FRÍA	P11	140	140	30	20	20	20
	C.R.:ESQUINAS	P12	110	110	180	10	10	10

Figura 3.10: Tabla 1. Comparación de tensiones

Para una visualización más sencilla se han graficado los resultados.

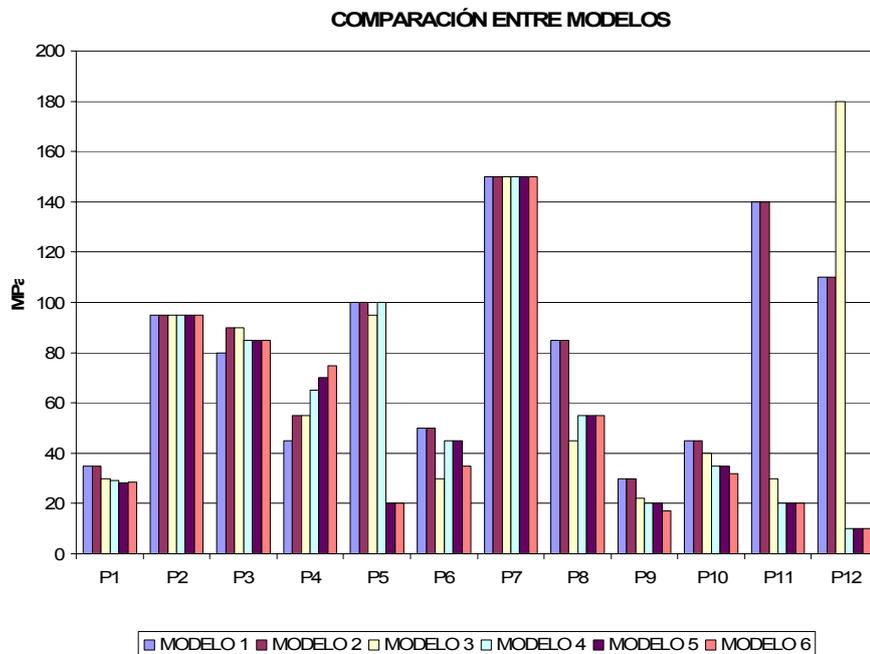


Figura 3.11: Gráfico. Comparación de tensiones

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

Otra forma de visualizar las mejoras es ver cuanto varían las tensiones de cada modelo frente al modelo inicial (modelo1).

		VARIACIÓN RESPECTO AL MODELO 1 (%)					
		PUNTO	MODELO				
			2	3	4	5	6
TOLVA ENTRADA	TENSIÓN EN TUBOS	P1	0,00	-14,57	-16,57	-19,31	-18,74
	T.E. :ESQUINA CON BANDEJA	P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	T.E. ESQUINAS TOLVA ENTRADA	P3	12,50	12,50	6,25	6,25	6,25
	T.E. UNIÓN RIGIDIZ A PAREDES	P4	22,22	22,22	44,44	55,56	66,67
	T.E. RIGIDIZ ESCUADRA A BANDEJA	P5	0,00	-5,00	0,00	-80,00	-80,00
	T.E. TENSIÓN GENERAL EN BANDEJA	P6	0,00	-40,00	-10,00	-10,00	-30,00
TOLVA SALIDA	T.S.:ESQUINA CON BANDEJA	P7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	T.S.ESQUINA TOLVA SALIDA	P8	0,00	-47,06	-35,29	-35,29	-35,29
	T.S.TENSIÓN EN BANDEJA	P9	0,00	-26,67	-33,33	-33,33	-43,33
CAJÓN RETORNO	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA CALIENTE	P10	0,00	-11,11	-22,22	-22,22	-28,89
	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA FRIA	P11	0,00	-78,57	-85,71	-85,71	-85,71
	C.R.:ESQUINAS	P12	0,00	63,64	-90,91	-90,91	-90,91

Figura 3.12: Tabla 2. Variación respecto modelo 1 (%)

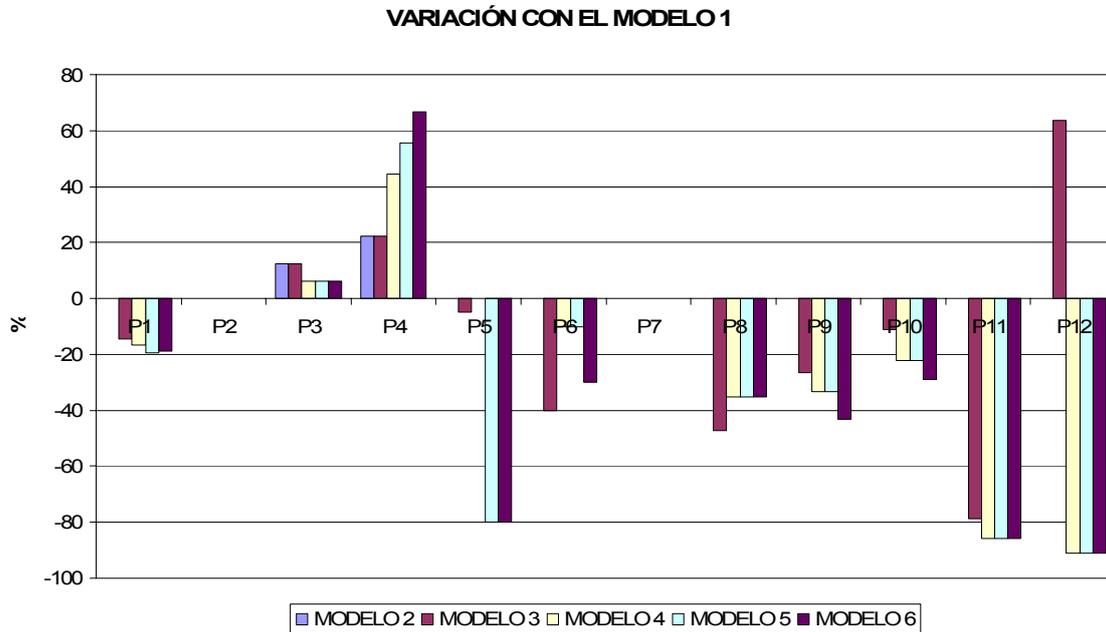


Figura 3.13: Gráfica. Variación respecto modelo 1 (%)

Podemos observar que las mayores reducciones de tensiones se producen en los modelos; 3, 5 y 6. El más óptimo (desde el punto de vista de la resistencia) sería realizar el modelo 6, que consistiría en usar el mismo material (acero AISI-310), liberando las esquinas de las tolvas con respecto a la placa perimetral que sirven de apoyo (con una ranura para aliviar tensiones en la esquina del perímetro que apoya bastaría), suprimir los rigidizadores en escuadra de la tolva de entrada y colocar otros menos agresivos en su lugar y por último flexibilizar las siete bandeas inferiores entre si para permitir una dilatación de los tubos más libre.

Esta es la solución desde el punto de vista mecánico, pero con otros criterios, como el económico, no es la más idónea, el colocar el mismo acero a todo el conjunto encarecería demasiado el conjunto, sigue siendo necesario usar diferentes materiales. La otra posibilidad que es la de flexibilizar los desplazamientos entre bandejas inferiores es bastante cara desde el punto de vista de fabricación, esto hace que el diseño más adecuado de los estudiados sea el modelo 4.

4. Conclusiones

En este capítulo se resume el trabajo realizado y las principales conclusiones de la investigación desarrollada en este proyecto, además, se definen posibles líneas de trabajo como continuación del aquí realizado.

4.1. Conclusiones de la investigación

El modelo establecido para el análisis mecánico del intercambiador de calor da unos resultados bastante fiables, que hay que interpretarlos de forma cualitativa, debido a que hay muchos factores que nos se han modelado (transferencia, mecánica de fluidos, tal vez análisis de grandes deformaciones, así como vibración de los tubos al paso de fluido).

Se ha observado un comportamiento global del conjunto en el que el factor más influyente en el intercambiador es la temperatura. Esta temperatura actúa de dos formas:

- La primera; produciendo dilataciones, si se encuentra restricción al desplazamiento se traducen en un incremento de tensiones. Es el factor más determinante en la zona de las tolvas ya que posee un gran número de rigidizadores

- La segunda; el gradiente de temperaturas produce una flexión en el conjunto, la zona más caliente se estira (zona de salida del aire), y la más fría (zona de entrada del aire) se expande en menor medida. Este factor hace que los tubos y cajón de retorno giren hacia la zona de la tolva de entrada.

También se ha de tener en cuenta que al usar diferentes materiales, debido a requerimientos en cuanto a oxidación y corrosión además de economía de costes, se tiene diferente; módulo elástico, coeficiente de dilatación térmica y tensión de fluencia.

Un análisis importante en el modelo ha sido la comparación con la tensión de fluencia a través de la definición del índice I.T.F., así hemos podido dar una idea de cuan cerca estamos de este peligroso fenómeno.

4.2. Cumplimiento de objetivos

El primer objetivo ha sido el de establecer una malla sobre la cual obtener resultados bastante fiables de cómo trabaja el intercambiador, este modelo inicial se ha realizado con el problema original (geometría, materiales, cargas y condiciones de contorno y la variación de estas con la temperatura) estos resultados obtenidos han sido comparados con lo que ocurre con el modelo real, a partir de aquí se ha podido validar la malla.

Posteriormente se han realizado diferentes modelos, intentando mejorar las zonas con mayor tensión o mayor índice de tensión de fluencia (I.T.F.), los modelos han sido comparados entre si, viendo cual proporcionaba mayor reducción de tensiones.

Estos modelos han sido contrastados con KALFRISA S.A. con el fin de establecer el más apto para la mejora del intercambiador.

4.3. Líneas futuras de trabajo

Futuras líneas de trabajo deberían ir encaminadas en los siguientes aspectos:

- Estudio del problema de mecánica de fluidos, realizar un modelo del flujo de gases y aires a través del intercambiador.
- Resolver el problema de transferencia de calor a partir de conocer el flujo gases y aire, con ello obtendríamos una temperatura bastante exacta en cada punto del modelo.
- Con este nuevo mapa de temperaturas se podría obtener unos resultados bastante más aproximados a la realidad.
- Con respecto a los tubos también se podría analizar el fenómeno de vibraciones debidas al paso de los gases de combustión.

Anexo A: Mallado

El presente anexo tiene como objeto explicar el proceso de mallado del modelo. La malla utilizada da comportamientos globales, no se ha afinado en esquinas, esto es debido a que tampoco se conocían bien las cargas del conjunto. Los resultados obtenidos son bastantes aproximados, pero hay que interpretarlos como tendencias.

A.1. Modelo 1: modelo original

La primera idea fue realizar una malla con todo placas, lo que daba un número de elementos muy elevado, unos 450 000 elementos, suponiendo unos 2 250 000 grados de libertad a resolver, suponía un coste computacional demasiado elevado. Se optó por modelar los tubos mediante elementos viga, y el resto del conjunto mediante elementos placa.

La unión entre placas y viga se realizó de la forma siguiente, se han prolongando la zona de placas unas 5 veces el diámetro de los tubos para asegurar una correcta transición de tensiones.

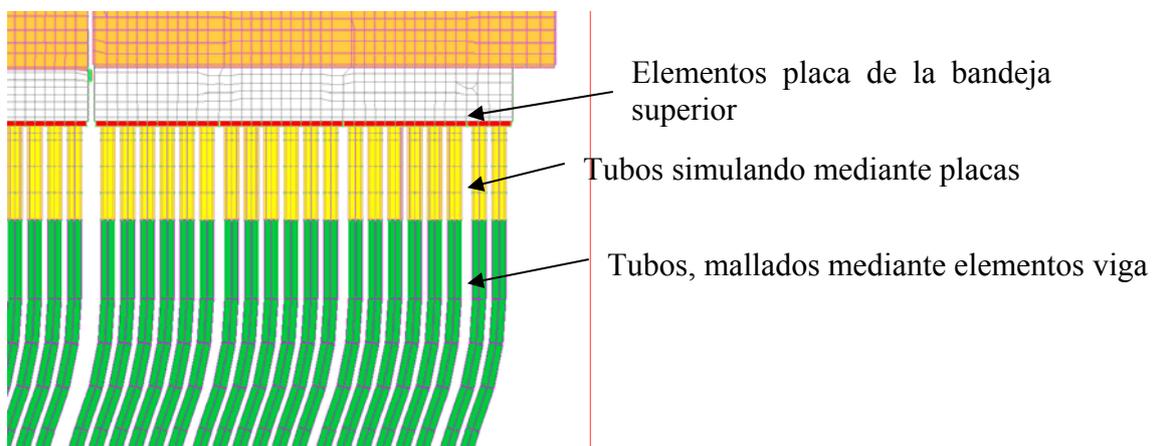


Figura A1

El enlace entre las placas que forman los extremos de los tubos y los elementos viga que forman el resto del tubo se ha realizado mediante un elemento rígido, este elemento bloquea los desplazamientos relativos entre nodos, a partir de un nodo maestro (en este caso el del elemento viga) y 8 nodos esclavos o dependientes.

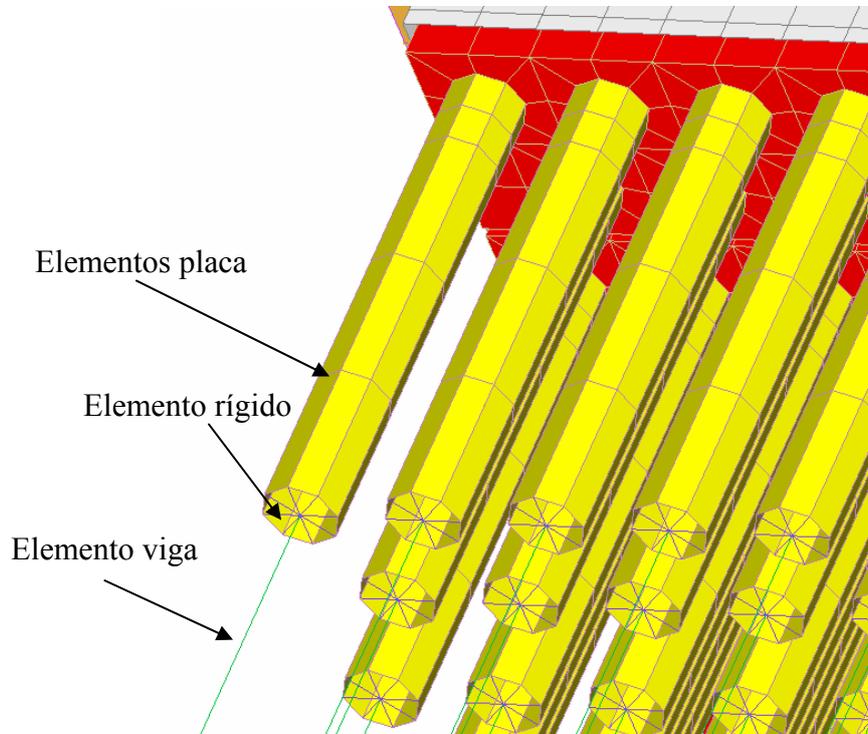


Figura A2

Esta unión entre elementos viga y elementos placa mediante un elemento rígido, crea un problema; la placa se puede dilatar en sentido transversal pero la viga no, con lo que se crea una concentración de tensiones en la zona de unión, para evitar que estas tensiones afecten a las bandejas (superior e inferior), la zona de placas que conforman los tubos se han prolongado unas 5 veces el diámetro.

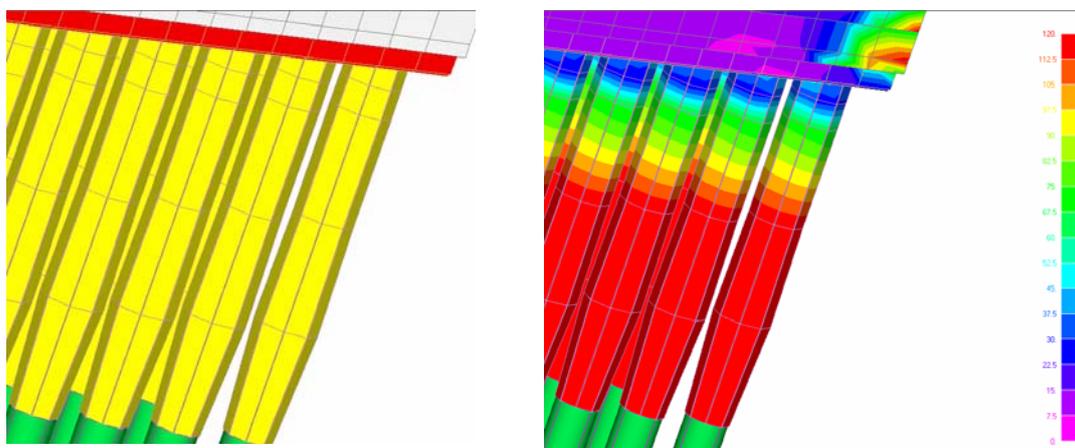


Figura A3

El resto del modelo se ha realizado mediante placas, intentando mantener la misma proporción y tamaño de elementos que las placas de la zona de las bandejas.

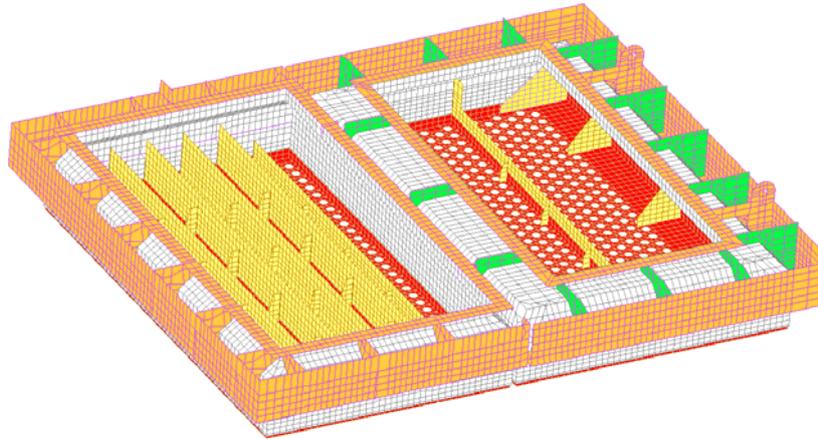


Figura A4

La unión entre subconjuntos se ha realizado mediante elementos rígidos, colocándose en los sitios que las placas se hallaban soldadas entre si.

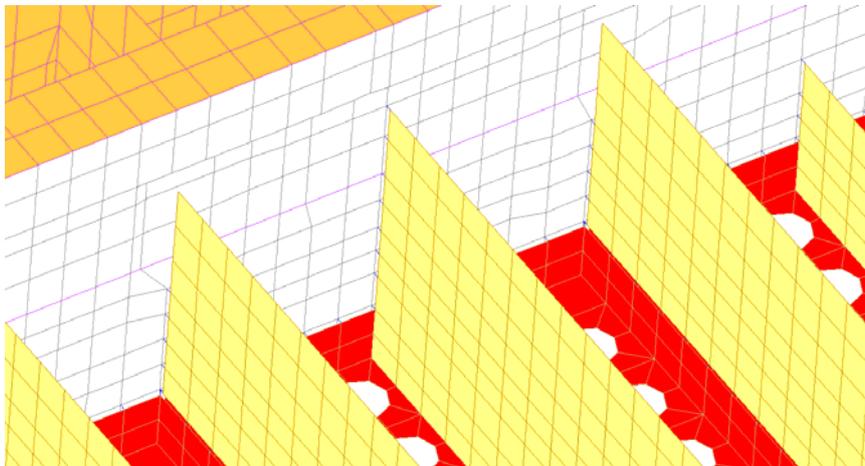


Figura A5

En la zona del cajón de retorno se ha optado por colocar un tamaño de elementos mayor, ya que esta zona se ve sometida a esfuerzos menores, en la siguiente figura se puede apreciar la transición de elementos utilizada.

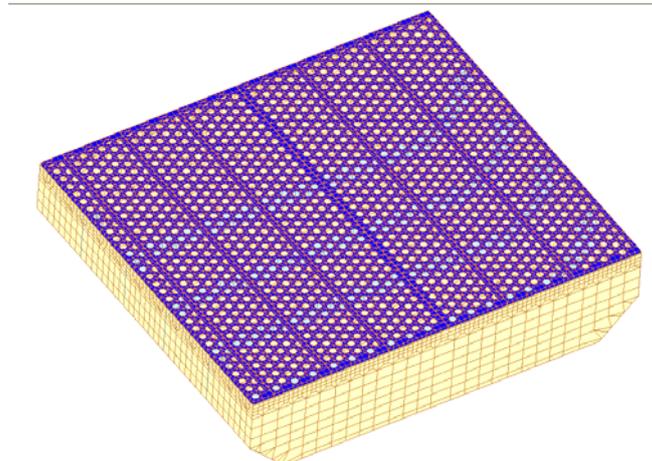


Figura A6

A.2. Modelo 2: Esquinas de las tolvas liberadas

La primera mejora que se introducido en el modelo ha sido la de liberar las esquinas de las tolvas, para ello se han quitado 3 elementos en cada esquina de las tolvas.

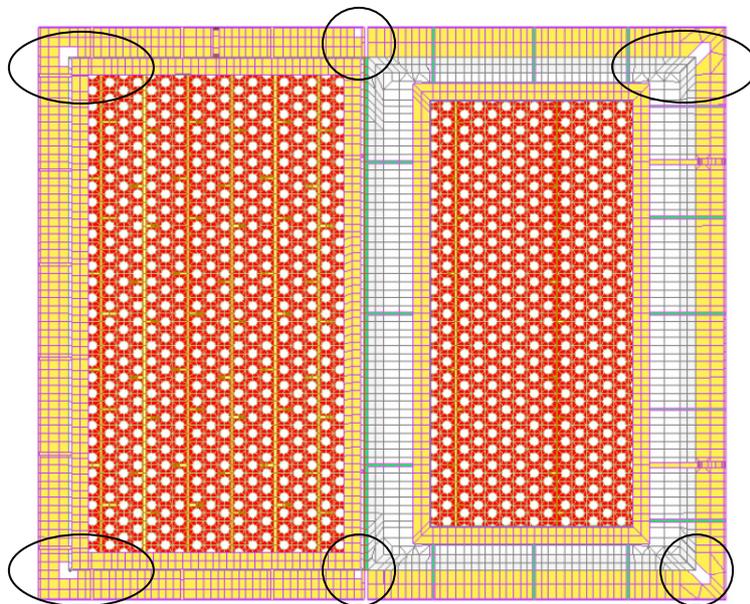


Figura A7

A.3. Modelo 3: Esquinas de las tolvas liberadas, acero AISI-310

Misma malla que el modelo 2 pero colocando el mismo acero a todos los elementos, en este caso el AISI-310 por ser el menos rígido a altas temperaturas.

A.4. Modelo 4: modelo 2+ bandejas inferiores libres

Posee lo mismo que el modelo 2 (esquinas tolvas libres) pero además se han liberado las 7 bandejas de la zona inferior, para ello se han suprimido los elementos rígidos que hay entre dichas bandejas, y la unión de todas ellas con el cajón de retorno. Además se ha tenido que suprimir el cajón de retorno de la malla.

Con ello se pretende ver si liberando en esta zona, transmitimos menos cargas a las bandejas superiores además de reducir la tensión de las bandejas inferiores.

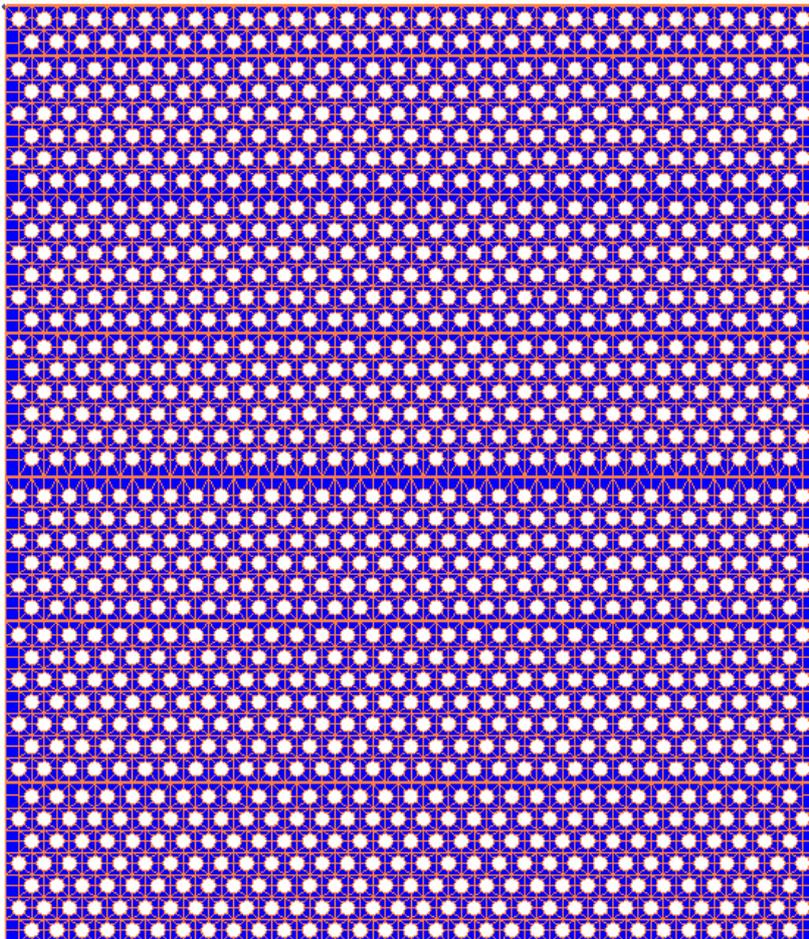
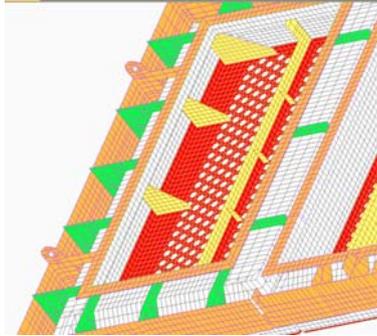


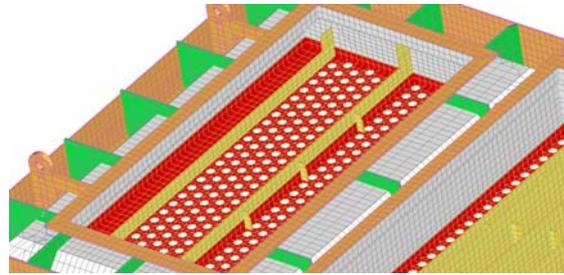
Figura A8

A.5 Modelo 5: modelo 4 + cambio rigidez escuadras

Igual que el modelo 4 pero se han suprimido los rigidizadores en escuadra de la tolva de entrada por unos rigidizadores parecidos a los que había ya en la misma tolva.



a) modelo 1: rigidizadores en escuadra



b) modelo 5, cambio de rigidizadores

Figura A9

A.6 Modelo 6: modelo 6 en acero AISI-310

Misma malla que en el modelo 5, pero se ha realizado toda en acero AISI-310.

Anexo B: Materiales

En este presente anexo se describen las características de los aceros empleados en el intercambiador de calor, que han sido del tipo inoxidable austenítico, se comienza con una introducción sobre este tipo de aceros y se listan los empleados según dos normativas; ASTM (aceros AISI) y normativa EN 10027 diciendo a que subgrupo pertenecen cada uno, a continuación se muestran las propiedades individuales de cada acero.

B.1. Introducción: aceros inoxidables

Se denominan aceros inoxidables a los aceros aleados con Cr, en una proporción mínima del 11,5%, aunque pueden llevar otros elementos como níquel y molibdeno.

Las características más importantes de este tipo de aceros es su *resistencia a la oxidación y a la corrosión* ante una gran variedad de medios. Esta inoxidabilidad se debe a la formación de una capa superficial de óxido de cromo muy delgada que impide el progreso de la oxidación u otras formas de corrosión. Además del Cr se suelen añadir otros elementos de aleación, como; el Ni, Mo o Ti para mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia cuando se hayan en medios agresivos o para estabilizar las fases.

El efecto que ejercen los dos principales elementos de aleación son:

- Cromo. Es un elemento alfégeno, es decir, aumenta el campo de existencia de la fase α y disminuye la γ . Las aleaciones con más del 13% de cromo permanecen en estado α a cualquier temperatura. Las aleaciones Fe-Cr con contenido en cromo inferior

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

al 12% pueden austenizarse por calentamiento, dando lugar a martensita con un tratamiento de temple. La presencia de Carbono altera ligeramente el diagrama de equilibrio Fe-Cr, ya que al tratarse de un elemento gammágeno tenderá a aumentar la zona austenítica. Así para contenidos de carbono de un 0,4% es posible austenizar por calentamiento un acero martensítico. Algo a tener en muy en cuenta es la acción importante del carbono para formar con el cromo carburos complejos.

- Níquel. Es un elemento gammágeno, que aumenta el campo de estabilidad de la austenita, de tal manera que la aleación Fe-Ni con un porcentaje superior al 24% de níquel, presenta a temperatura ambiente, una estructura totalmente austenítica. La cantidad de níquel que ha de contener este tipo de aleaciones, para obtener una estructura austenítica, debe ser tanto menor, cuanto mayor sea el porcentaje de carbono, ya que este elemento también es gammágeno. El níquel también mejora la estabilidad de la capa de óxido protectora, mejorando la templabilidad.

En los aceros inoxidable que contienen cromo y níquel se combinan sus acciones alfégenas y gammágenas, dando lugar a estructuras muy variadas. Además del C, Cr y Ni pueden estar presentes otros aleantes con el fin de mejorar determinadas propiedades. De entre ellos, el manganeso tiene una acción gammágena, mientras que el Mo, Si, Al, W, Ti, V y B son alfégenos.

Los aceros inoxidable se dividen en tres grandes grupos en función de su estructura micrográfica:

- Aceros inoxidable ferríticos.
- Aceros inoxidable martensíticos.
- Aceros inoxidable austeníticos.

A continuación se listan los materiales empleados en el modelo:

MAT	EN 10027		AISI	% en peso en la aleación							
	NUM	SIMBÓLICA		C	Si	Mn	P max	Smax	Cr	Ni	Ti
1	1.4845	X 12CrNi 25 21	310	0,055	1,2	1,8	0,025	0,025	24,5	20,5	-
2	1.4878	X 12CrNiTi18 9	321 H	0,12	1	2	-	-	18	10,5	0,65
3	1.4541	X 10CrNiTi 18 9	321	0,08	0,6	1,5	0,03	0,03	17,5	9,5	0,4
4	1.4301	X 5CrNi 18 9	304	0,05	0,6	1,3	0,03	0,03	18,5	9,5	-
5	1.4818			0,05	1,3	-	-	-	18,5	9,5	-
6	1.4828	X 15CrNiSi 20 12	309	0,2	2	2	-	-	20	12	-

Figura B.1: Tabla materiales

Los materiales empleados en el modelo son del tipo austenítico, así pues, a continuación nos centraremos en esta variedad de inoxidable.

Los *aceros austeníticos* son los más usados, representando su consumo, aproximadamente el 60% de la totalidad de los aceros inoxidable.

Son aceros con un contenido en Cromo entre el 16% y 28% y suficientemente aleados con níquel y otros elementos gammágenos (Mn, N) para que sean austeníticos a todas las temperaturas. Los porcentajes de carbono suelen ser bajos.

El acero clásico del grupo es el 1.4301 (AISI-304), en España conocido como 18/8, con un contenido del 18% de Cr y 8% de Ni.

Aunque el elemento anticorrosivo principal es el Cr, en estos aceros se añade níquel en elevadas proporciones para así mejorar la resistencia a la oxidación y corrosión. Además, aumentando la proporción de níquel se mejora la ductilidad del acero. Se pueden emplear manganeso como sustitutivo del níquel, aunque hay que tener en cuenta que los aceros al Cr-Mn pueden experimentar corrosión intergranular, sobre todo al calentar a temperaturas entre 500-800°C.

El hecho de poseer estructura austenítica hace que estos aceros sean no magnéticos, además son muy tenaces a muy bajas temperaturas, por lo que son útiles para aplicaciones criogénicas.

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos (comparando con el resto de inoxidable) es excelente, sin embargo su resistencia a la tracción y su límite elástico son relativamente bajos, no pudiendo mejorar por tratamiento térmico, ya que la estabilidad de la fase austenítica impide la posibilidad de realizar estos tratamientos. Es posible utilizar el recocido de recristalización y el de eliminación de tensiones. Un tratamiento específico de estos materiales es el “hipertemple”, consiste en calentar el acero por encima de 900°C para disolver los carburos, una vez disueltos se enfría bruscamente para inhibir su formación, con objeto de controlar su posterior precipitación mediante un calentamiento a la temperatura adecuada, (denominada de revenido), de esta manera se mejoran las propiedades finales del acero. La ductilidad de estos aceros es grande y la conservan en circunstancias adversas, no siendo tan sensibles como los ferríticos a los fenómenos de fragilidad.

También se puede conseguir el endurecimiento por laminado en frío, lográndose resistencias de hasta 1600 N/mm².

Los aceros inoxidable austeníticos tienen una zona de temperaturas, entre 450-650°C, en la que pueden sufrir corrosión entre granos (intergranular). Esta corrosión se presenta frecuentemente en las zonas soldadas, al principio no se acusa este tipo de corrosión en las piezas, pero poco a poco van apareciendo grietas, sobretodo al estar el acero sometido a algún tipo de esfuerzo. La causa de esta corrosión es la formación de carburos de cromo, a costa de empobrecer la zona del acero cercana, que queda indefensa.

Para evitar este tipo de corrosión se puede reducir el contenido en carbono, con porcentajes inferiores a 0,03% de manera que se hace difícil la formación de carburos o se puede alea con otros elementos como el Titanio, Molibdeno o Niobio, que se van a combinar preferentemente con el carbono. Otro procedimiento sería realizar el hipertemple, comentado anteriormente.

B.2. Efectos de la temperatura

A la hora de elegir un acero que va a trabajar a altas temperaturas deberemos tener en cuenta diferentes criterios de selección; resistencia a la corrosión y oxidación, resistencia mecánica, fenómenos de fluencia, fatiga y la interacción entre si de estos dos últimos. En general los mejores resultados para estos aceros son los tratados en rodillos de laminación o los de forja, ya que las fibras han quedado orientadas.

- *Corrosión y oxidación.* Inoxidables austeníticos provenientes de forja y fundiciones con similar composición, tratamiento térmico y microestructura se comportan de forma muy parecida para un ambiente corrosivo dado. Sin embargo, fundiciones austeníticas tienen una mayor proporción de ferrita en austenita que las provenientes de forja. Esta ferrita retenida en la matriz de austenita es beneficiosa para prevenir la corrosión intergranular.

- *Resistencia mecánica.* No todos los inoxidables se comportan igual según aumenta la temperatura, como podemos ver en la figura B.2, para temperaturas entre 400 y 500°C la mejor elección es un acero del tipo semiaustenítico, pero al pasar de los 500°C el mejor es un acero austenítico, en el gráfico se pueden ver reflejada la tensión de rotura para diferentes familias de aceros.

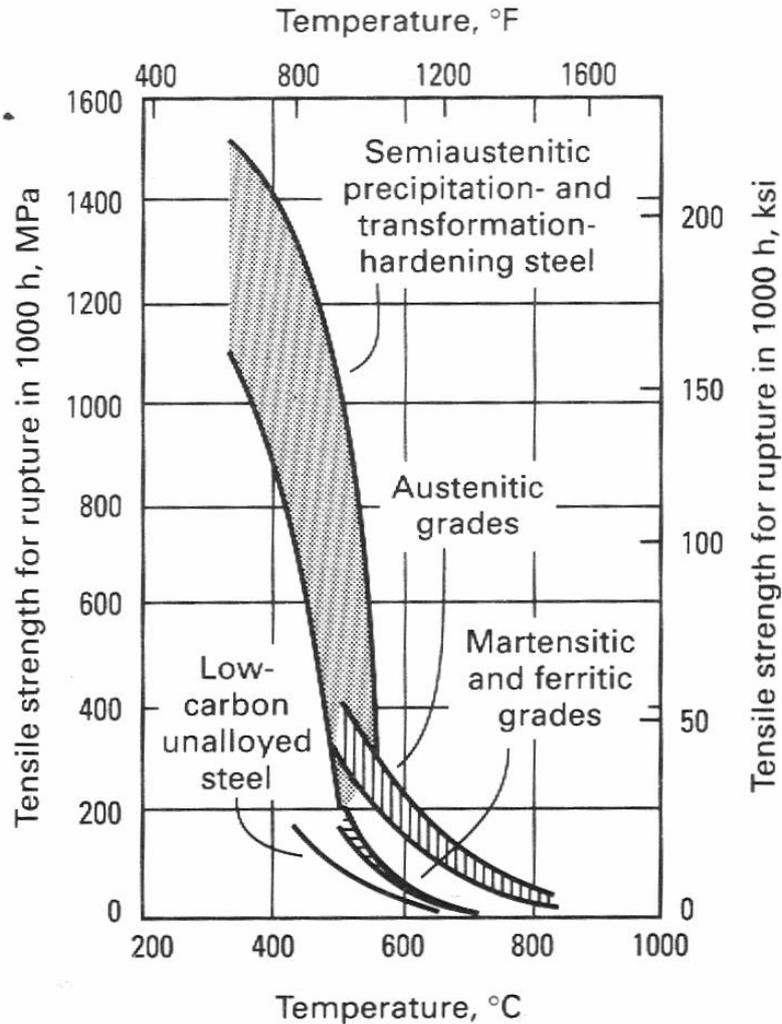


Figura B.2. Tensiones de rotura para aceros inoxidable

- *Fluencia*. La fluencia es la dependencia de la deformación con respecto del tiempo, al aumentar la temperatura este fenómeno se ve acelerado o dicho de otra forma, aparece con cargas menores o se inicia desde deformaciones más pequeñas. La fluencia se acelera mucho cuando superamos los 480°C. La rotura por fluencia se produce debido a una deformación excesiva, que se traduce en una estricción de la sección, conduciendo esta pérdida de sección resistente al colapso. La labor del diseñador es; establecer un factor de seguridad de trabajo a fluencia, teniendo en cuenta la tensión a la que se produce este fenómeno a la temperatura de trabajo.

- *Fatiga*. Este fenómeno se da cuando tenemos cargas cíclicas operando a altas temperaturas, este fenómeno no es muy claro, en algunos rangos de temperatura entre 200°C y 500°C se ve reducido, pero a temperaturas más altas o más bajas se ve favorecido.

- *Interacción de fluencia y fatiga.* Puede tener graves consecuencias en diferentes partes de un componente de metal al operar a altas temperaturas. Cuando las temperaturas son lo suficientemente altas para producir deformaciones por fluencia y además tenemos cargas cíclicas, las dos pueden influir recíprocamente. Por ejemplo, se conoce que las deformaciones por fluencia pueden hacer que se reduzca la vida a la fatiga y viceversa. Este efecto se da tanto en aceros al carbono como en aceros inoxidable.

En el intercambiador de calor a estudio no consideraremos el fenómeno de fatiga al no existir cargas cíclicas.

B.3. Aceros empleados en el modelo

A continuación se muestran los aceros empleados en el intercambiador de calor, listándose las propiedades empleadas de cada uno de ellos, así como un dibujo de las partes del modelo que poseen dicho material.

B.3.1. Material 1: Acero 1.4845

- Denominación EN 10027:
 - Denominación numérica: 1.4845
 - Denominación simbólica: X 12CrNi 25 21
- Denominación AISI: AISI-310

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidable y refractarios, y con un contenido en Ni $\geq 2.5\%$.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura B.3.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.4.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{\text{creep}} [T,t]$ (MPa). Ver figura B.5.

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (Acero 1.4845)

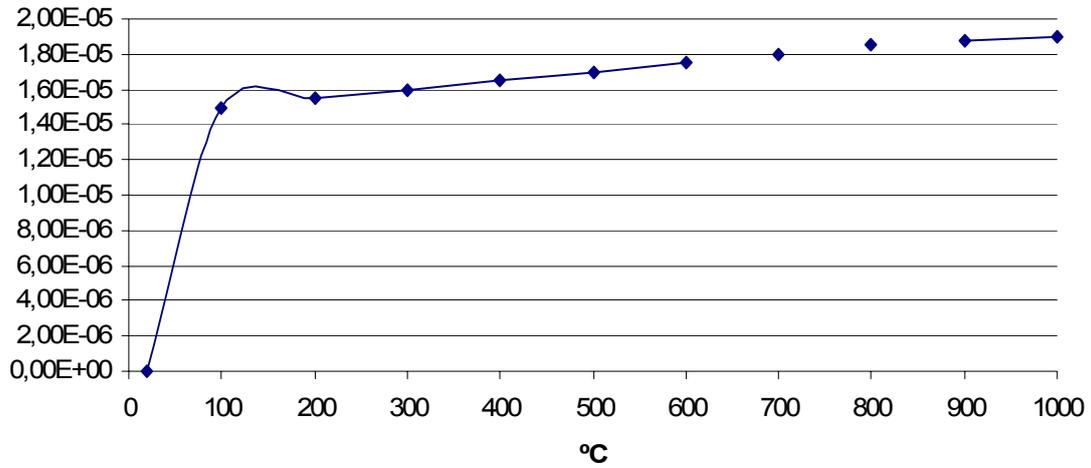


Figura B.3. Coeficiente α . Acero 1.4845

MÓDULO ELÁSTICO (acero 1.4845)

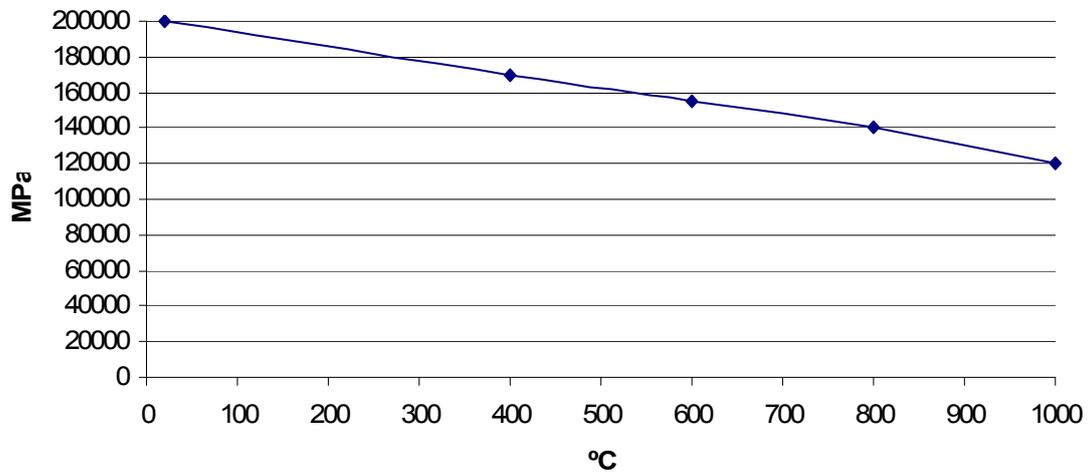


Figura B.4. Módulo elástico. Acero 1.4845

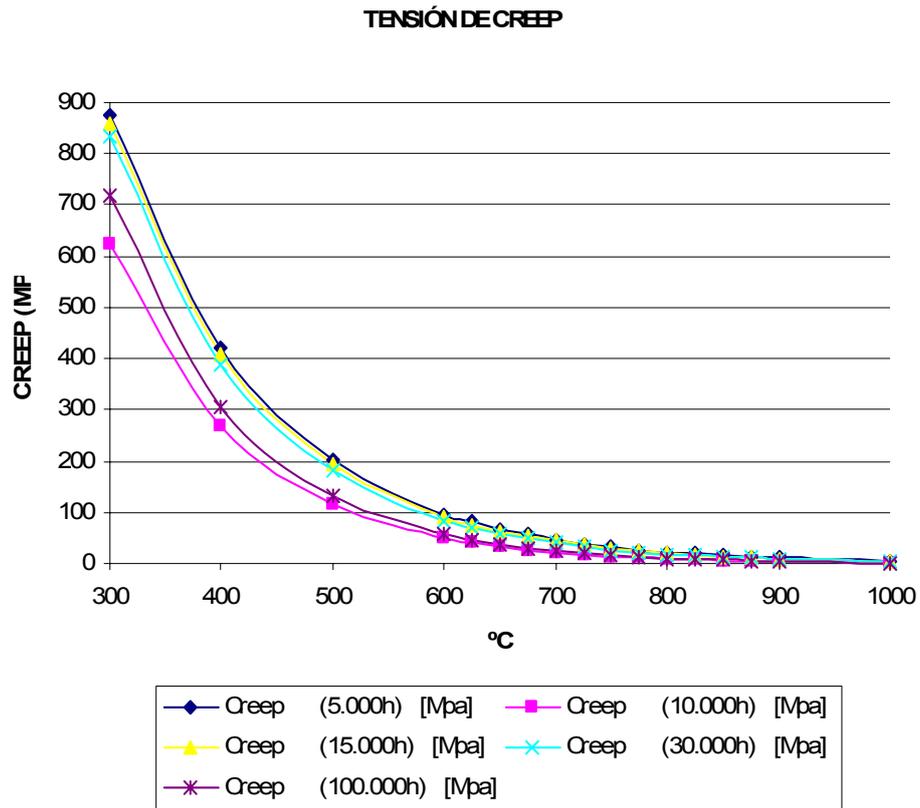


Figura B.5. Tensión de fluencia. Acero 1.4845

En la figura B.6 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

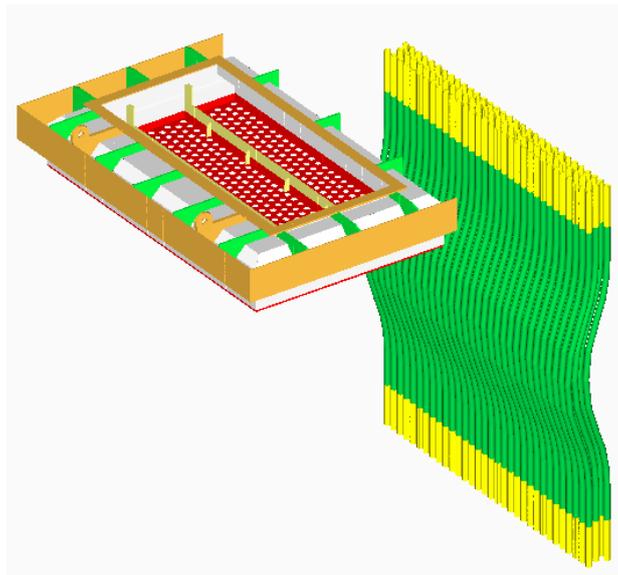


Figura B.6 Componentes material 1

B.3.2 Material 2: Acero 1.4878

- Denominación EN 10027:
 - Denominación numérica: 1.4878
 - Denominación simbólica: X 12CrNiTi18 9
- Denominación AISI: AISI-321H

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidables y refractarios, y con un contenido en Ni $\geq 2.5\%$.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura B.7.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.8.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{\text{creep}} [T,t]$ (MPa). Ver figura B.9.

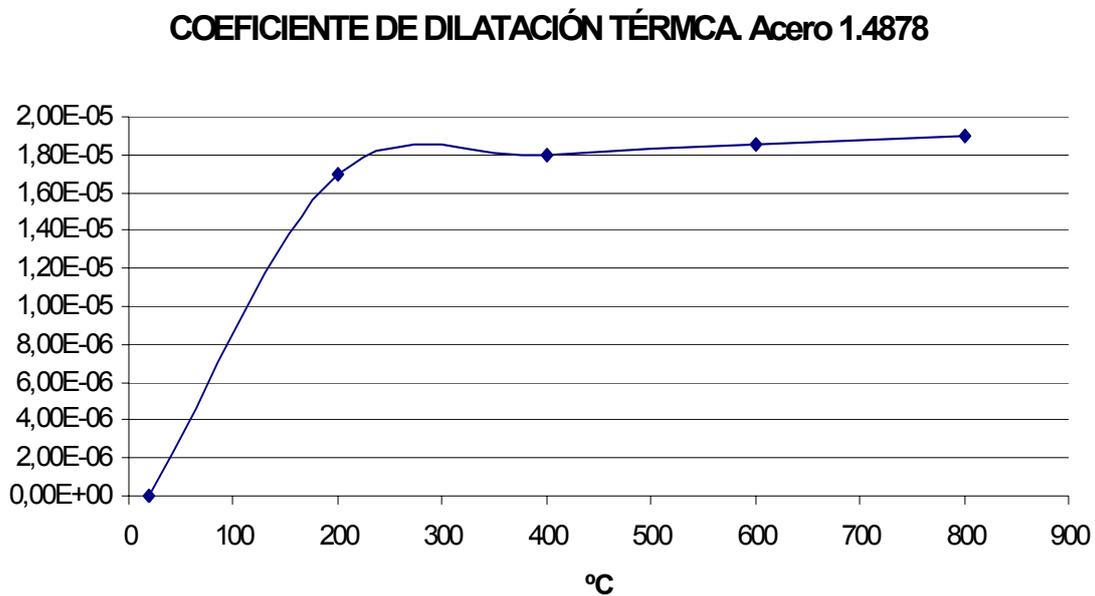


Figura B.7. Coeficiente α . Acero 1.4878

MÓDULO ELÁSTICO (acero 1.4878)

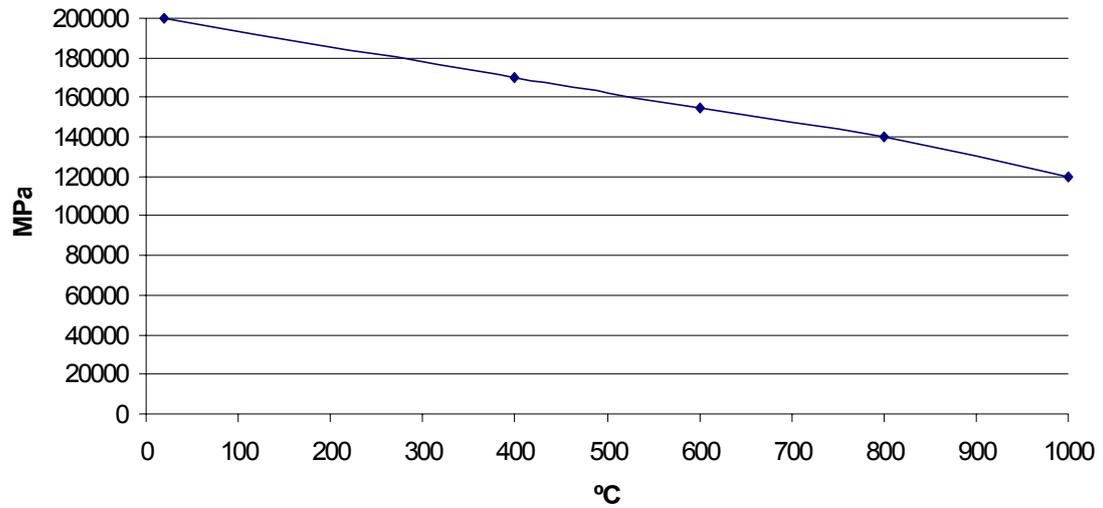


Figura B.8. Módulo elástico. Acero 1.4878

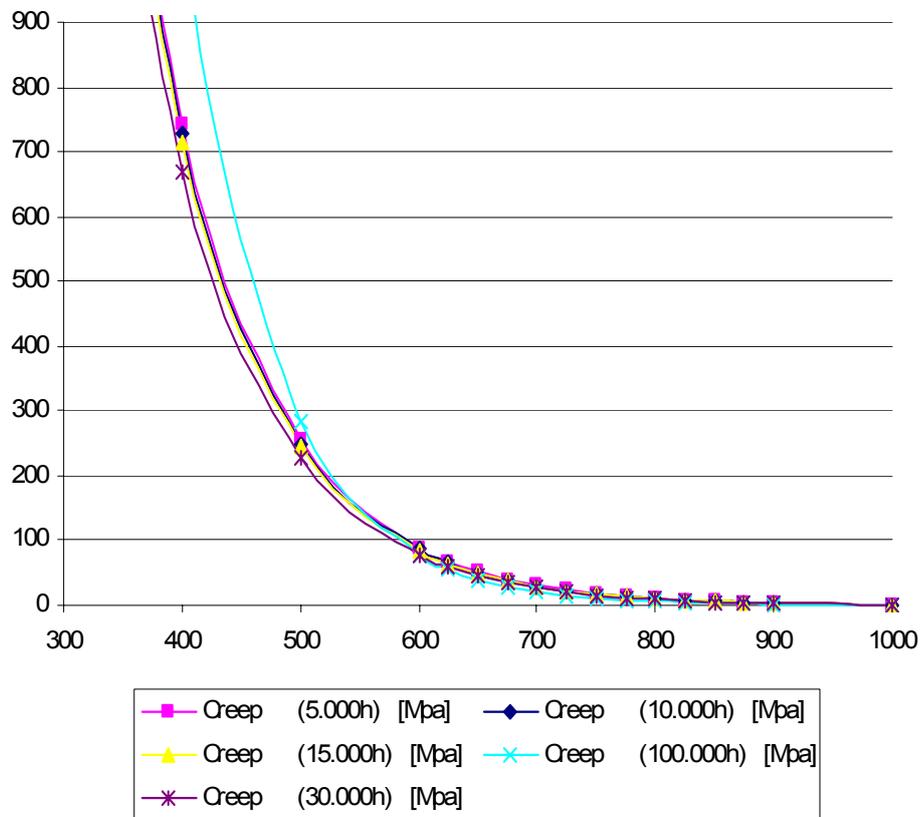


Figura B.9. Tensión de fluencia. Acero 1.4878

En la figura B.10 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

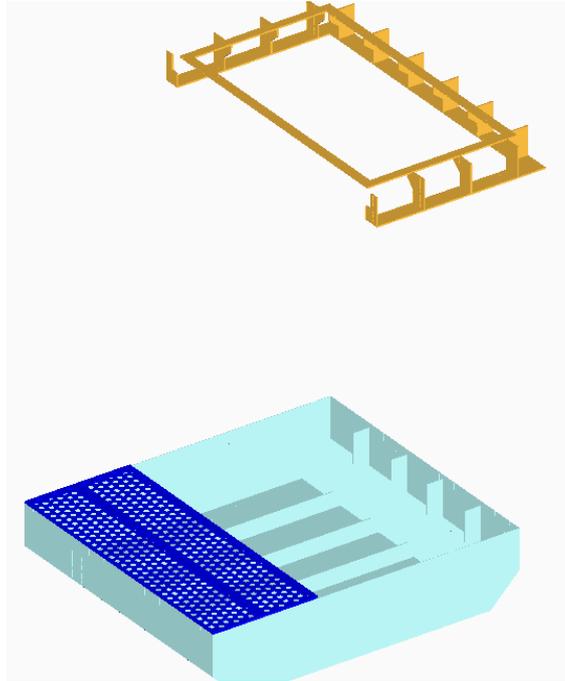


Figura B.10 Componentes material 2

B.3.3 Material 3: Acero 1.4541

- Denominación EN 10027:
 - Denominación numérica: 1.4541
 - Denominación simbólica: X 10CrNiTi 18 9
- Denominación AISI: AISI-321

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidables y refractarios, del tipo inoxidable con adiciones especiales.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura B.11.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.12.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{\text{creep}} [T,t]$ (MPa). Ver figura B.13.

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (Acero 1.4541)

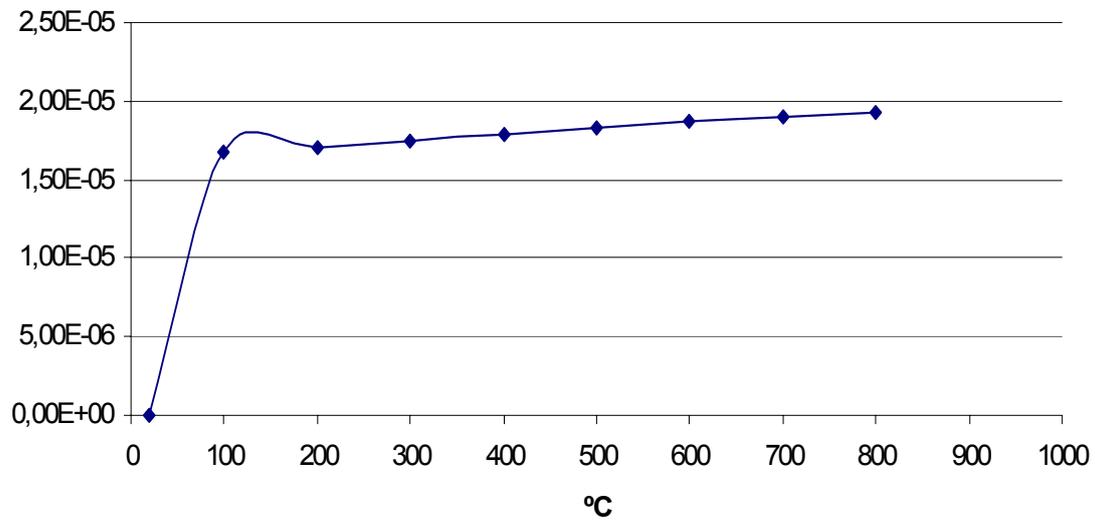


Figura B.11. Coeficiente α . Acero 1.4541

MÓDULO ELÁSTICO (acero 1.4541)

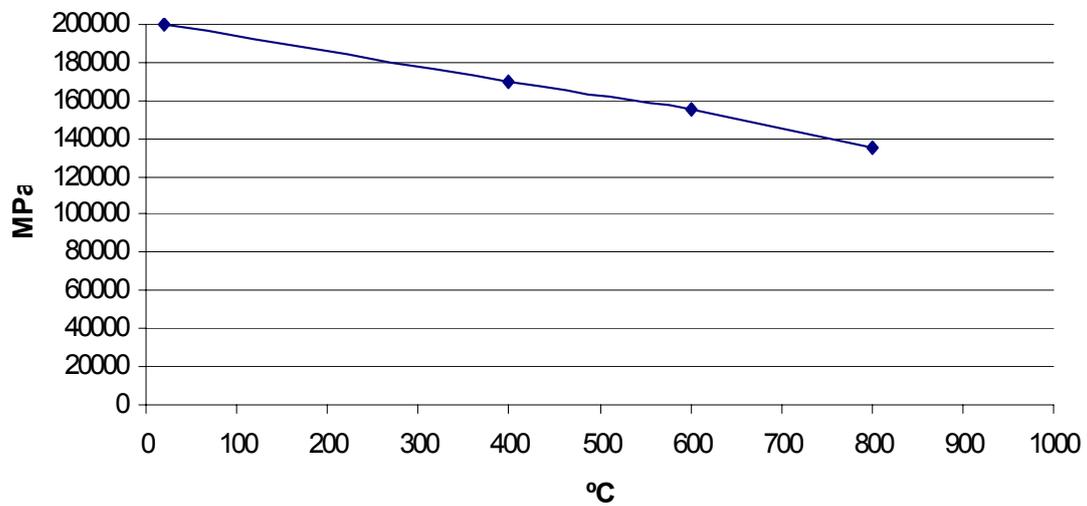


Figura B.12. Módulo elástico. Acero 1.4878

TENSIÓN DE FLUENCIA. Acero 1.4541

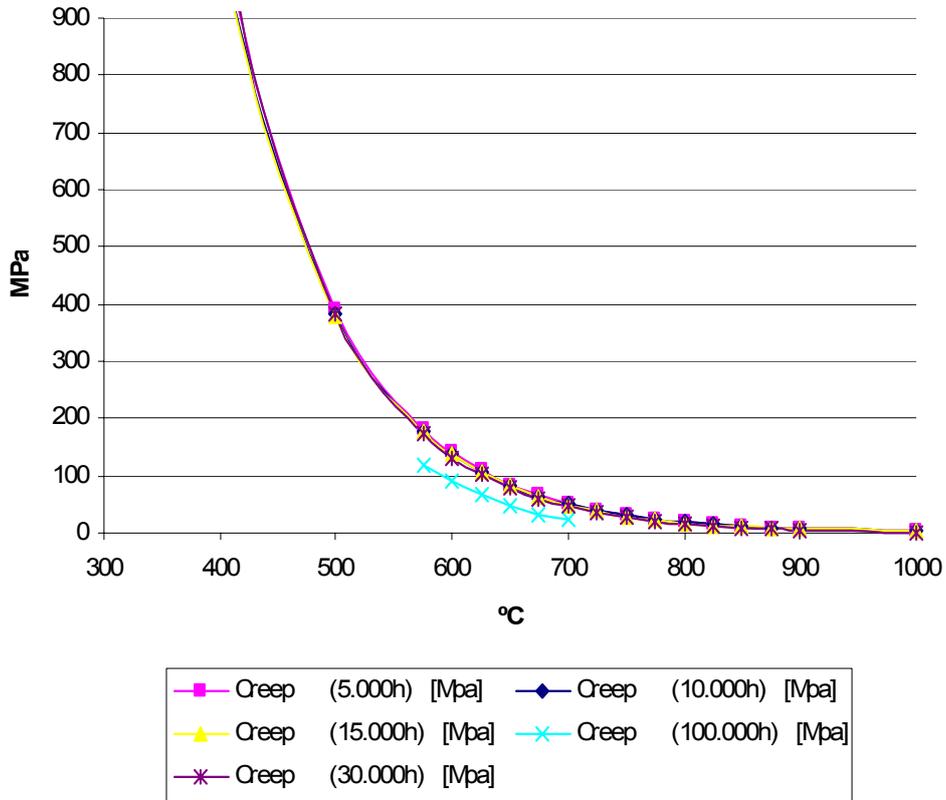


Figura B.13. Tensión de fluencia. Acero 1.4878

En la figura B.14 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

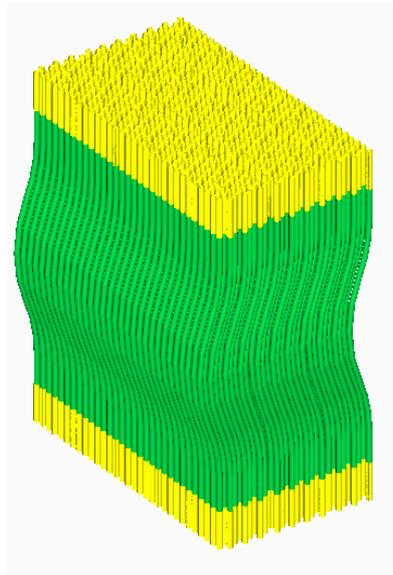


Figura B.14 Componentes material 3

B.3.4 Material 4: Acero 1.4301

- Denominación EN 10027:

- Denominación numérica: 1.4301
- Denominación simbólica: X 5CrNi 18 9

- Denominación AISI: AISI-304

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidable y refractarios, del tipo acero inoxidable con $Ni \geq 2,5\%$ sin Mo, Nb, Ti.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}C^{-1}$). Ver figura B.15.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.16.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{creep} [T,t]$ (MPa). Ver figura B.17.

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (Acero 1.4301)

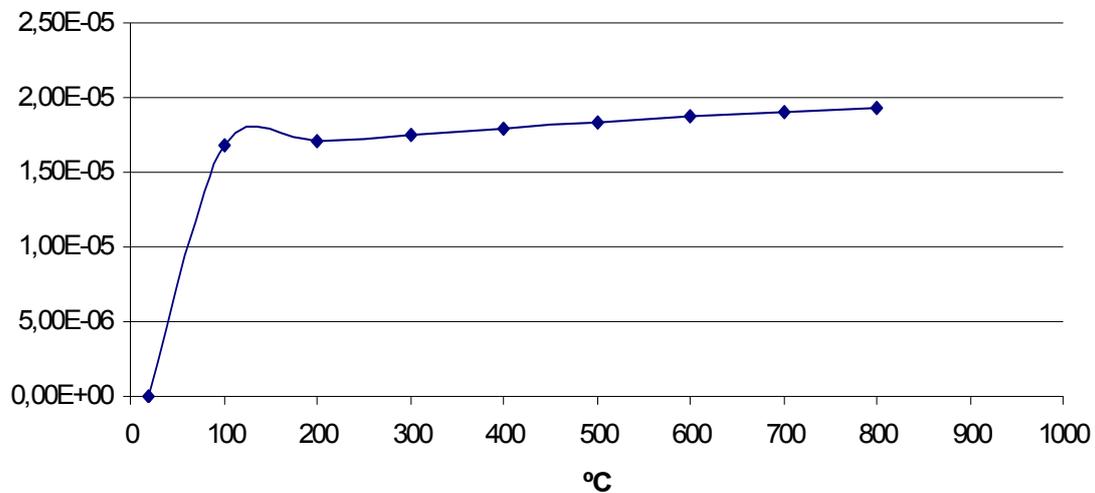


Figura B.15. Coeficiente α . Acero 1.4301

MÓDULO ELÁSTICO (acero 1.4301)

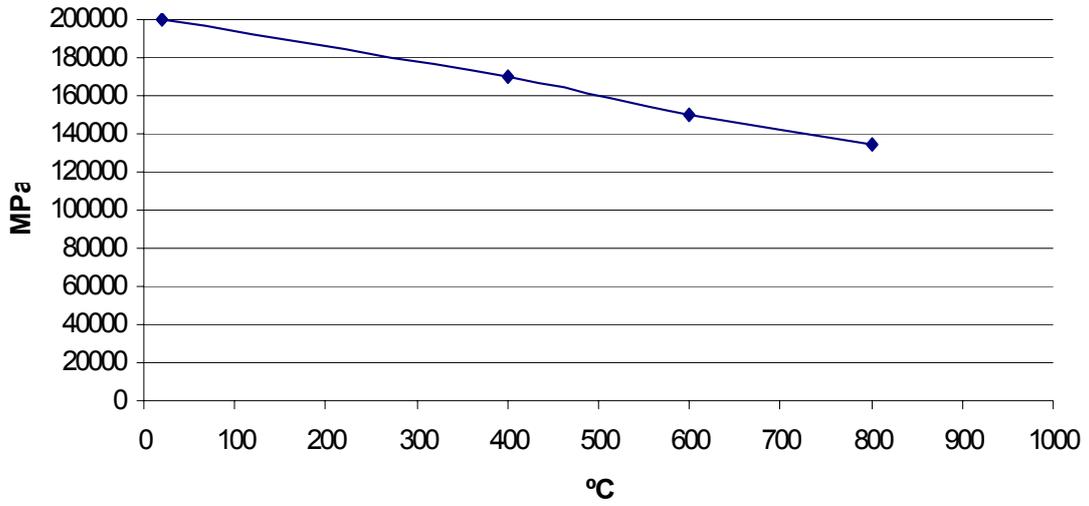


Figura B.16. Módulo elástico. Acero 1.4301

TENSIÓN DE FLUENCIA. Acero 1.4301

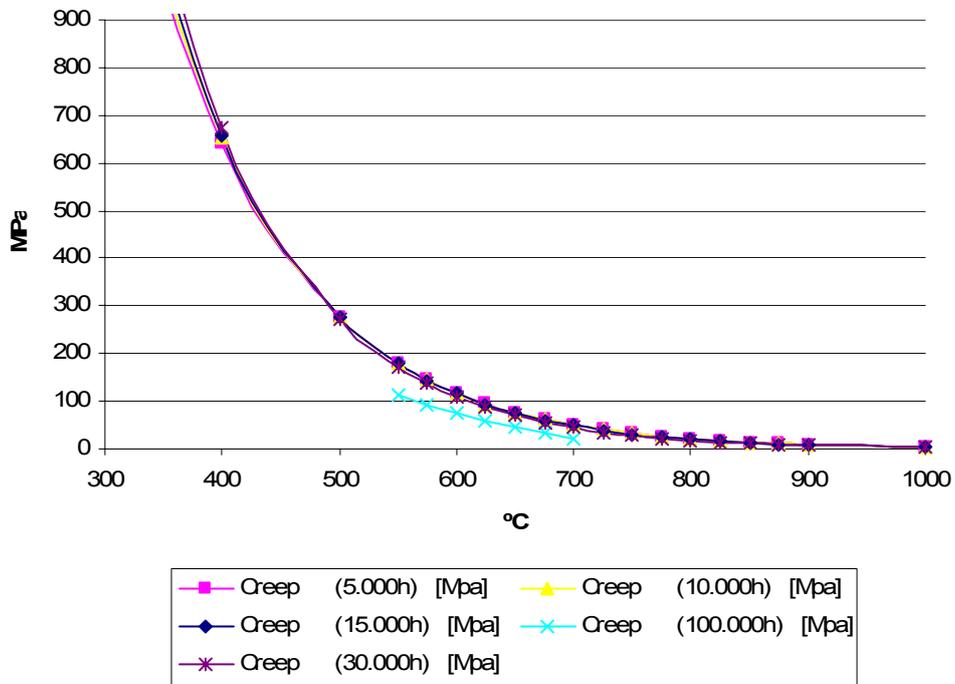


Figura B.17. Tensión de fluencia. Acero 1.4301

En la figura B.18 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

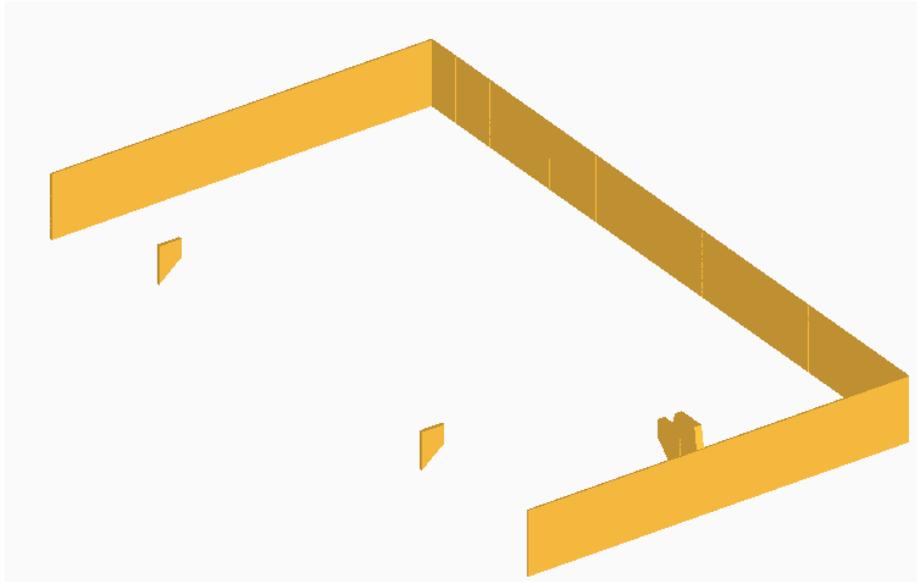


Figura B.18 Componentes material 4

B.3.5 Material 5: Acero 1.4818

- Denominación EN 10027:

- Denominación numérica: 1.4818

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidable y refractarios, y con un contenido en Ni $\geq 2.5\%$.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura B.19.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.20.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{\text{creep}} [T, t]$ (MPa). Ver figura B.21.

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (Acero 1.4818)

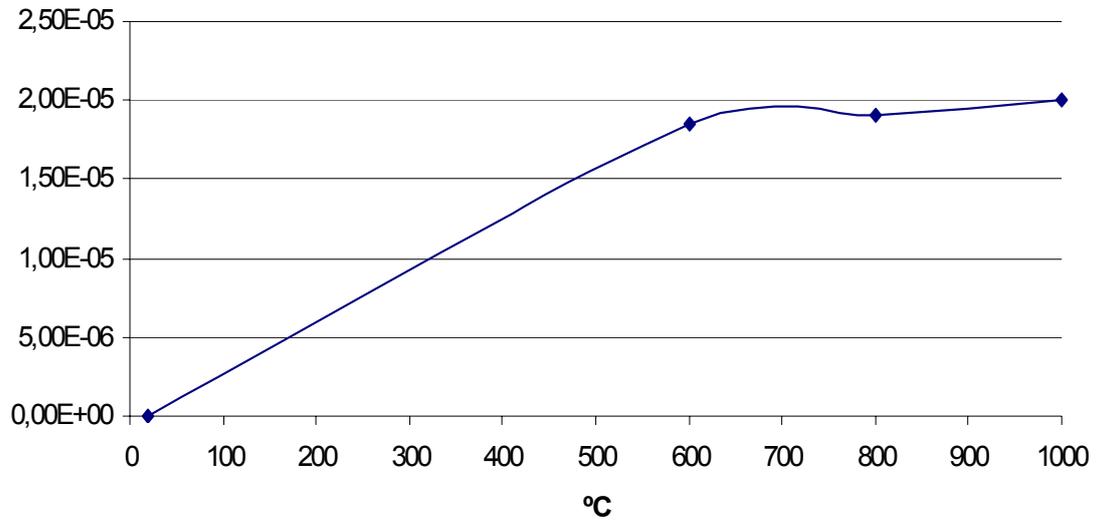


Figura B.19. Coeficiente α . Acero 1.4818

MÓDULO ELÁSTICO (Acero 1.4818)

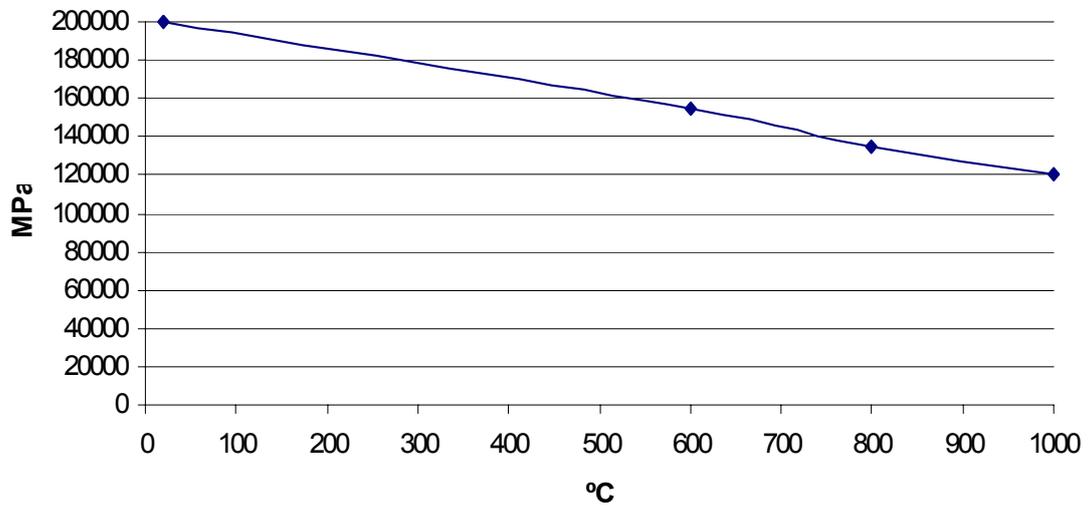


Figura B.20. Módulo elástico. Acero 1.4818

TENSIÓN DE FLUENCIA. Acero 1.4818

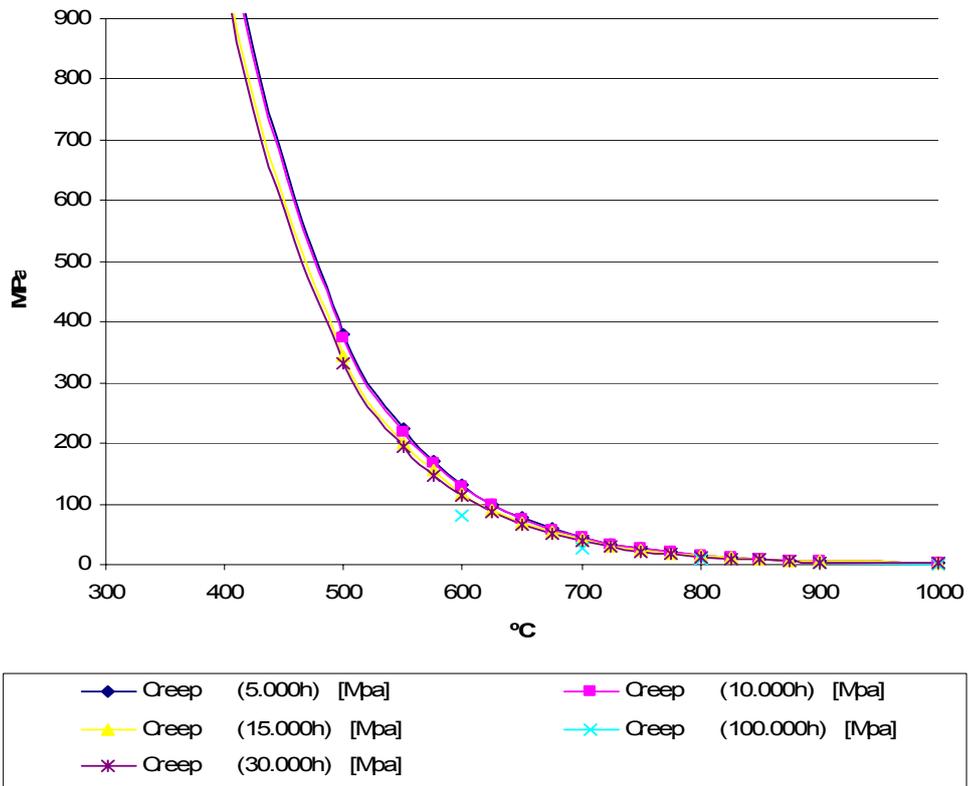


Figura B.21. Tensión de fluencia. Acero 1.4818

En la figura B.22 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

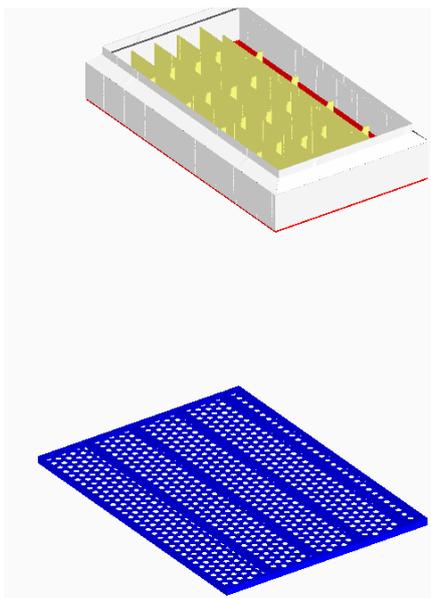


Figura B.22 Componentes material 5

B.3.6 Material 6: Acero 1.4828

- Denominación EN 10027:
 - Denominación numérica: 1.4828
 - Denominación simbólica: X 15CrNiSi 20 12
- Denominación AISI: AISI-309

Según la normativa EN se trata de un acero aleado, especial, dentro del grupo de aceros inoxidables y refractarios, y con un contenido en Ni $\geq 2.5\%$.

Las propiedades usadas han sido las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha[T]$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Ver figura B.23.
- Módulo elástico: $E [T]$ (MPa). Ver figura B.24.
- Tensión de fluencia: $\sigma_{\text{creep}} [T,t]$ (MPa). Ver figura B.25.

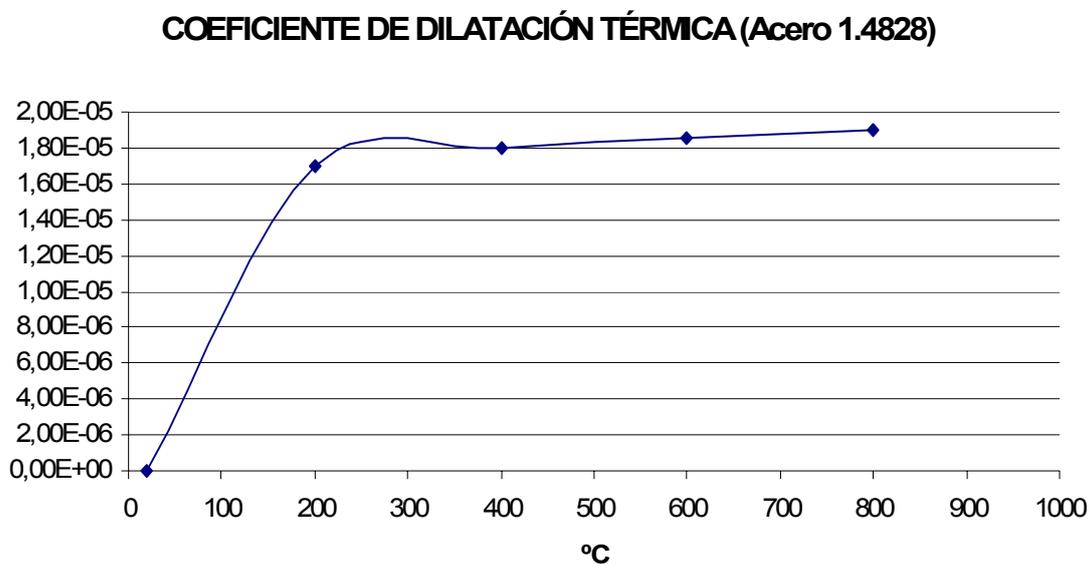


Figura B.23. Coeficiente α . Acero 1.4828

MÓDULO ELÁSTICO (Acero 1.4828)

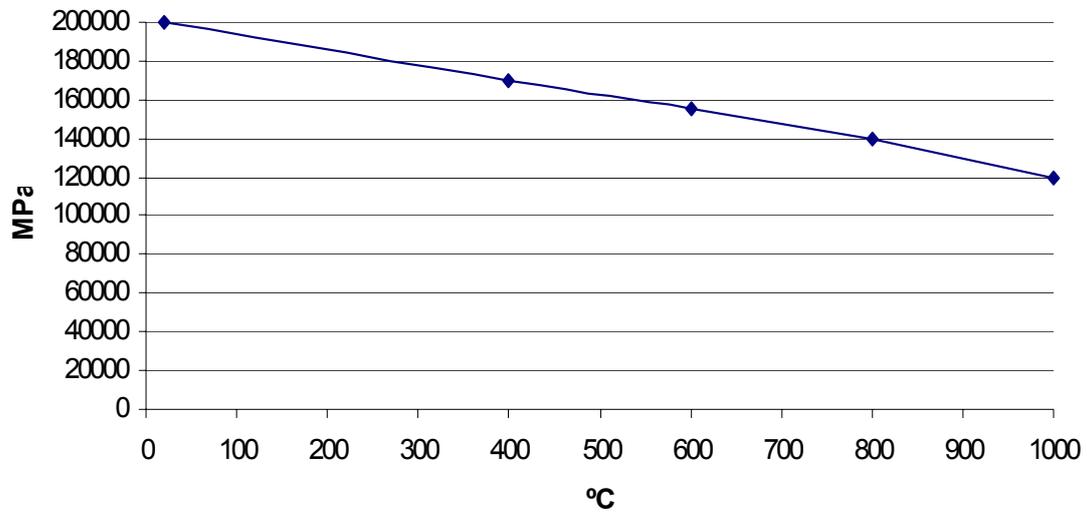


Figura B.24. Módulo elástico. Acero 1.4828

TENSIÓN DE FLUENCIA Acero 1.4828

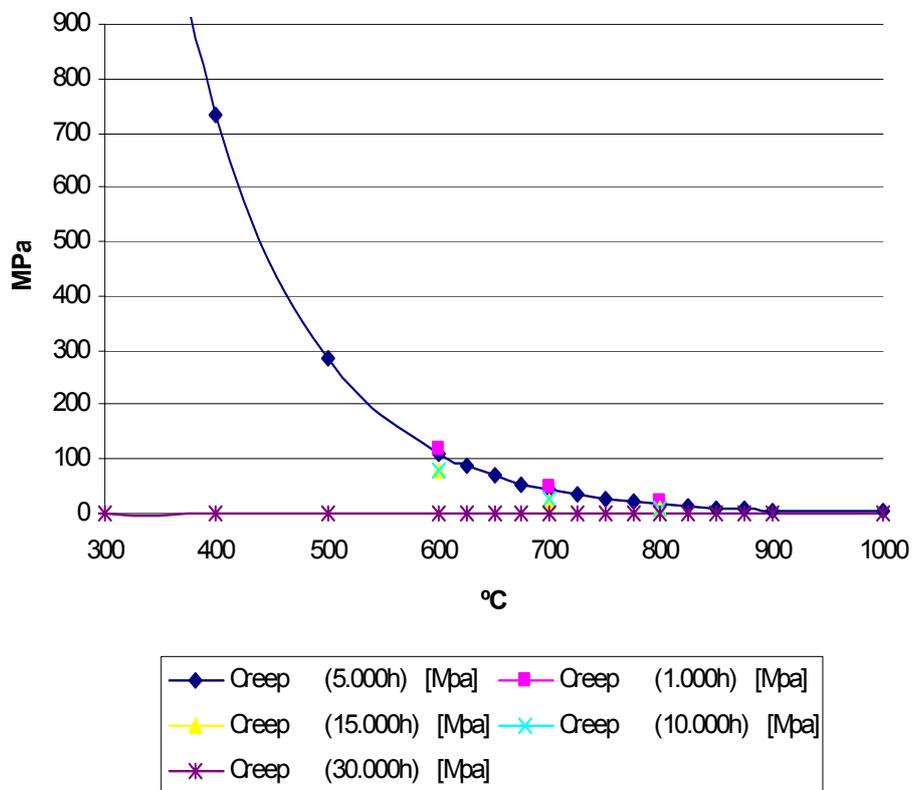


Figura B.25. Tensión de fluencia. Acero 1.4828

En la figura B.26 podemos ver que partes del intercambiador son de este acero.

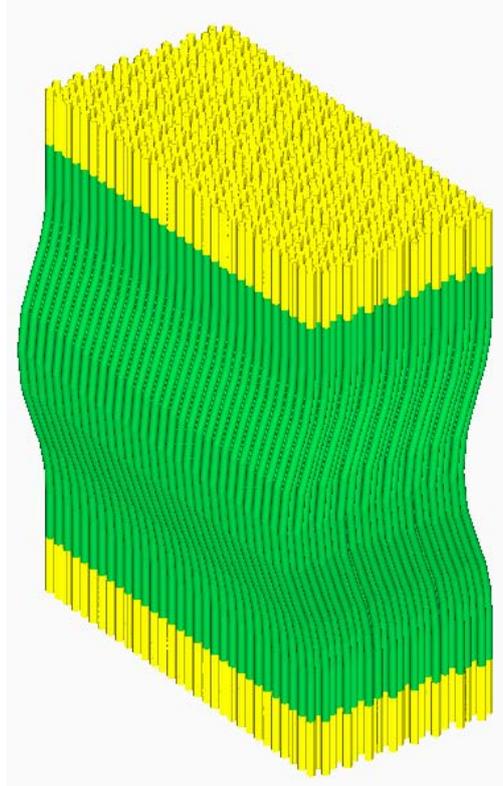


Figura B.26 Componentes material 6

Anexo C: Puntos de comparación de modelos

En este anexo se describen los puntos elegidos para la comparación de tensiones entre los diferentes modelos, se han elegido 12 puntos ubicados en diferentes lugares del modelo.

A continuación se listan los 12 puntos, junto con su ubicación y descripción

	DESCRIPCIÓN	PUNTO
	TENSIÓN EN TUBOS	P1
TOLVA ENTRADA	T.E. :ESQUINA CON BANDEJA	P2
	T.E. ESQUINAS TOLVA ENTRADA	P3
	T.E. UNIÓN RIGIDIZ A PAREDES	P4
	T.E. RIGIDIZ ESCUADRA A BANDEJA	P5
	T.E. TENSIÓN GENERAL EN BANDEJA	P6
TOLVA SALIDA	T.S.:ESQUINA CON BANDEJA	P7
	T.S.ESQUINA TOLVA SALIDA	P8
	T.S.TENSIÓN EN BANDEJA	P9
CAJÓN RETORNO	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA CALIENTE	P10
	C.R.:BANDEJA INFERIOR ZONA FRÍA	P11
	C.R.:ESQUINAS	P12

Figura C1: Tabla. Puntos de comparación de modelos

Las siguientes figuras muestran la ubicación de los 12 puntos, en vez de colocar imágenes de la geometría se ha preferido mostrar imágenes de tensiones del modelo 1, así se ve claramente que cada punto corresponde a una zona con tensiones relevantes.

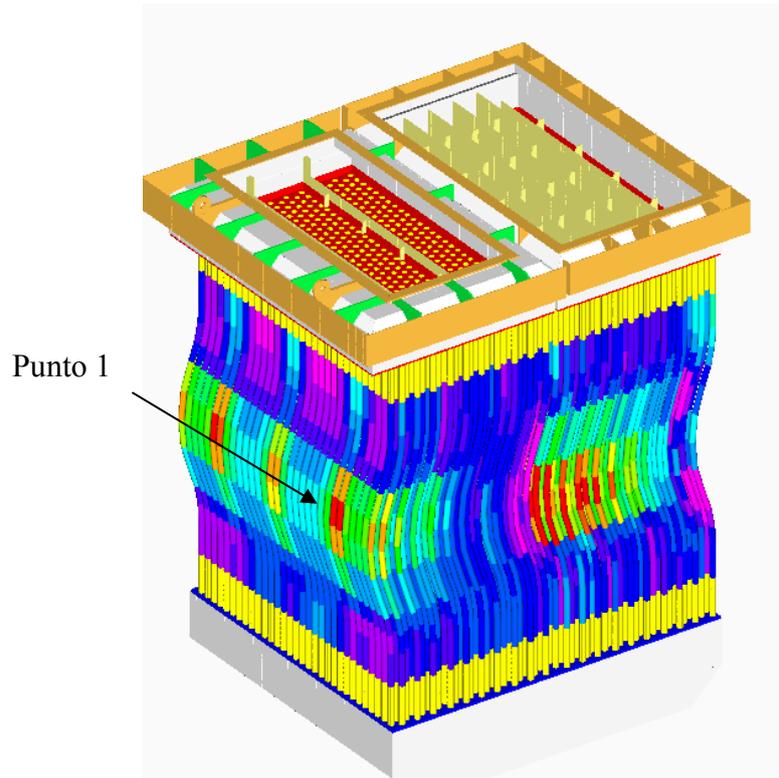


Figura C2: Punto 1

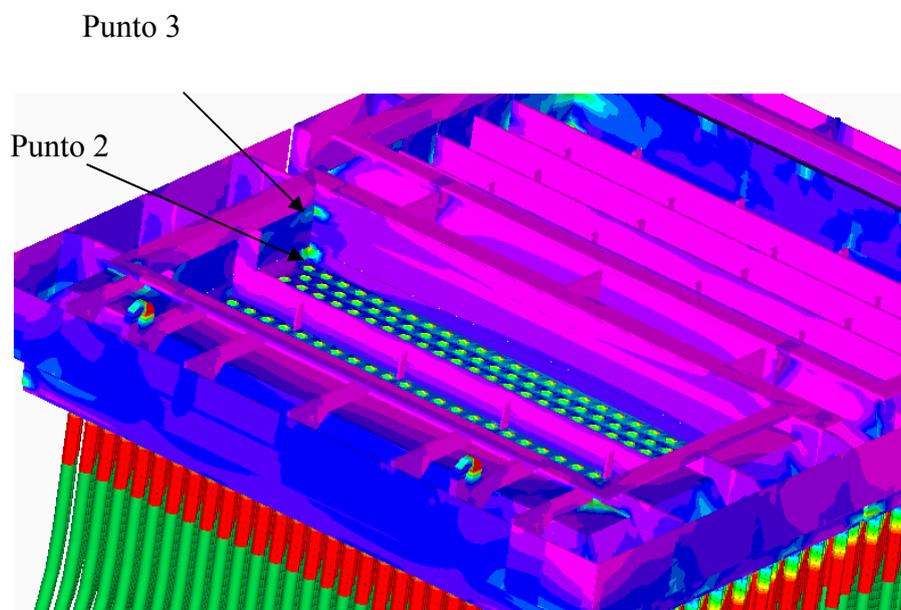


Figura C3: Puntos 2 y 3

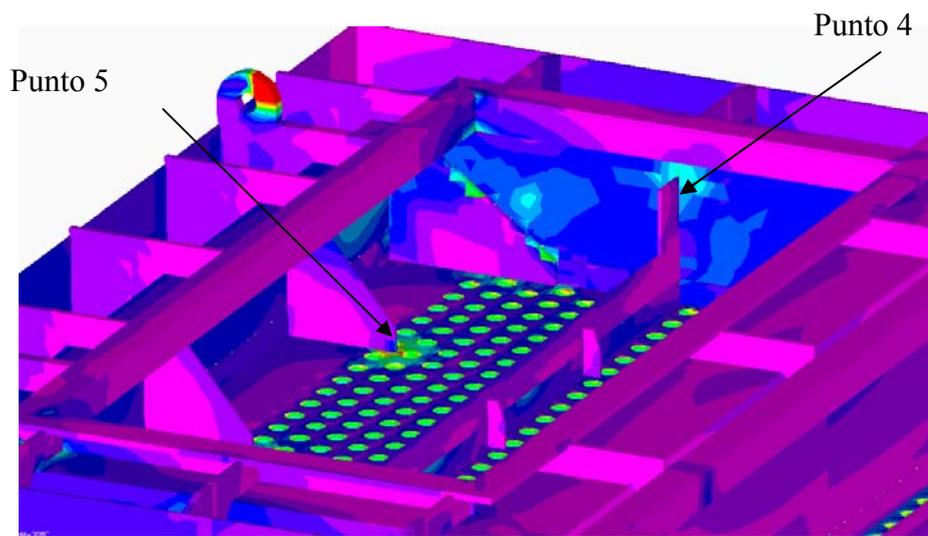


Figura C4: Puntos 4 y 5

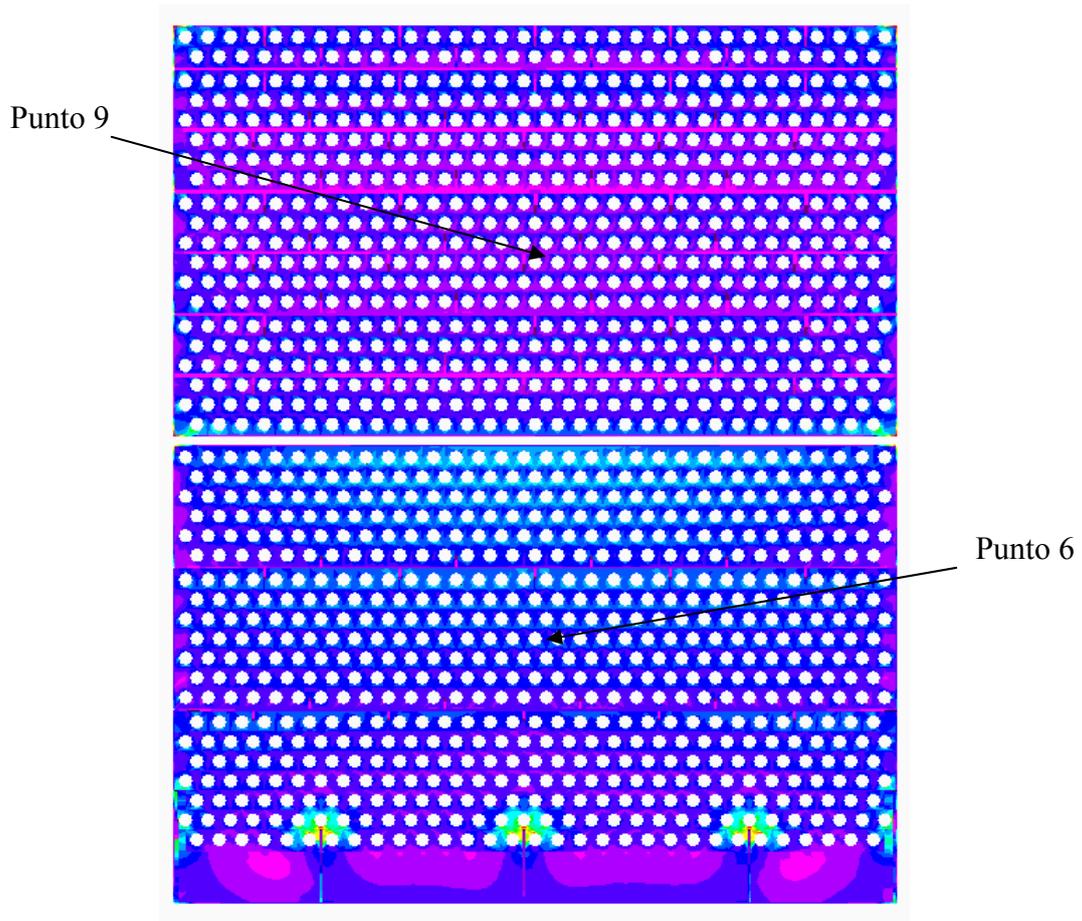


Figura C5: Puntos 6 y 9

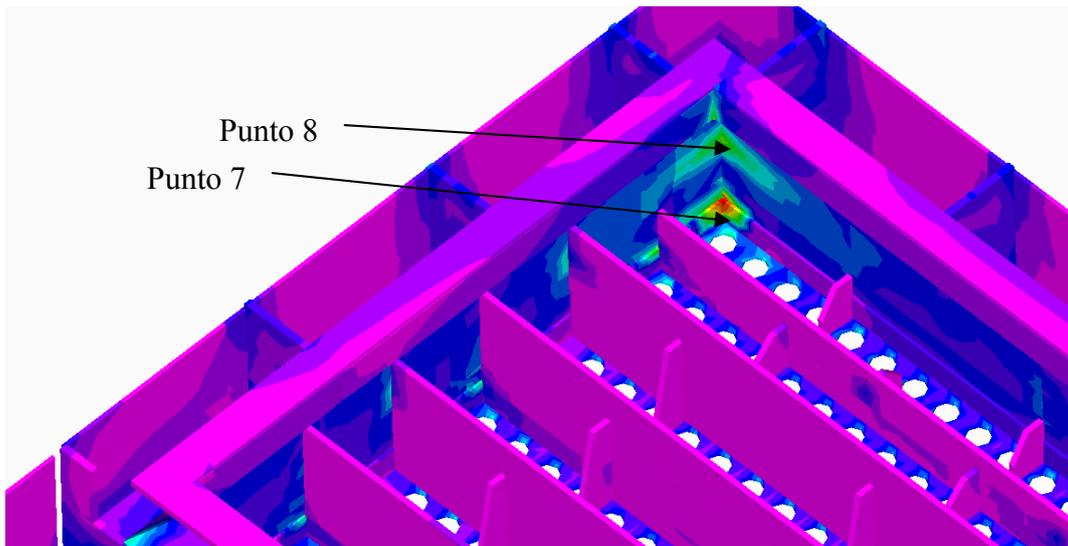


Figura C6: Puntos 7 y 8

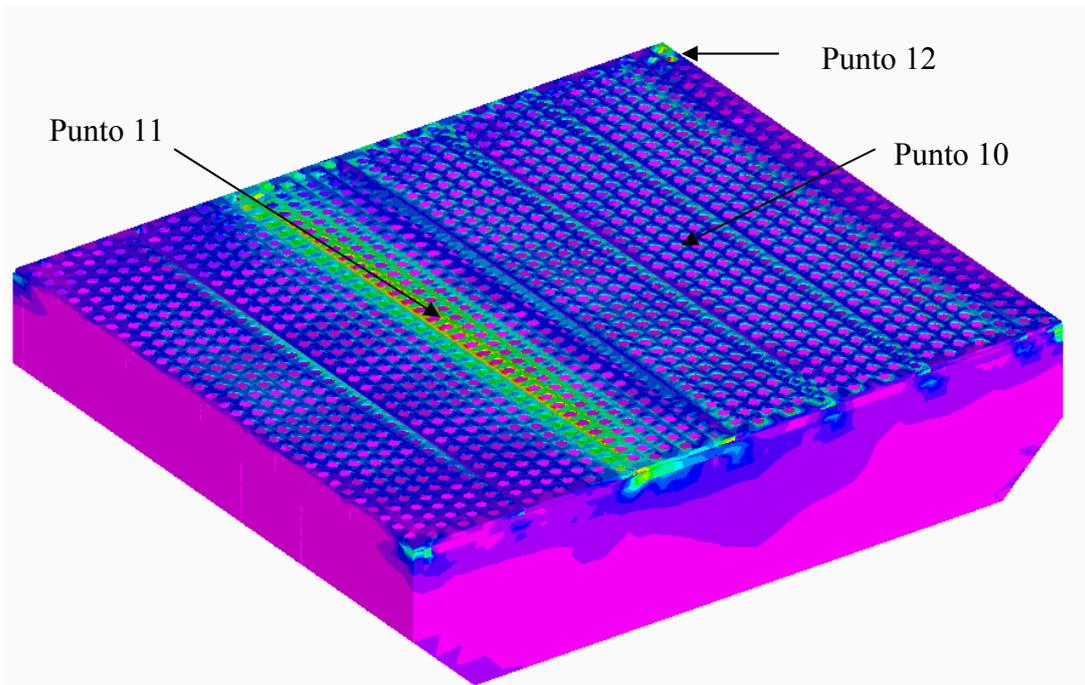


Figura C7: Puntos 10, 11 y 12

Anexo D: Resultados

A lo largo de este anexo se muestran detalladamente los resultados obtenidos en los diferentes modelos, la comparación de estos resultados se realiza en el apartado 3.2 de la memoria.

D.1. Modelo 1

Este es el modelo original, con la geometría y materiales originales, podemos observar su malla en el anexo A, y las cargas y condiciones de contorno en los apartados 2.2.3 y 2.2.4.

D.1.1 Modelo1 :Peso propio

La primera prueba que se realiza en el modelo es la del peso propio, si las deformaciones son correctas y las tensiones no muy altas, la malla funciona correctamente.

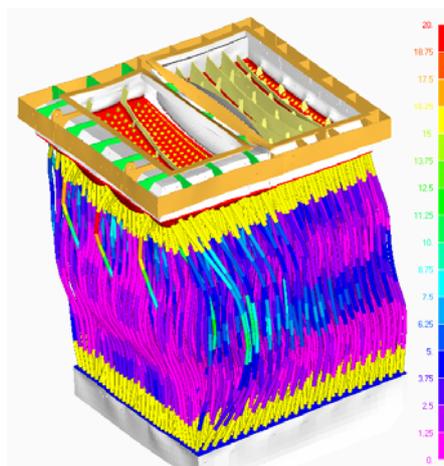


Figura D1: Modelo 1. Peso propio. Tensión en tubos (MPa)

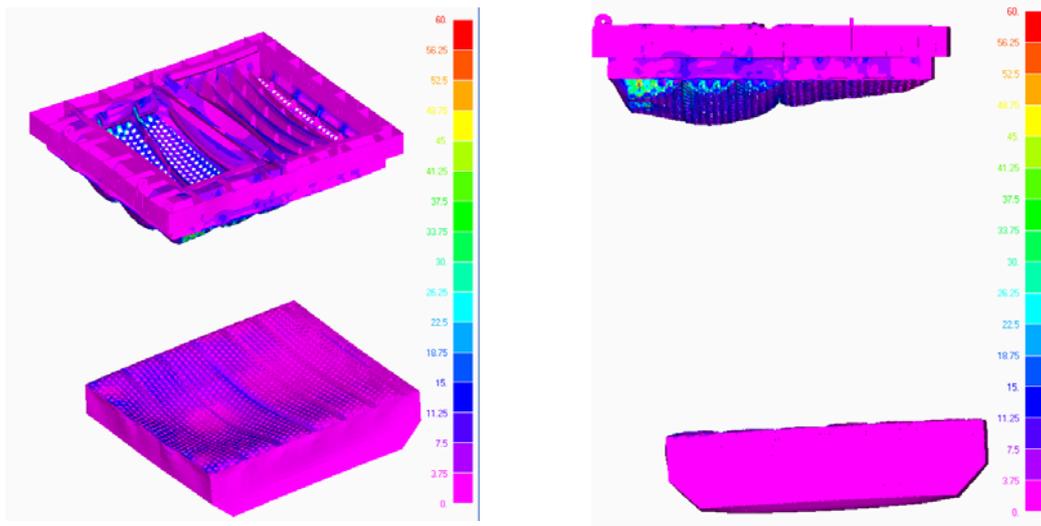
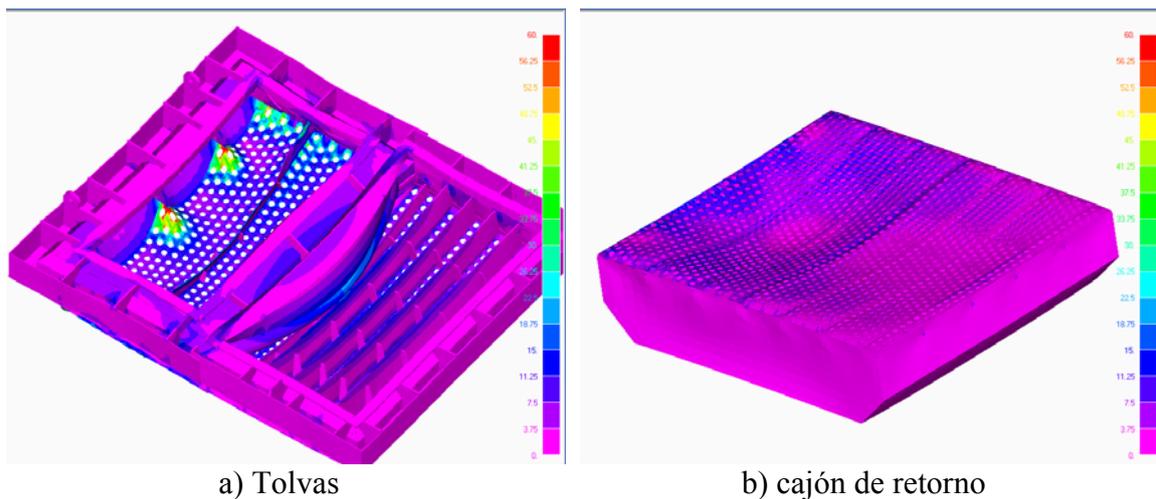


Figura D2: Modelo 1. Peso propio. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D3: Modelo 1. Peso propio. Tensión 2

Se aprecia que el modelo funciona correctamente; en los tubos se crea una flexión originada por la curvatura de los tubos, con un valor aproximado de unos 18 MPa, la bandeja superior se deforma de acuerdo con esa flexión, siendo mayor su flecha en la zona de la tolva de entrada.

Se puede observar que los valores de tensión no son muy altos, unos 20 MPa como valor tope, a excepción de la zona de los rigidizadores en escuadra de la tolva de entrada, donde se alcanzan valores de 60 MPa.

El máximo desplazamiento absoluto es de 1,6 mm.

D.1.2 Modelo 1: Temperatura

El siguiente paso poner temperaturas a todos los elementos del conjunto, estas se han realizado según lo descrito en el apartado 2.2.4.

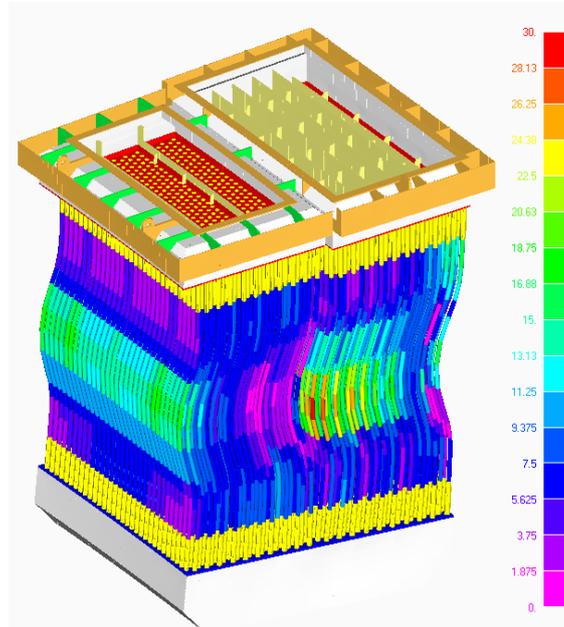


Figura D4: Modelo 1. Temperatura. Tensión en tubos (MPa)

Podemos ver como la tensión en los tubos se ha incrementado hasta los 30 MPa.

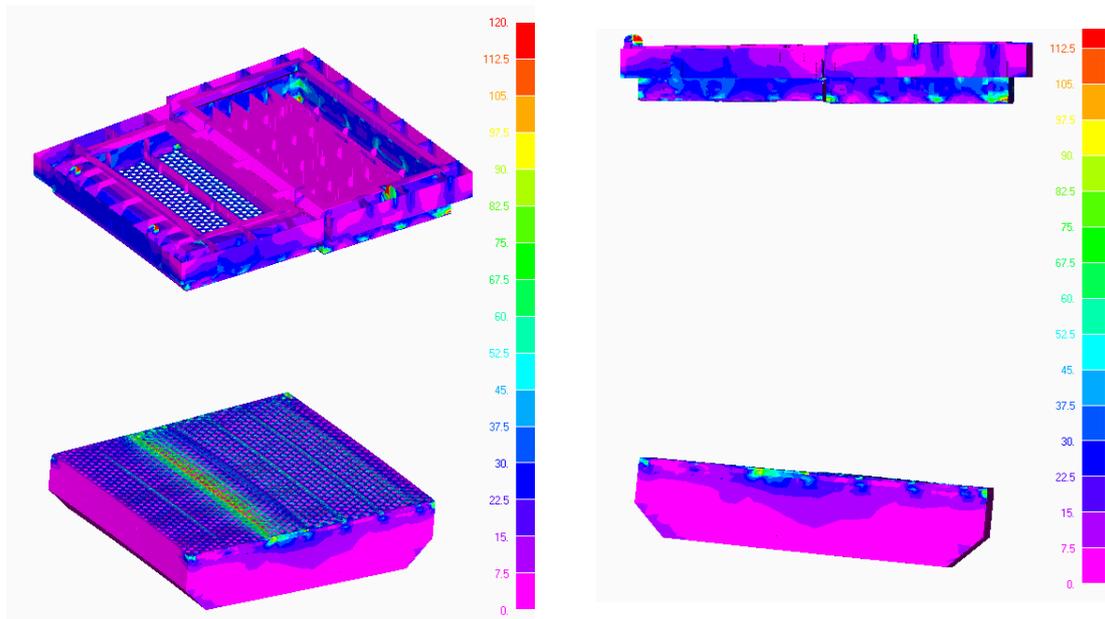
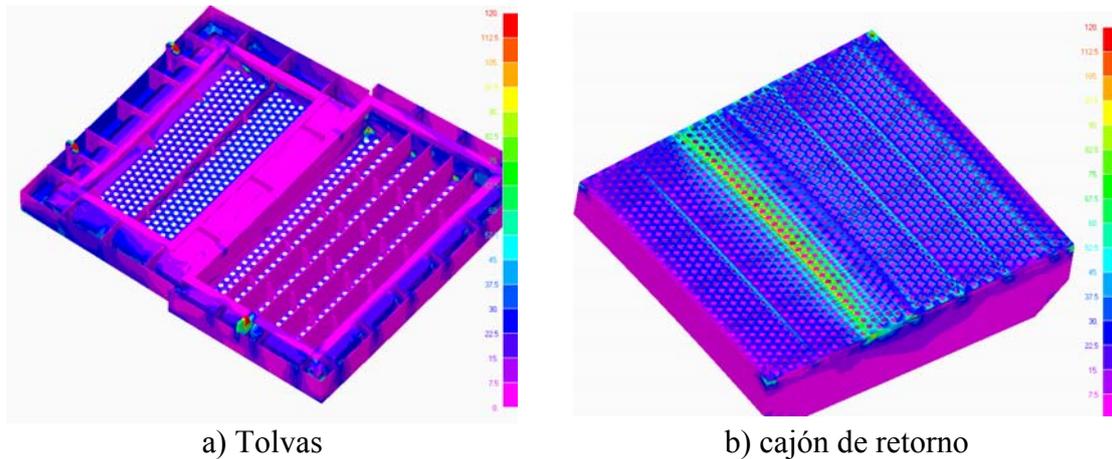


Figura D5: Modelo 1. Temperatura. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D6: Modelo 1. Temperatura. Tensión 2

Lo primero que se puede observar es que la carga térmica hace flexionar al conjunto de la estructura (unos tubos están a más temperatura que otros), esta flexión es en sentido contrario que la del peso propio, con lo que nos damos cuenta que la curvatura de los tubos está realizada correctamente, con el fin de contrarrestar este efecto de flexión debido a la carga térmica.

Otro efecto es que la tolva de salida se dilata más que la de entrada, ya que esta es la que está más caliente. Las tolvas sufren otra flexión en el eje z (el vertical), este fenómeno es debido a que según se avanza en la coordenada y (coordenada que va de una tolva a otra) la temperatura aumenta, esto es lo mismo que ocurre en una barra sometida a un incremento de temperatura a lo largo de la sección, unas fibras dilatan más que otras, con lo que se crea un fenómeno de flexión.

D.1.3 Modelo1: Peso propio + temperatura

Una vez que se ha comprobado que ambas cargas (peso propio y temperatura) funcionan correctamente en la malla, se realiza un cálculo completo.

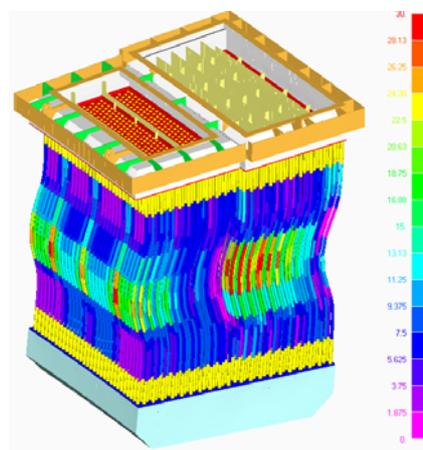


Figura D7: Modelo 1. pp+Temp. Tensión en tubos (MPa)

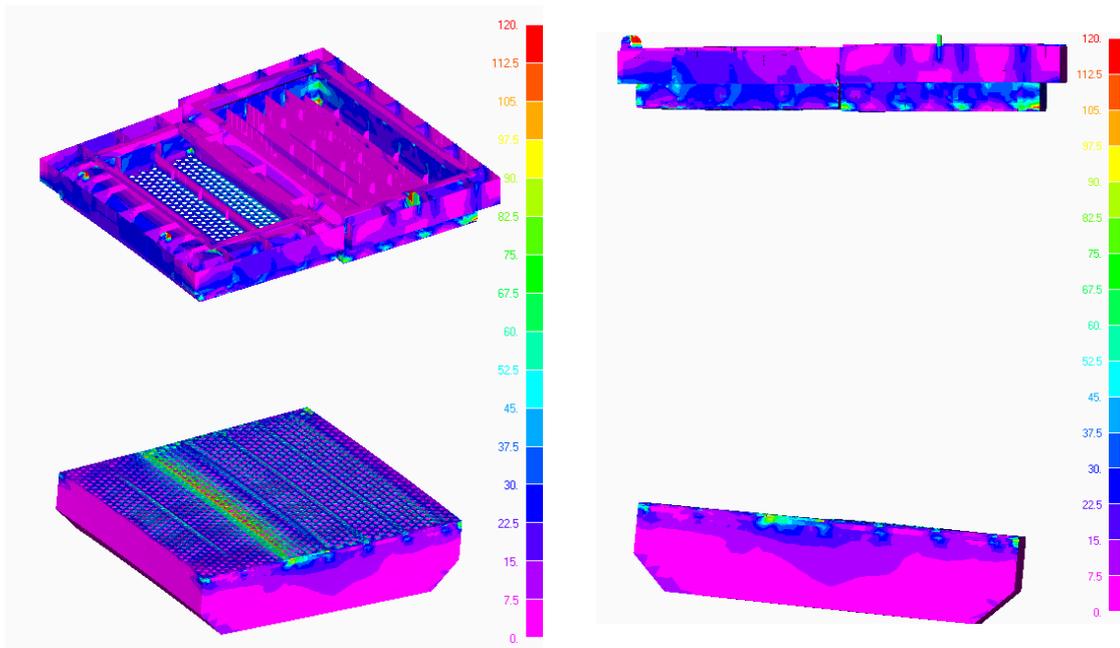
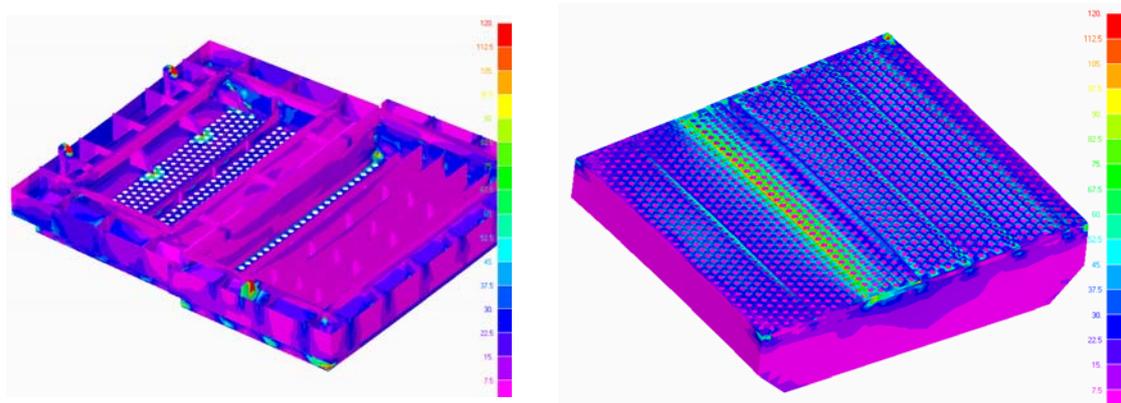


Figura D8: Modelo 1. pp+Temp. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D9: Modelo 1. pp+temp. Tensión 2

A continuación se muestran diferentes análisis realizados para 5000 y 30.000 horas de servicio.

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

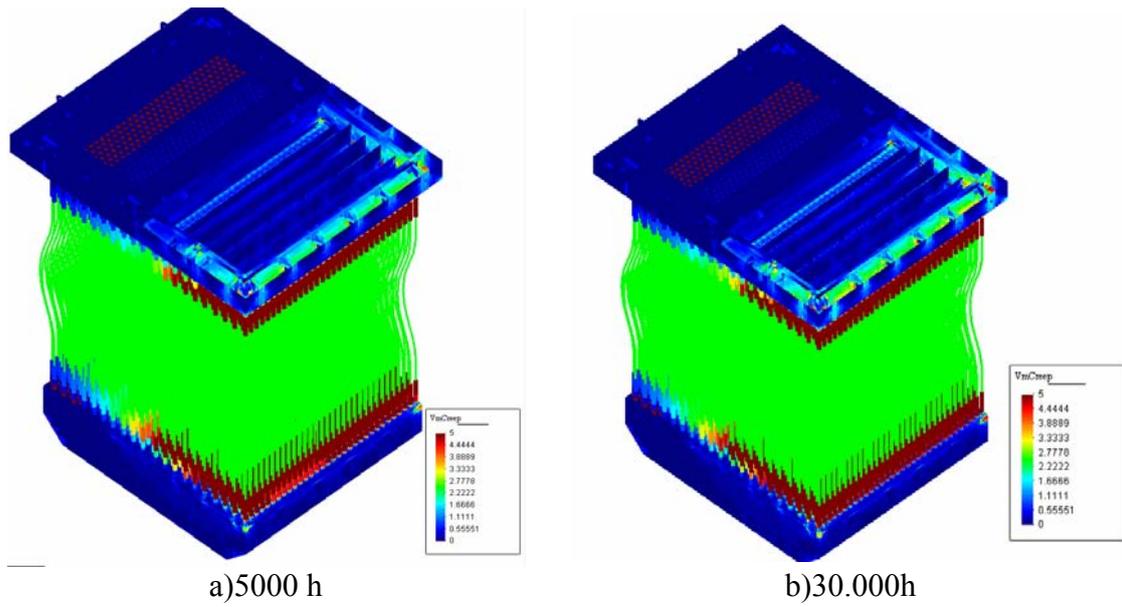


Figura D10: Modelo 1. I.T.F.-1

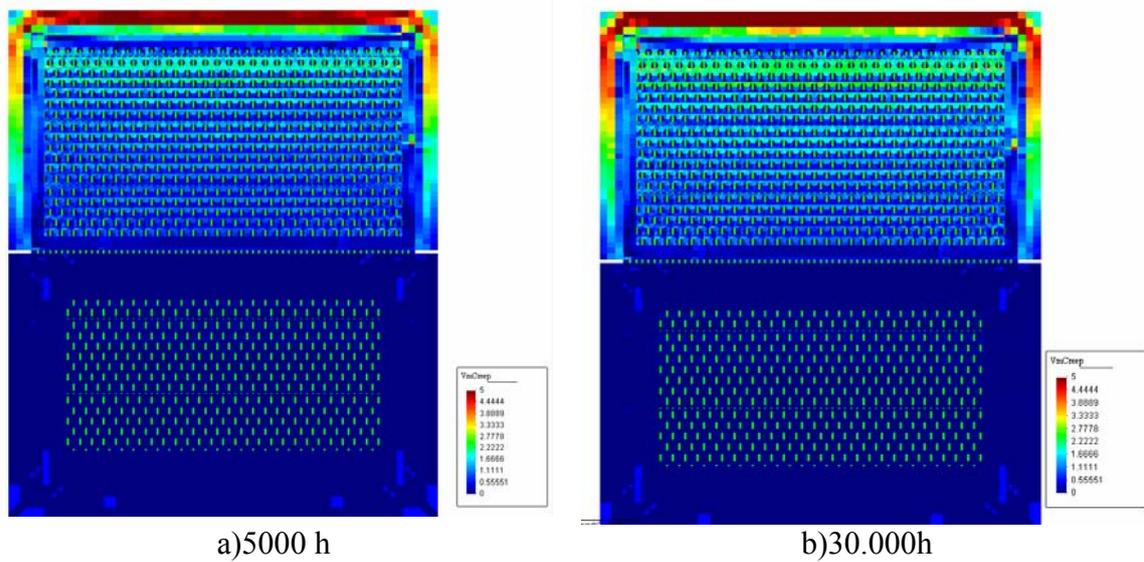


Figura D11: Modelo 1. I.T.F.-2

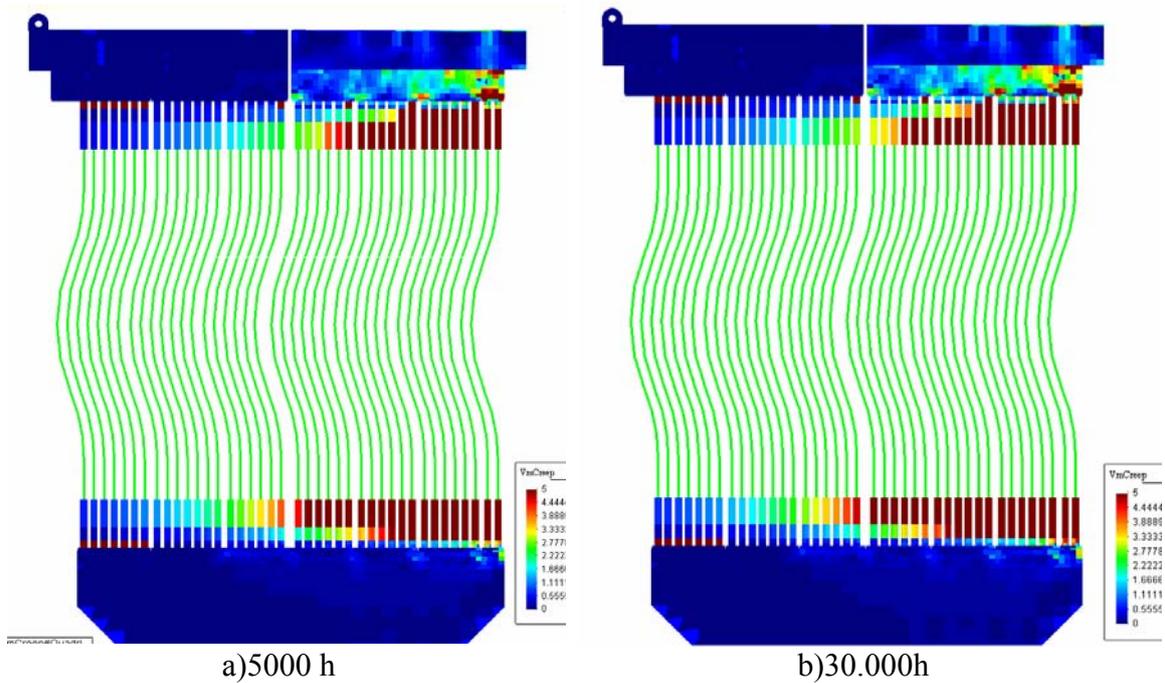


Figura D12: Modelo 1. I.T.F.-3

D.2. Modelo 2

La primera mejora que se ha realizado en el modelo ha sido realizar una ranura en forma de “L” en la zona de de apoyo de las tolvas que están en las esquinas, con ello conseguimos liberar tensiones en las esquinas ya que dejamos que esa placa dilate libremente en la zona de la esquina. En la malla la liberación ha consistido en quitar 3 elementos en cada esquina.

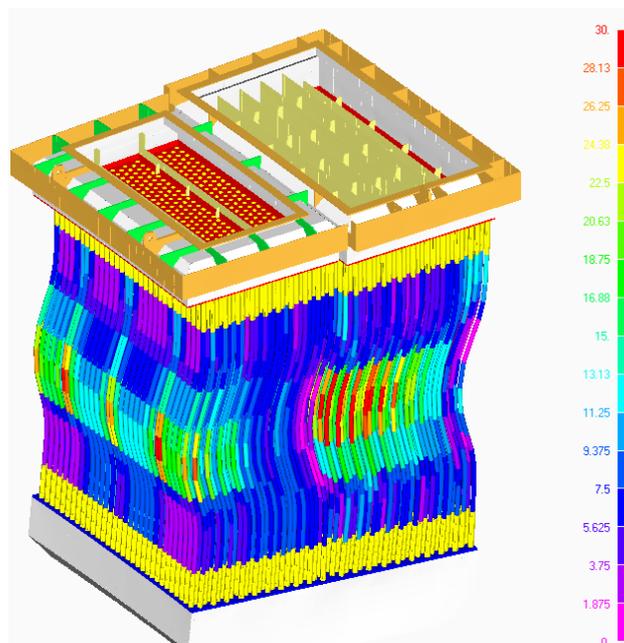


Figura D13: Modelo 2. Tensión en tubos (MPa)

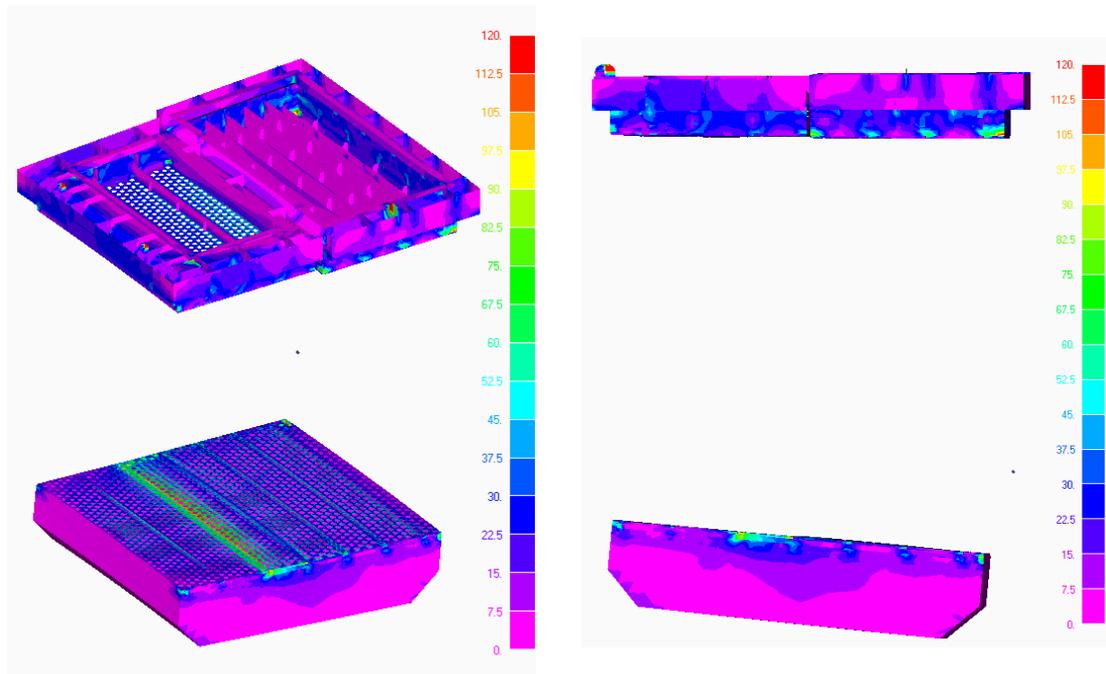


Figura D14: Modelo 2. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)

Podemos observar que la tensión en las esquinas ha disminuido con respecto al modelo 1.

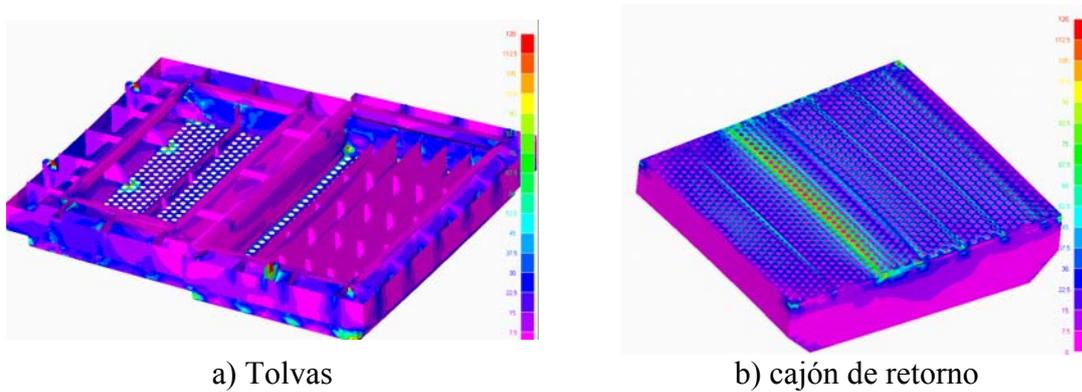


Figura D15: Modelo 2. Tensión 2

Como último análisis se realizó el índice de tensión de fluencia para un valor de 30.000 h.

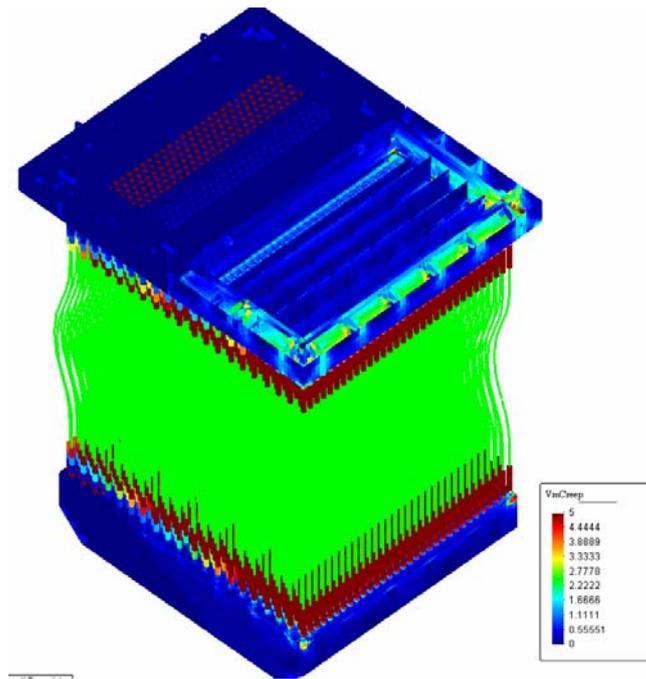


Figura D15: Modelo 2.I.T.F.-1

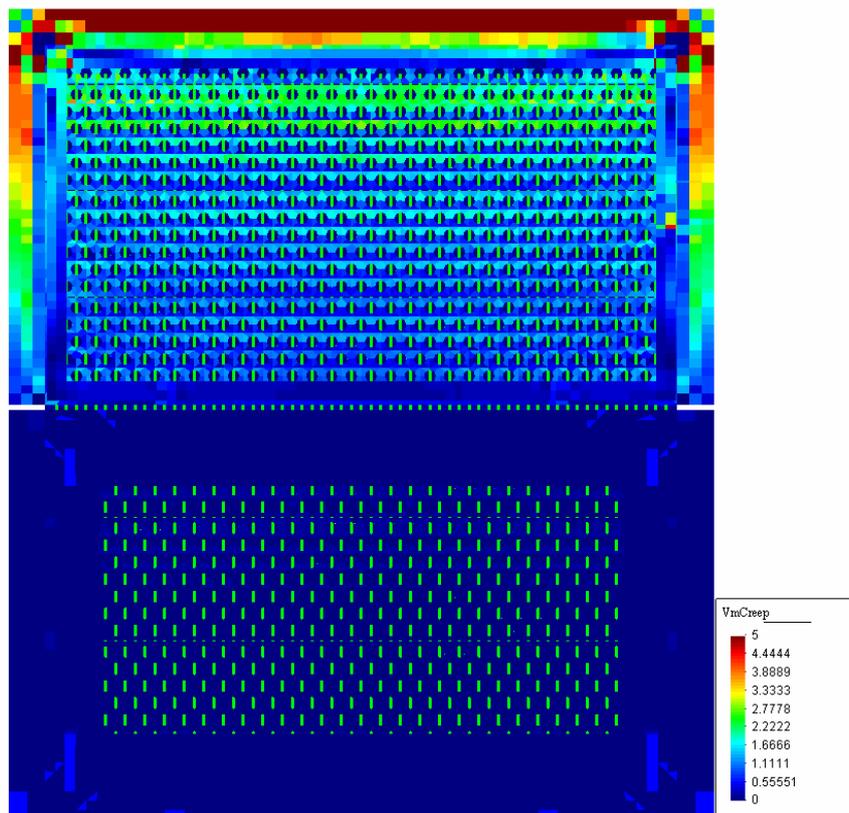


Figura D16: Modelo 2.I.T.F.-2

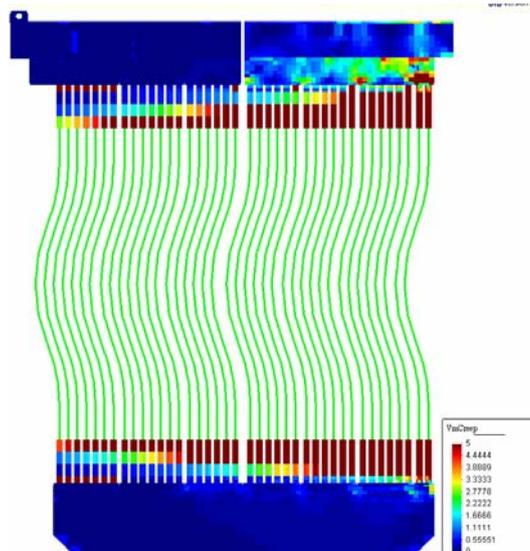


Figura D17: Modelo 2.I.T.F.-3

D.3. Modelo 3

Recordemos que el modelo 3 es igual que el 2 pero empleando el mismo acero para todas las piezas. En la siguiente figura se puede observar una leve reducción en la tensión de los tubos.

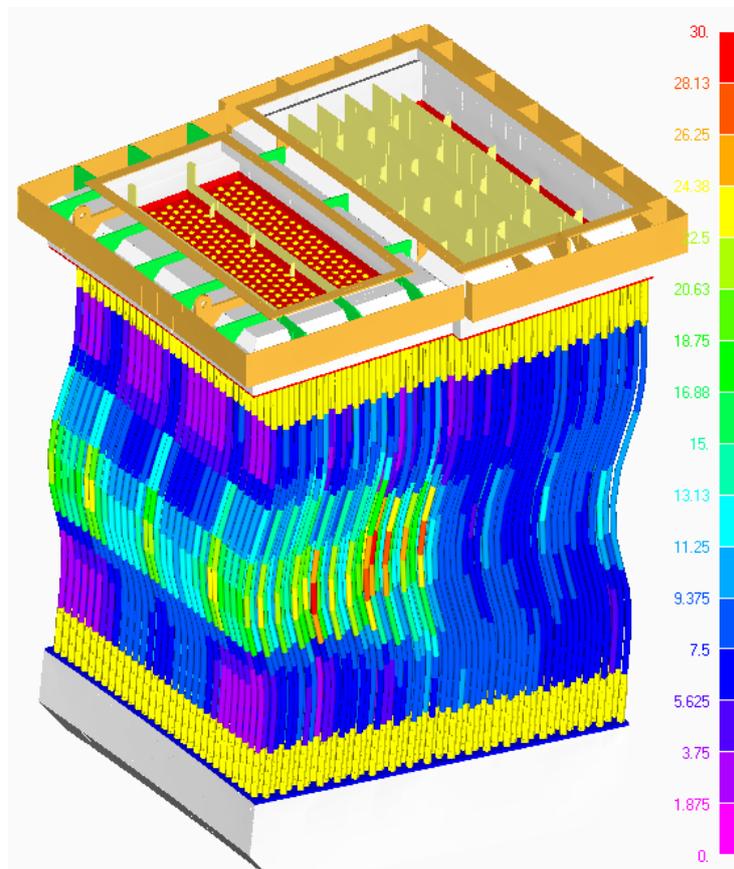


Figura D18: Modelo 3. Tensión en tubos (MPa)

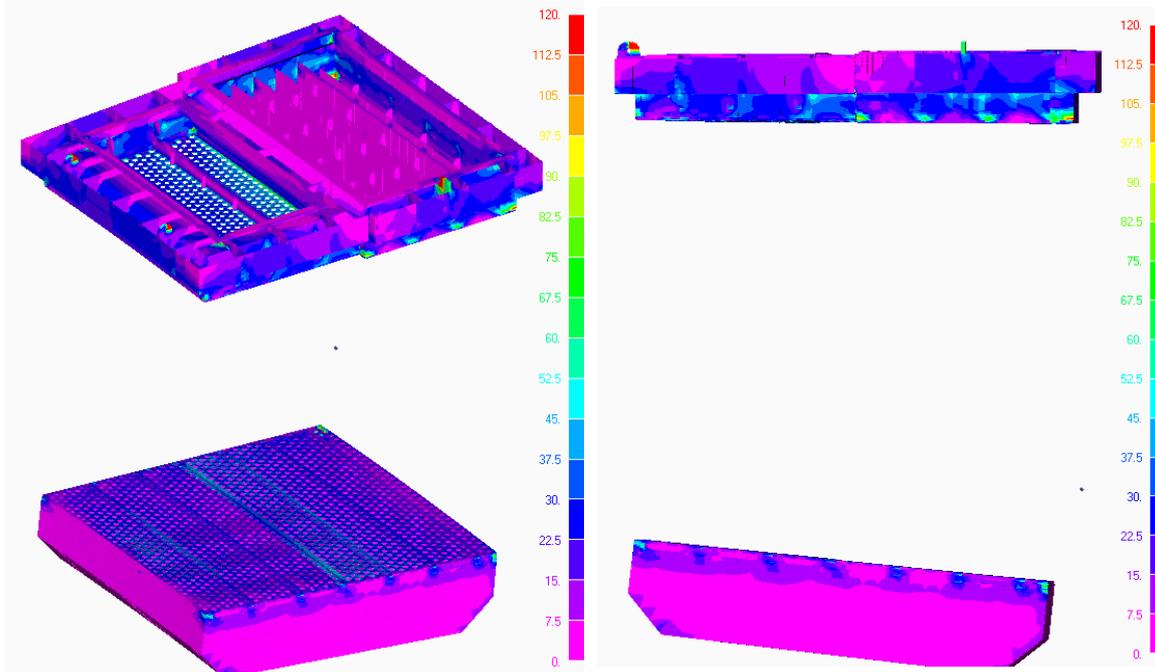


Figura D19: Modelo 3. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)

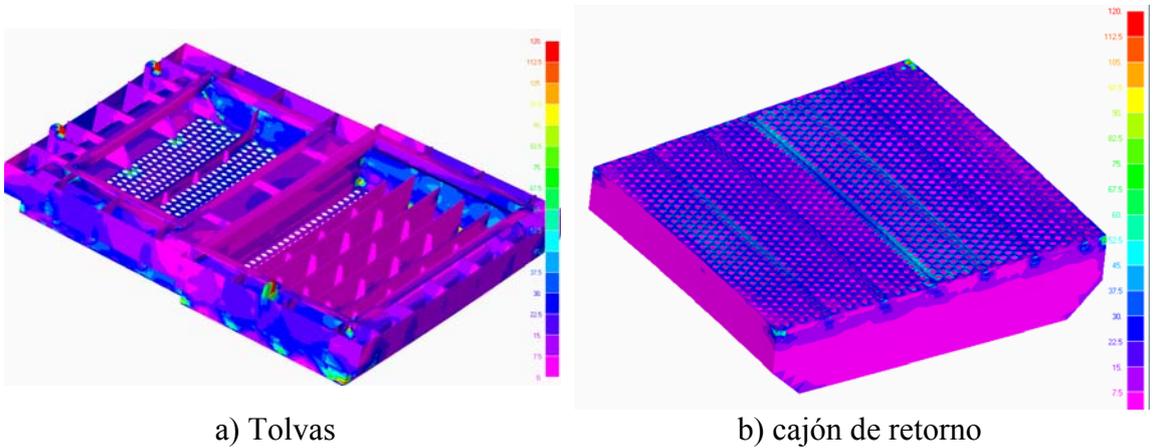


Figura D20: Modelo 3. Tensión 2

Como último análisis se realizó el índice de tensión de fluencia para un valor de 30.000 h. Se puede ver que el unificar el material también es una ayuda a la hora de disminuir la posibilidad de que aparezca el fenómeno de fluencia.

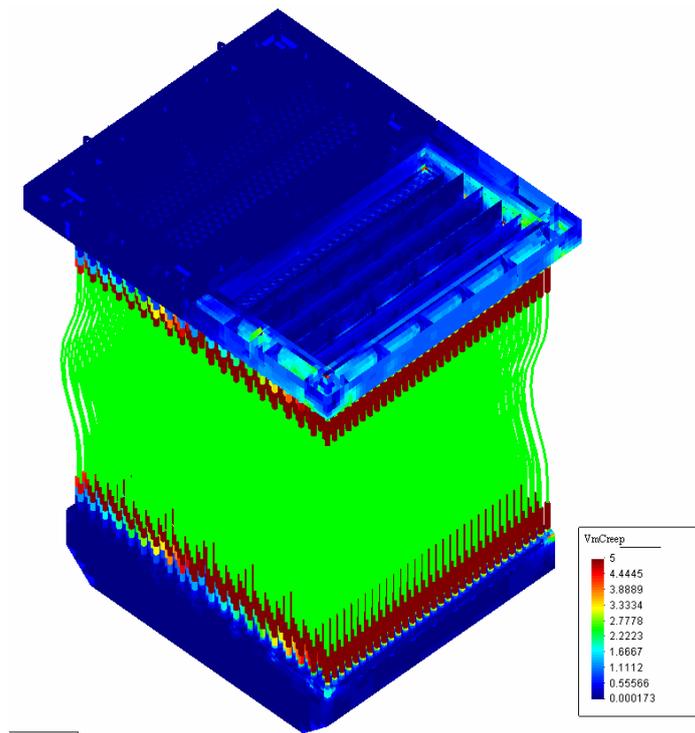


Figura D21: Modelo 3.I.T.F.-1

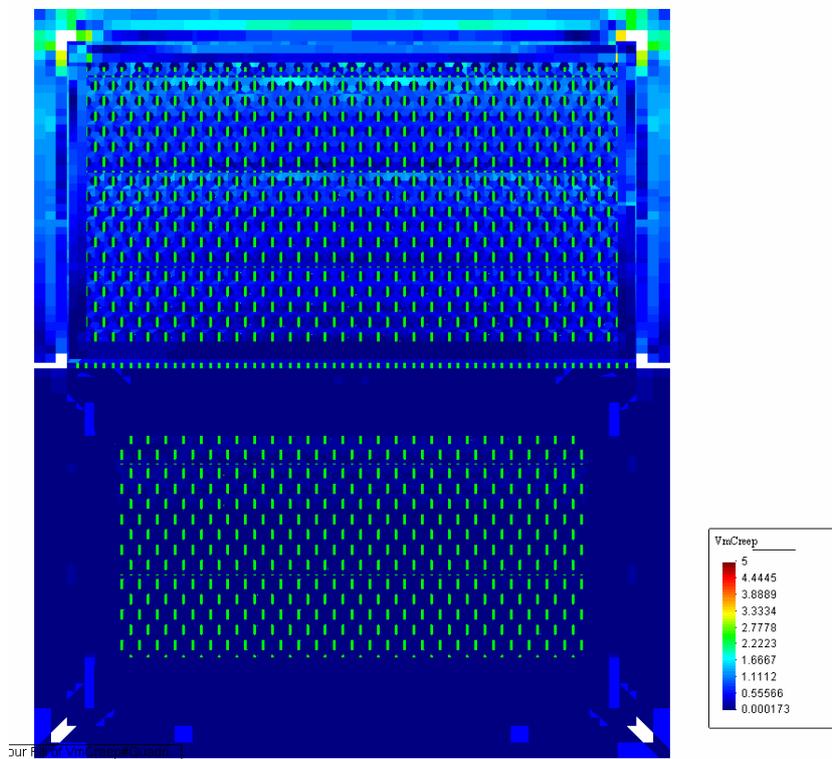


Figura D22: Modelo 3.I.T.F.-2

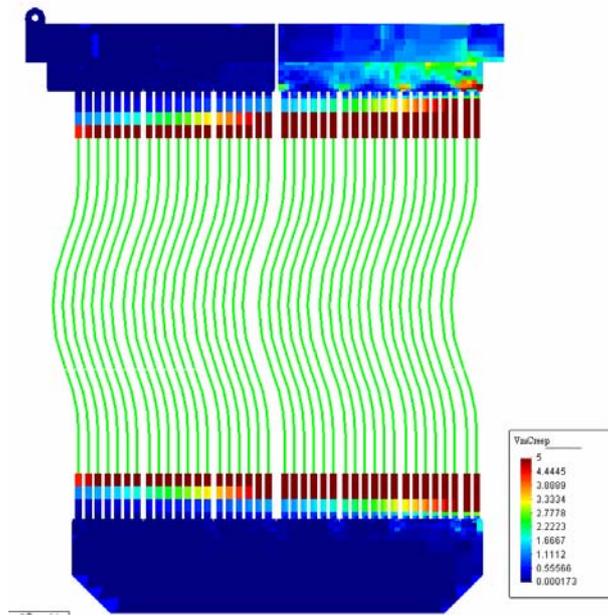


Figura D23: Modelo 3.I.T.F.-3

D.4. Modelo 4

Este modelo toma la base del modelo 2 pero además se ha optado por flexibilizar la zona de la bandeja inferior, para más datos consultar el anexo A (apartado A.4).

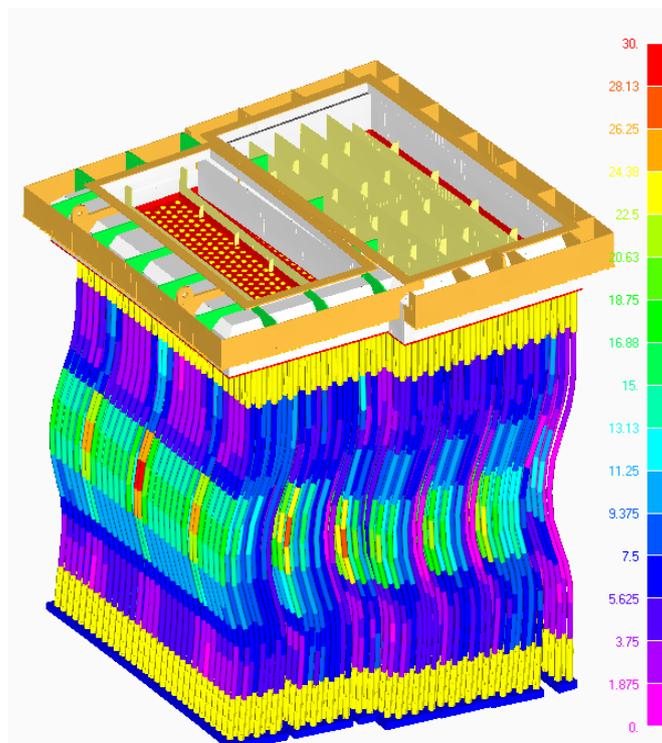


Figura D24: Modelo 4. Tensión en tubos (MPa)

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

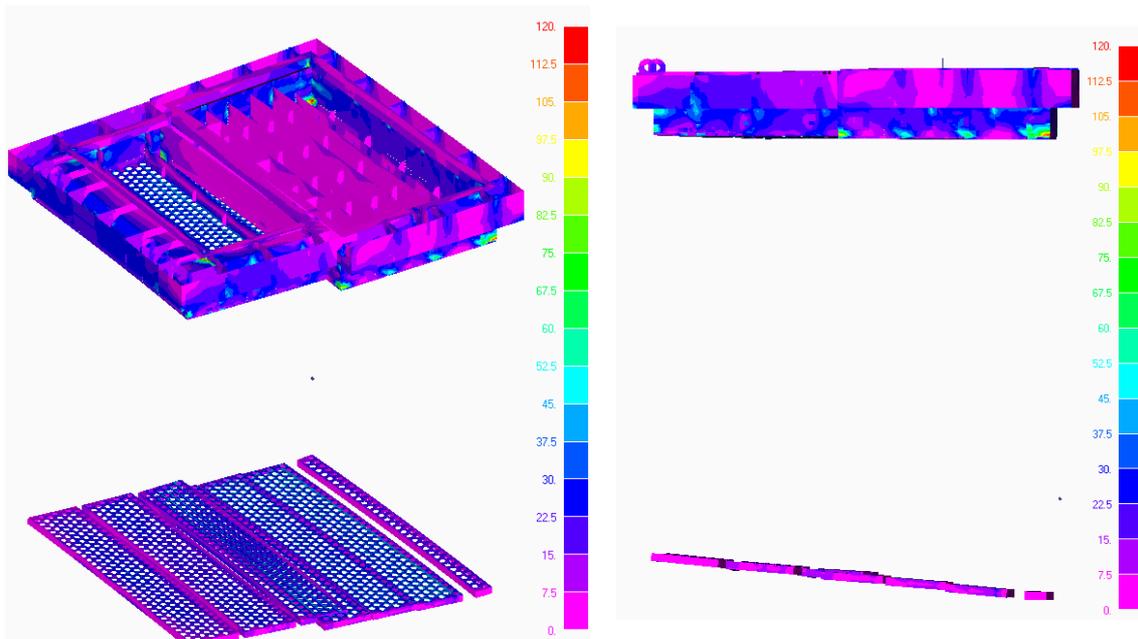
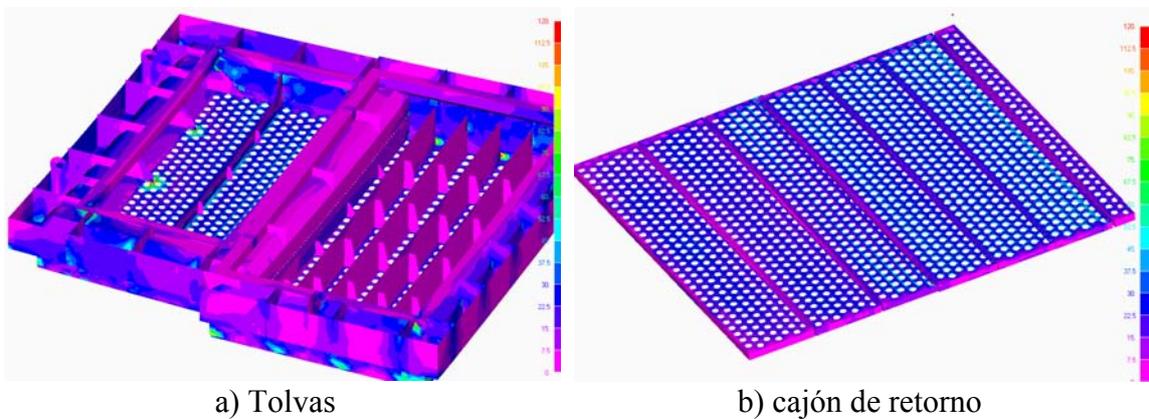


Figura D25: Modelo 4. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D26: Modelo 4. Tensión 2

Como último análisis se realizó el índice de tensión de fluencia para un valor de 30.000 h.

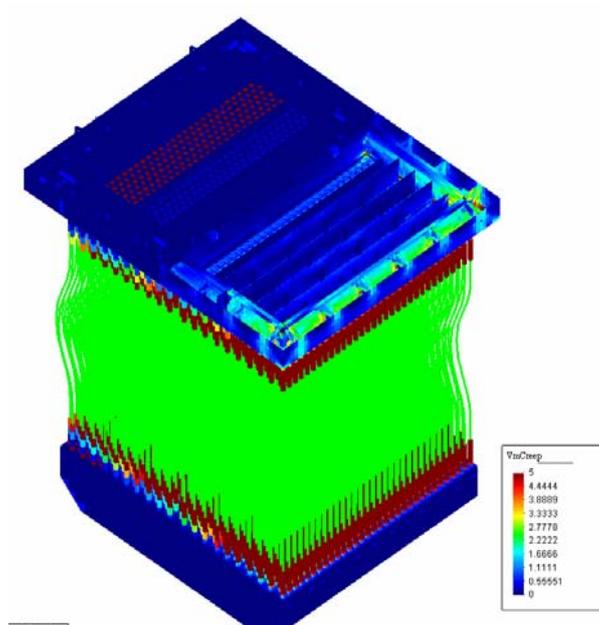


Figura D27: Modelo 4.I.T.F.-1

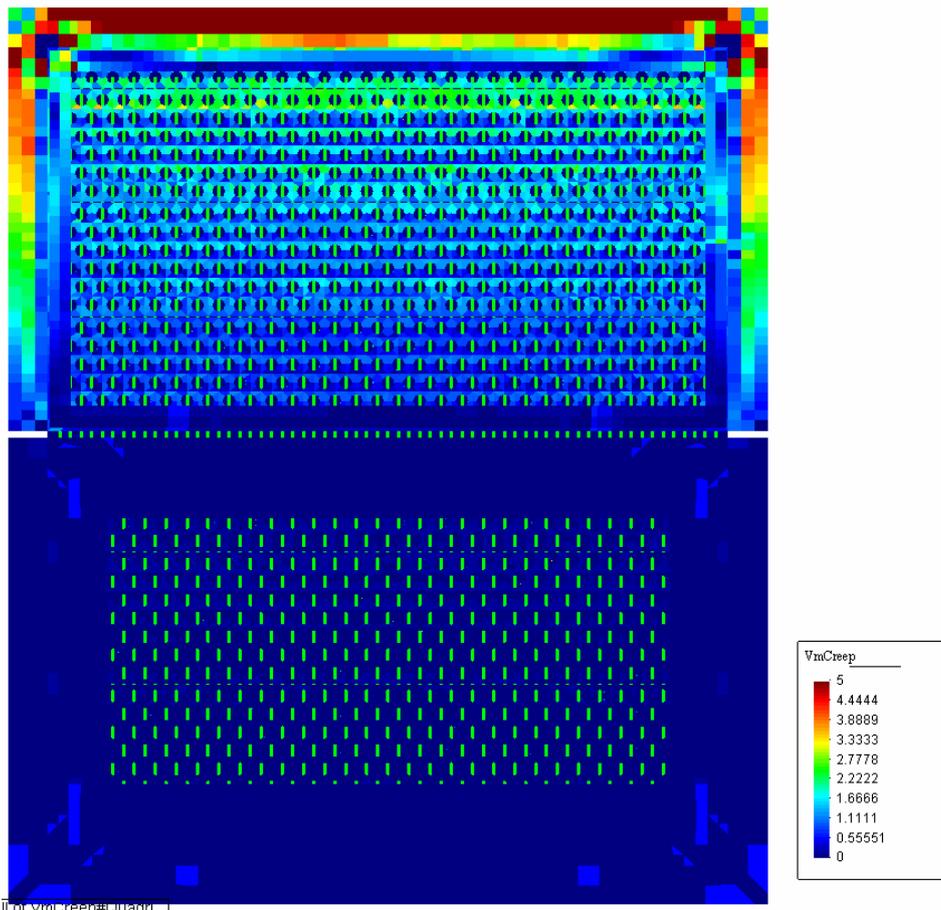


Figura D28: Modelo 4.I.T.F.-2

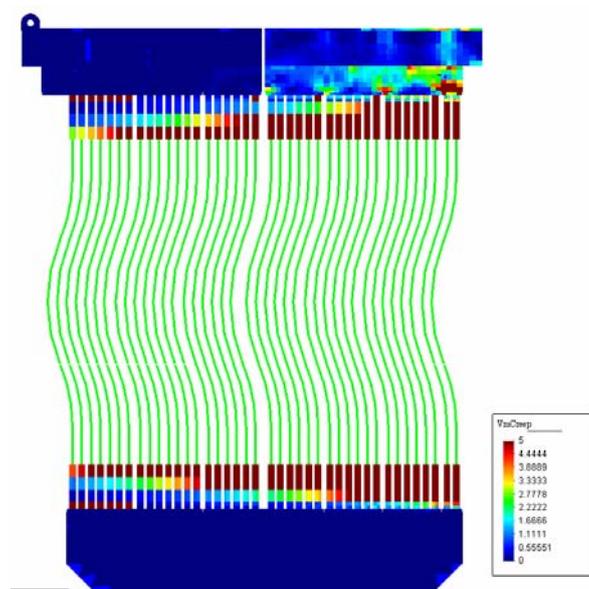


Figura D29: Modelo 4.I.T.F.-3

D.5. Modelo 5

El modelo 4 se ha tomado de base para este modelo, pero con la salvedad de haber suprimido los rigidizadores en escuadra y sustituido por otro del estilo a los que hay en las bandejas de las tolvas.

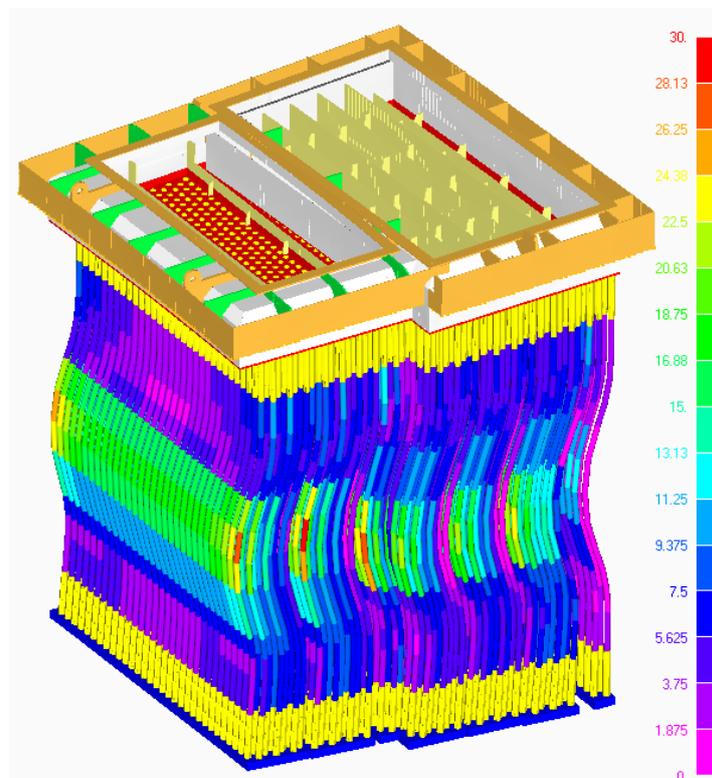


Figura D30: Modelo 5. Tensión en tubos (MPa)

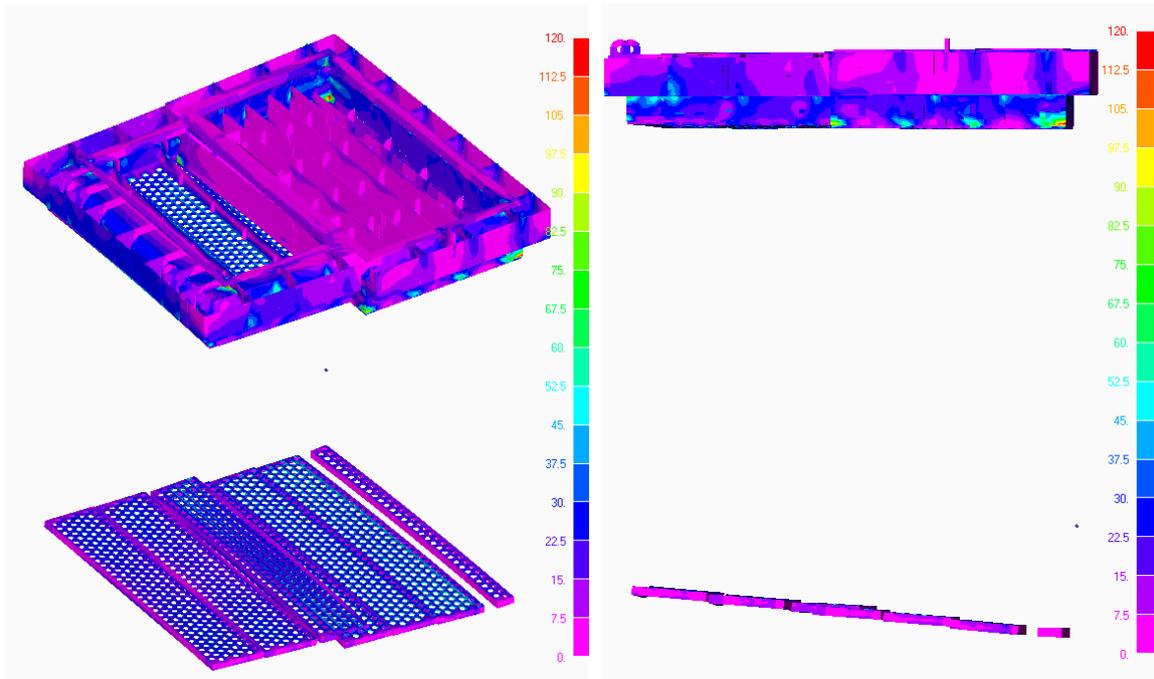
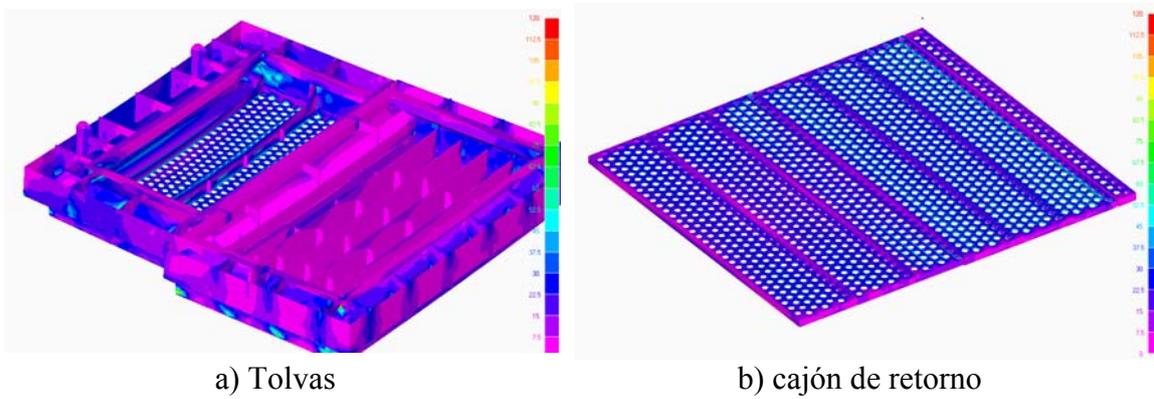


Figura D31: Modelo 5. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D32: Modelo 5. Tensión 2

Como último análisis se realizó el índice de tensión de fluencia para un valor de 30.000 h.

Cálculo resistente de un intercambiador de calor

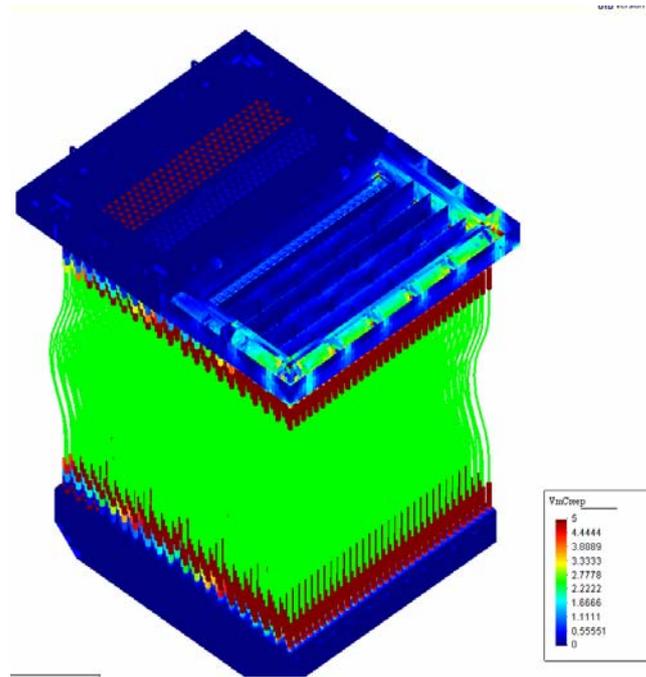


Figura D30: Modelo 5.I.T.F.-1

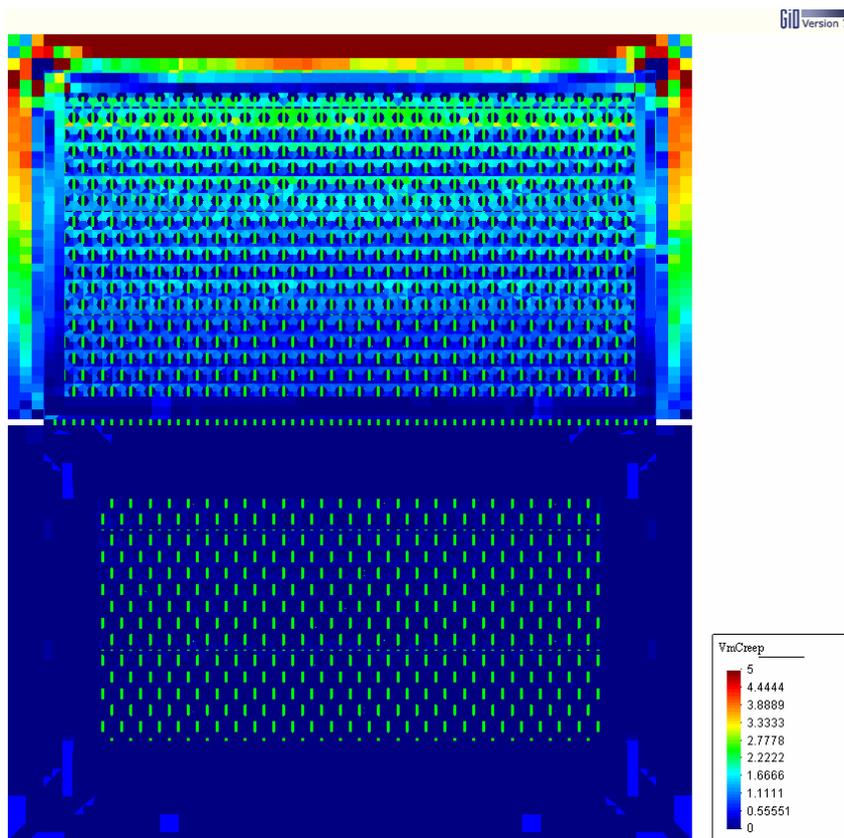


Figura D31: Modelo 5.I.T.F.-2

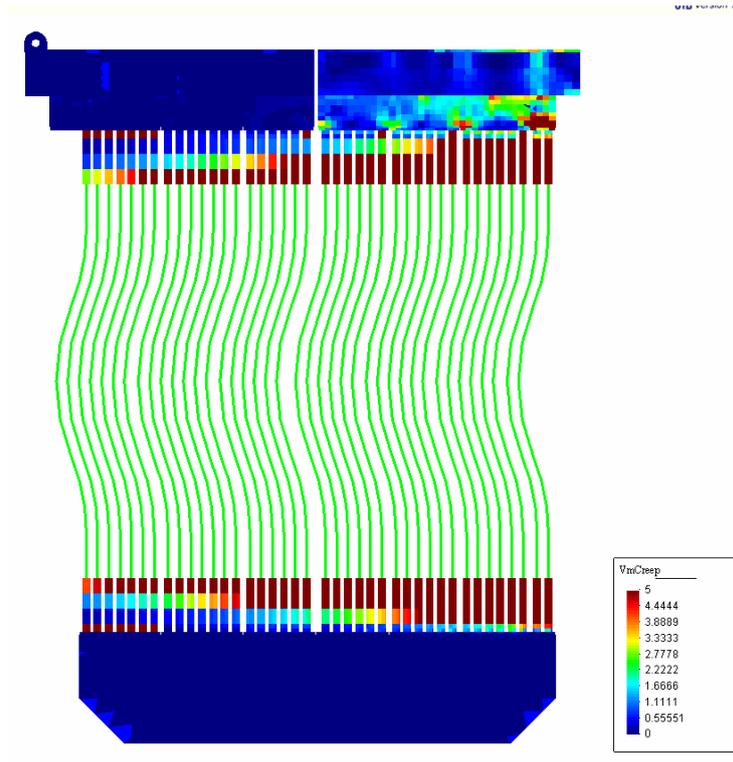


Figura D32: Modelo 5.I.T.F.-3

D.6. Modelo 6

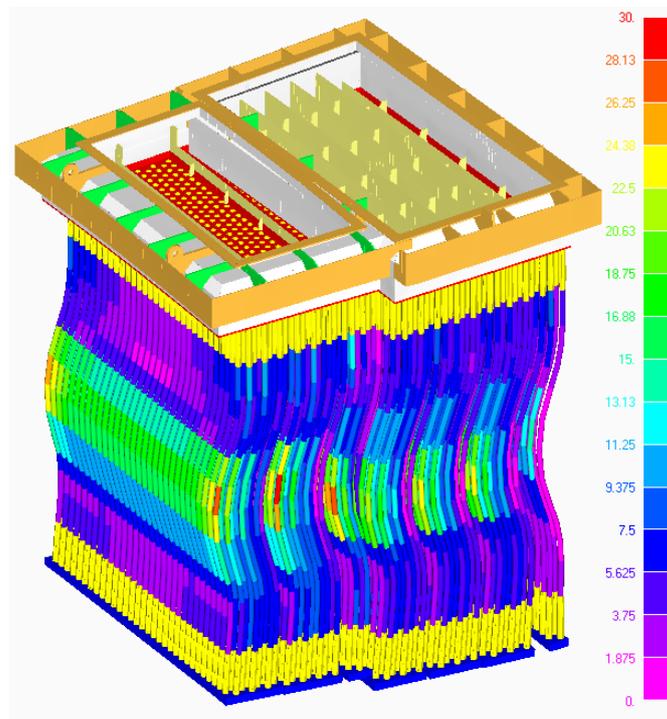


Figura D33: Modelo 6. Tensión en tubos (MPa)

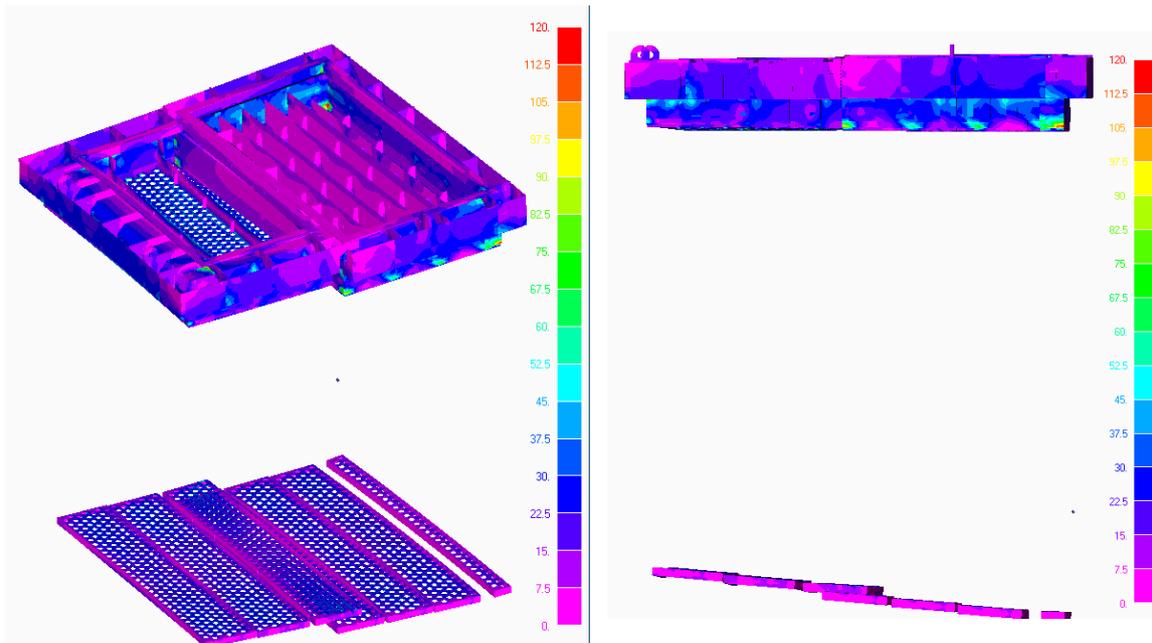
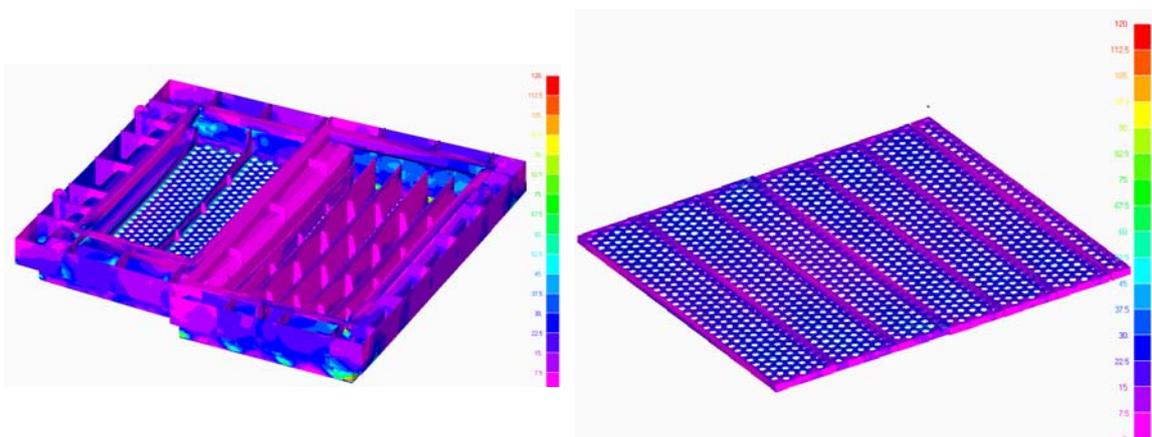


Figura D34: Modelo 6. Tensión 1
Tensión de Von Mises (MPa)



a) Tolvas

b) cajón de retorno

Figura D35: Modelo 6. Tensión 2

Como último análisis se realizó el índice de tensión de fluencia para un valor de 30.000 h. Se puede ver que el unificar el material también es una ayuda a la hora de disminuir la posibilidad de que aparezca el fenómeno de fluencia.

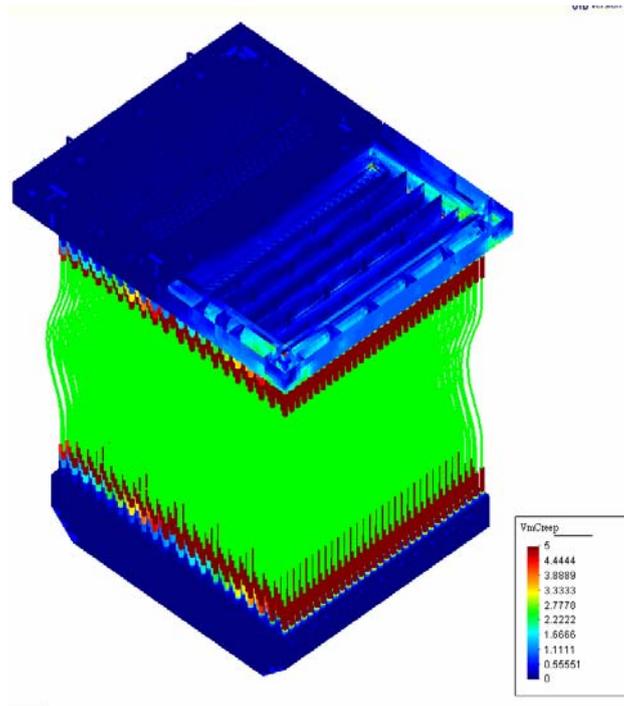


Figura D36: Modelo 6.I.T.F.-1

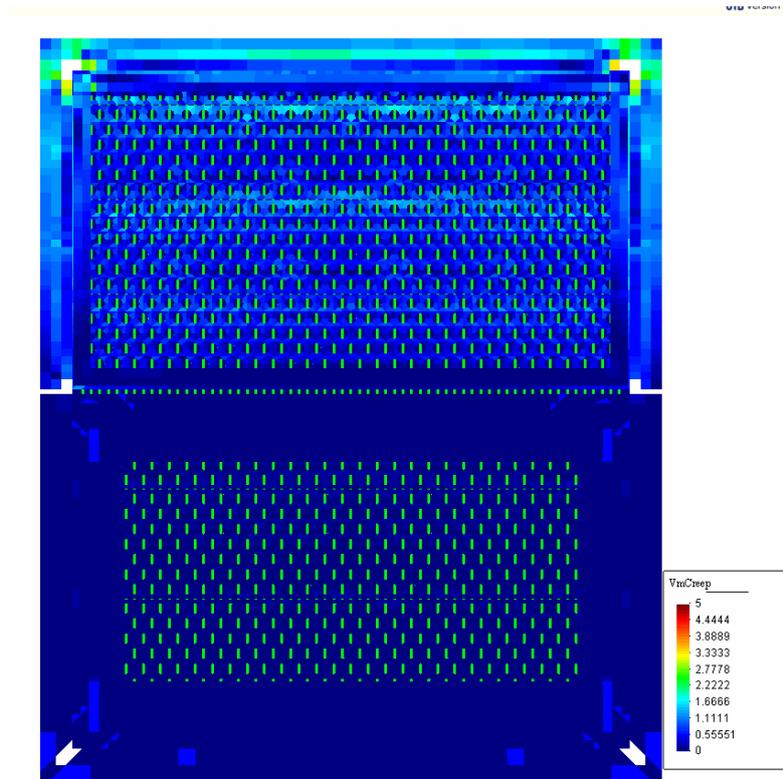


Figura D37: Modelo 6.I.T.F.-2

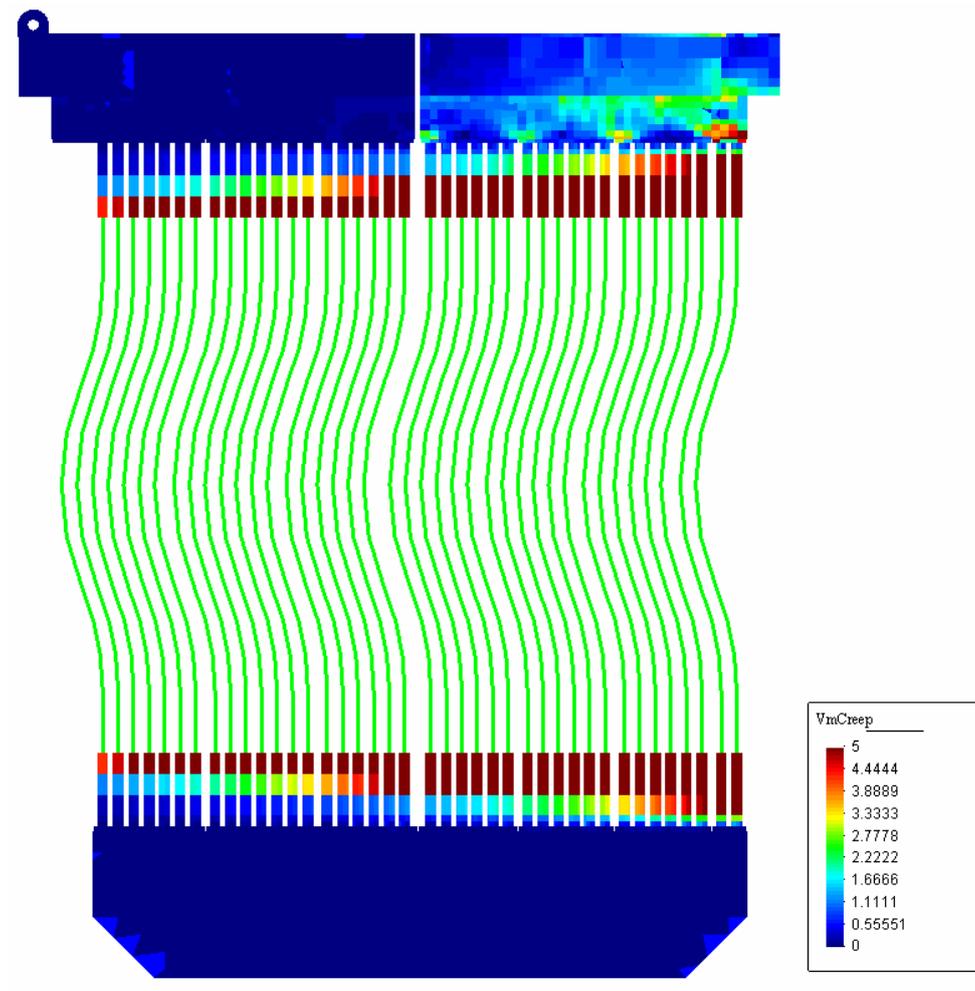


Figura D38: Modelo 6.I.T.F.-3

Anexo E: Fotos de rotura del modelo real

En este anexo se muestran las fotos de roturas de distintas partes del modelo real.



Figura E.1: Rotura en esquina tolva de salida



Figura E.2: Tolva de salida, tubos-1



Figura E.3: Primera hilera de tubos



Figura E.4: Tolva de salida, tubos-2



Figura E.5: Tolva de salida, tubos-3

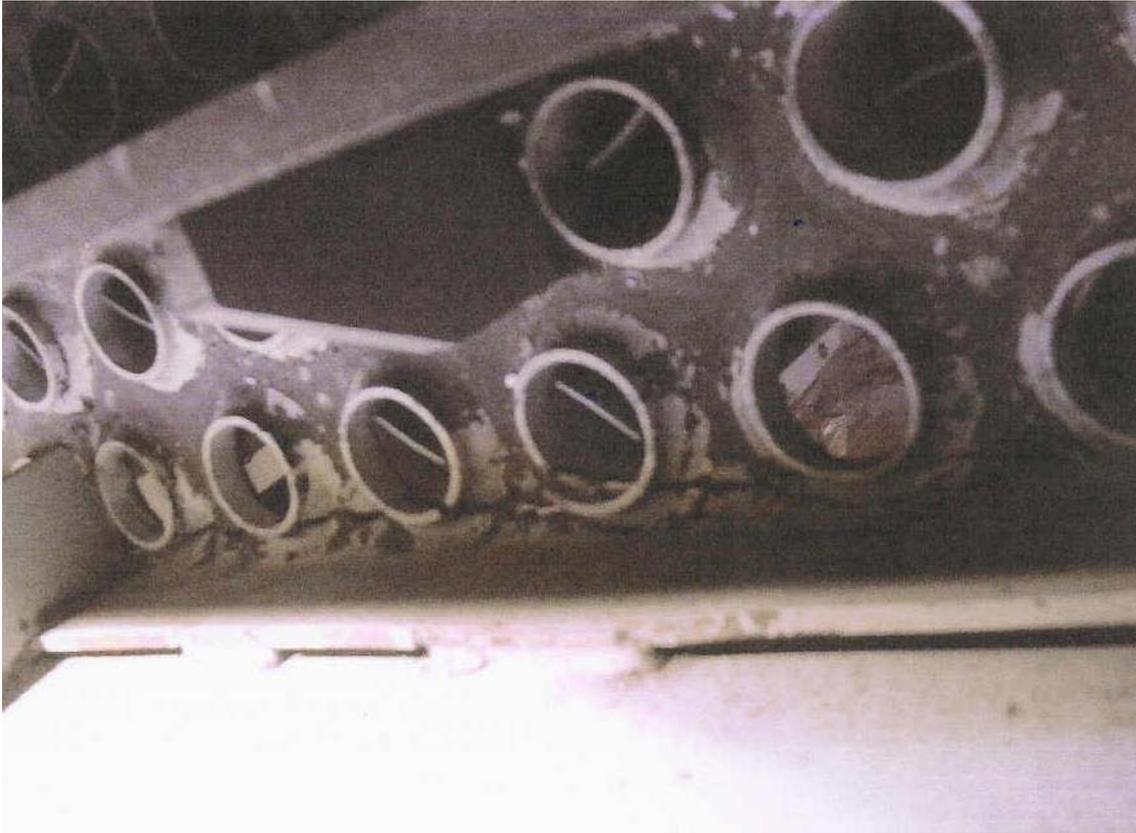


Figura E.6: Tolva de salida, tubos-4

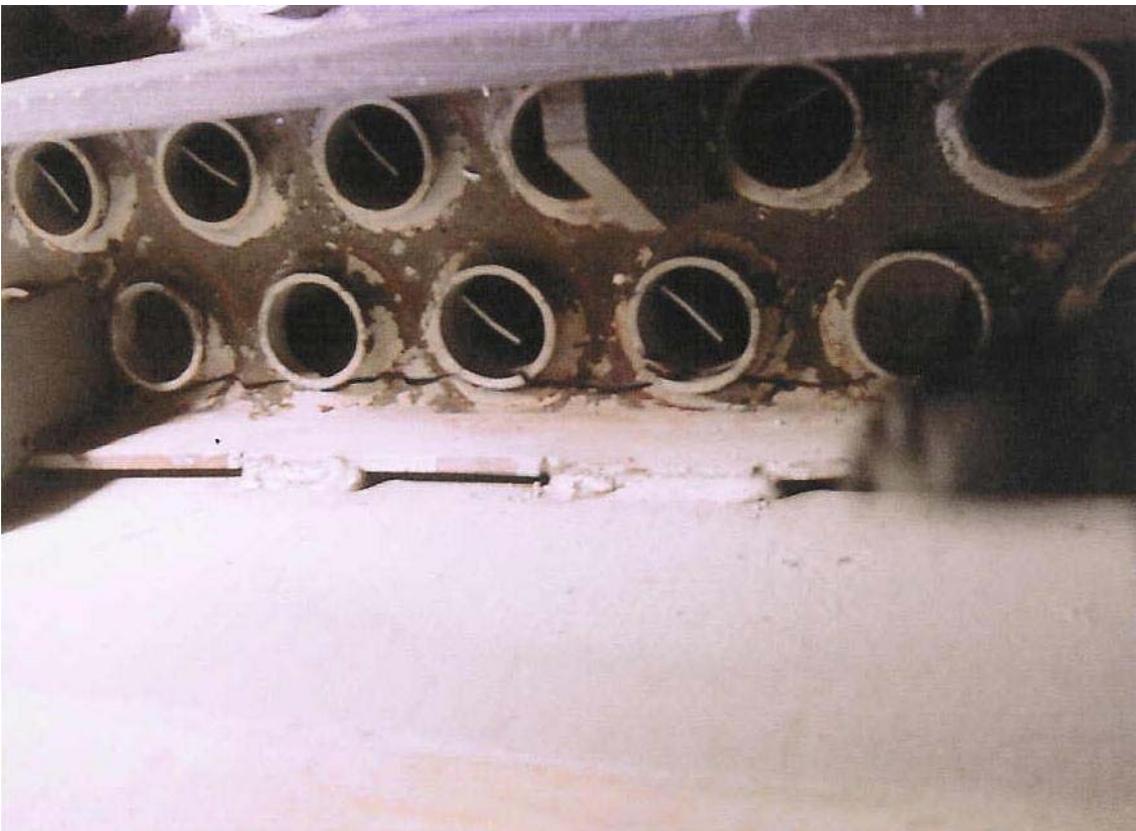


Figura E.7: Tolva de salida, tubos-5

Anexo F: Determinación de I.T.F.

En este anexo se muestra el proceso seguido para comparar la tensión equivalente de Von Mises con la de fluencia del material al que llamaremos I.T.F. (índice de tensión de fluencia), será calculado del siguiente modo.

$$\text{I.T.F.}(t) = \frac{\sigma_{VonMises}^j}{\sigma_{fluencia}^j(T, t, material)} \quad 0 \leq \text{I.T.F.} \leq 1$$

$j = 1, \dots, N$ ($N = n^\circ$ elementos) Material = Material 1, ..., Material 6
t; tiempo T; Temperatura

Lo primero será fijar para que número de horas queremos calcular I.T.F., pues esta expresión es dependiente del tiempo.

La tensión de Von Mises será obtenida del post proceso del programa, recordemos que esta tensión ha sido obtenida teniendo en cuenta la temperatura que tiene cada elemento (el coeficiente de dilatación térmica y el módulo elástico del material dependen de la temperatura y para cada material ambos parámetros son diferentes).

El cálculo de I.T.F. ha sido realizado siguiendo el algoritmo de la figura F.1.

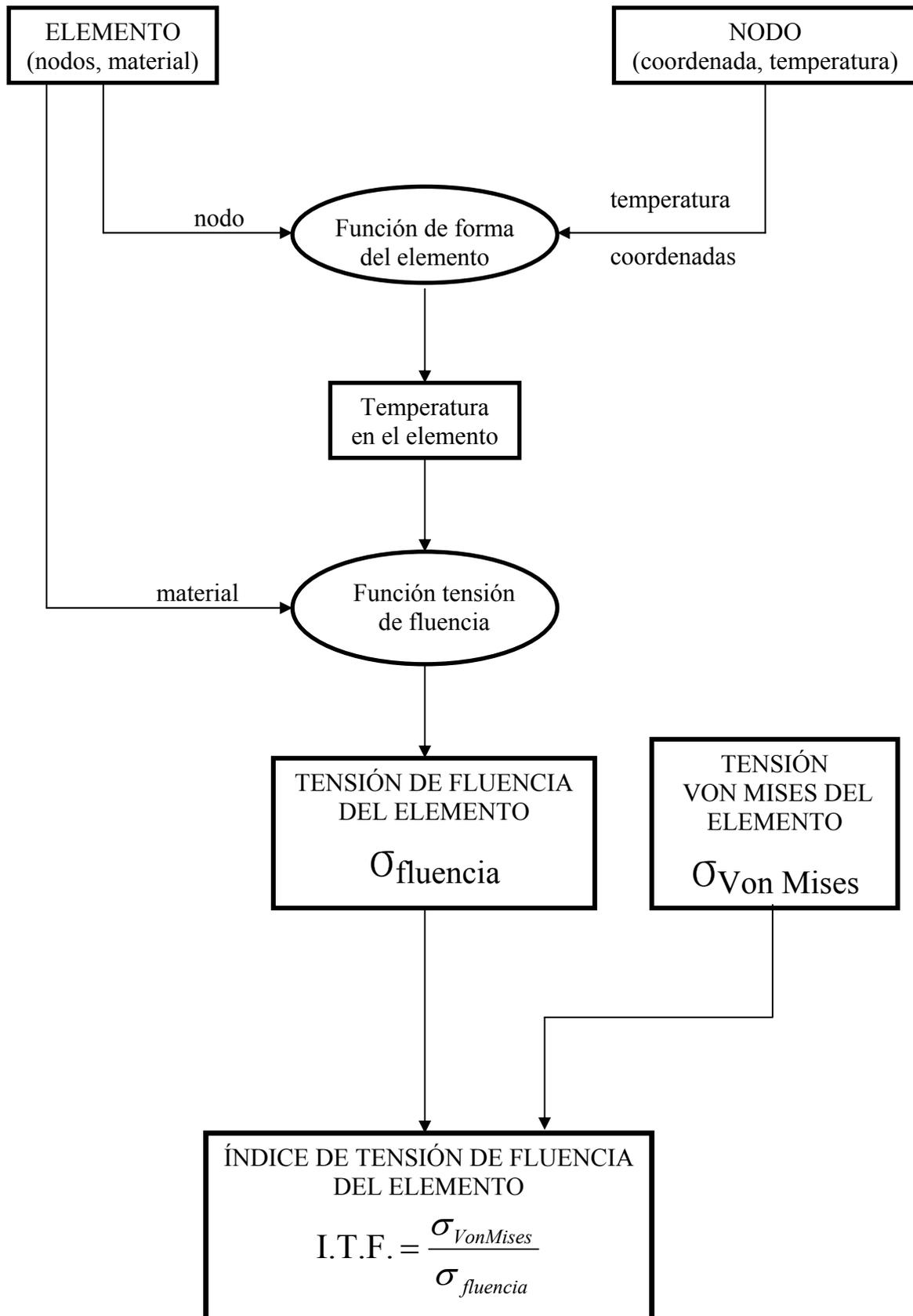


Figura F.1: Esquema de cálculo de I.T.F.

Para ello se ha partido del módulo de post-proceso de NX NASTRAN, obteniendo:

- Listado de elementos; con sus nodos y materiales.
- Listado de nodos; con sus coordenadas y temperaturas.
- Listado la tensión de Von Mises en cada elemento.

Después se ha realizado el algoritmo de la figura F.1. en lenguaje FORTRAN, obteniendo como resultado el Índice de Tensión de Fluencia para cada elemento. Los resultados obtenidos se han representado en el siguiente programa GID, versión 7.2, creado por el CIMNE (Internacional Center for Numerical Methods in Engeenering), mostrando la malla con el mapa de colores del I.T.F.

Bibliografía

- METALS HANDBOOK; Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Vol.1
- DISEÑO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA. Joseph E. Shigley.