

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Civil

Cálculo de Placas de Anclaje mediante MEF

Autor: Carlos Moreno Martínez

Tutor: Luis Rodríguez de Tembleque Solano

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Cálculo de Placas de Anclaje mediante MEF

Autor:

Carlos Moreno Martínez

Tutor:

Luis Rodríguez de Tembleque Solano

Profesor Contratado Doctor

Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Grado: Cálculo de Placas de Anclaje mediante MEF

Autor: Carlos Moreno Martínez

Tutor: Luis Rodríguez de Tembleque Solano

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Rm rdarvosñ s yo, Nñsmvs, wir qr jsd svqazsfp rm tpf s rdys ytsbrdos. Ysqnorm s qod vppaszrtpd fr digtomormyp, Grsm, Kismqs, Shidyom y Ñsts, eot qr jsm sapsufp rm yfp qpqrmyp asts trñoxst qo htsm trqpmysfs, dom bpdpytpd mp jsnros apfopf. También a mi profesor, Luis, que me ha apoyado, guiado y animado para conseguir este resultado. Rñ trdyp fr artdpmsd wir dr wiortsm fst apt shtsfrvofsd, wir mp dr rmhszrm, dpñp jsm dofp im rdyptnp.

Carlos Moreno Martínez

Sevilla, 2017

Agradecimientos	I
Índice	II
Índice de Figuras	IV
Notación	VII
1 Introducción	- 1 -
1.1.- <i>Objeto y motivación</i>	- 1 -
1.2.- <i>Organización del documento</i>	- 1 -
2 Cálculo de Placas de Anclaje según Normativa	- 2 -
2.1.- <i>Resumen de la normativa</i>	- 2 -
2.1.1 Comprobación de las dimensiones en planta de la placa	- 3 -
2.1.2 Comprobación del espesor suficiente de la placa	- 3 -
2.2 <i>Ejemplo. Perfil HEB</i>	- 4 -
2.2.1 Datos	- 4 -
2.2.2 Resolución	- 4 -
2.2.3 Observaciones	- 5 -
3 Cálculo de Placas de Anclaje mediante MEF	- 6 -
3.1 <i>Aplicación de las hipótesis de la normativa al MEF</i>	- 6 -
3.1.1 Geometría	- 6 -
3.1.2 Tipo de Elemento	- 7 -
3.1.3 Materiales	- 8 -
3.1.4 Mallado	- 9 -
3.1.5 Aplicación de cargas y condiciones de contorno	- 10 -
3.1.6 Extracción de resultados	- 11 -
3.1.7 Comparativa de resultados	- 13 -
3.2.- <i>Aplicación del problema de contacto a la placa de anclaje</i>	- 14 -
3.2.1 Geometría	- 14 -
3.2.2 Tipos de Elementos	- 14 -
3.2.3 Clase de Contacto	- 15 -
3.2.4 Materiales	- 16 -
3.2.5 Mallado	- 16 -
3.2.6 Aplicación de cargas y condiciones de contorno	- 18 -
3.2.7 Extracción de resultados	- 20 -
3.2.8 Comparativa de resultados	- 27 -
4 Ejemplo de Aplicación: Perfiles Tubulares Circulares	- 28 -
4.1 <i>Descripción del problema</i>	- 28 -
4.2 <i>Datos de la placa de anclaje</i>	- 28 -
4.3 <i>Cálculo de la placa de anclaje mediante MEF</i>	- 28 -
4.3.1 Geometría	- 28 -
4.3.2 Tipo de Elemento	- 29 -

4.3.3	Clase de contacto	- 29 -
4.3.4	Materiales	- 29 -
4.3.5	Mallado	- 30 -
4.3.6	Aplicación de cargas y condiciones de contorno	- 30 -
4.3.7	Extracción de resultados	- 32 -
4.3.8	Comparativa de resultados	- 38 -
4.4	<i>Método analítico propuesto</i>	- 41 -
5	Resumen y Conclusiones	- 43 -
5.1.	<i>Cálculo de placas de anclaje según Normativa</i>	- 43 -
5.2.	<i>Cálculo de placas de anclaje mediante MEF</i>	- 43 -
5.3.	<i>Cálculo de placas de anclaje con perfiles tubulares</i>	- 44 -
6	Trabajos Futuros	- 45 -
7	Referencias	- 46 -
8	Anexos	- 47 -
7.1	<i>Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material lineal, con contacto</i>	- 47 -
7.2	<i>Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material lineal, sin contacto</i>	- 58 -
7.3	<i>Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material no lineal, con contacto</i>	- 63 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema de cargas y geometría de una placa de anclaje genérica	- 3 -
Figura 2-2 Geometría y parámetros de cálculo de una placa de anclaje con perfil HEB	- 4 -
Figura 2-3 Esquema de cargas y reacciones en una placa de anclaje	- 5 -
Figura 3-1 Geometría genérica para el cálculo de placas de anclaje con perfiles HEB, IPE o cuadrados	- 6 -
Figura 3-2 Geometría 3D realizada con los datos del ejemplo anterior	- 7 -
Figura 3-3 Elemento SOLID 186, formas, nodos y grados de libertad.	- 7 -
Figura 3-4 Curva de comportamiento del acero teórica según EAE	- 8 -
Figura 3-5 Curva de comportamiento del acero S-235JR incluida en ANSYS	- 8 -
Figura 3-6 Mallado de la placa base utilizando un mallado MultiZone de 3mm.	- 9 -
Figura 3-7 Distribución de momentos sobre la parte superior del perfil HEB	- 10 -
Figura 3-8 Ecuaciones de ligadura aplicadas al modelizado	- 10 -
Figura 3-9 Condiciones de contorno asignadas. Izq: Desplazamientos impedidos en superficie. Dcha: desplazamientos impedidos en línea	- 11 -
Figura 3-10 Solución de la deformada de la placa base del modelizado 1. Arriba: vista 3D. Debajo: vista en planta	- 11 -
Figura 3-11 Solución de tensiones de la placa base del modelizado 1. Arriba: vista superior. Debajo: vista inferior	- 12 -
Figura 3-12 Reacciones en la zona de compresiones del hormigón y de los pernos, respectivamente	- 13 -
Figura 3-13 Geometría 3D	- 14 -
Figura 3-14 Esquema de contacto	- 15 -
Figura 3-15 Implementación del modelo elastoplástico perfecto al acero S235-JR	- 16 -
Figura 3-16 Aplicación de división de bordes sobre los detalles circulares	- 16 -
Figura 3-17 Mallado final	- 17 -
Figura 3-18 Aplicación de división al espesor de la placa de anclaje	- 17 -
Figura 3-19 Sección y zoom para una mejor apreciación del mallado	- 18 -
Figura 3-20 Aplicación de momentos en la parte superior del perfil HEB	- 18 -
Figura 3-21 Ecuaciones de ligadura creadas al aplicar un momento en la parte superior	- 19 -
Figura 3-22 Condiciones de contorno de desplazamientos sobre la placa de anclaje	- 19 -
Figura 3-23 Deformada 3D de la placa base y soporte, vista superior	- 20 -
Figura 3-24 Deformada 3D de la placa base, vista inferior	- 20 -
Figura 3-25 Distribución de tensiones sobre la placa base, vista 3D	- 21 -
Figura 3-26 Detalle de tensiones sobre la placa base, anotados los puntos de tensión máxima	- 21 -

Figura 3-27 Sección vertical de la placa a través del punto de máxima tensión, vista 3D	- 22 -
Figura 3-28 Sección vertical de la placa a través del punto de máxima tensión, alzado	- 22 -
Figura 3-29 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=0\text{mm}$	- 23 -
Figura 3-30 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=1.5\text{mm}$	- 23 -
Figura 3-31 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=3\text{mm}$	- 24 -
Figura 3-32 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=4.5\text{mm}$	- 24 -
Figura 3-33 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=6\text{mm}$	- 25 -
Figura 3-34 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=3\text{mm}$, con anotaciones sobre la tensión	- 25 -
Figura 3-35 Reacciones en las condiciones de contorno de desplazamiento en la placa base, junto a su valor	- 26 -
Figura 3-36 Situación del contacto. "Sliding" = deslizando, "Near" = cerca	- 26 -
Figura 3-37 Presión de contacto en la interfaz placa base-soporte	- 27 -
Figura 4-1 Geometría del modelizado con perfil tubular	- 29 -
Figura 4-2 Mallado resultante del modelizado 3	- 30 -
Figura 4-3 Aplicación de momento de diseño a la parte superior del perfil circular	- 30 -
Figura 4-4 Ecuaciones de ligadura obtenidas al aplicar momento en la superficie superior	- 31 -
Figura 4-5 Condiciones de contorno de desplazamiento nulo en las arandelas de la placa de anclaje	- 31 -
Figura 4-6 Deformada obtenida tras solucionar, factor de escala aplicado: 21, vista en planta	- 32 -
Figura 4-7 Deformada obtenida tras solucionar, factor de escala aplicado: 21, vista 3D	- 32 -
Figura 4-8 Tensiones de la estructura ensayada, vista 3D	- 33 -
Figura 4-9 Tensiones de la estructura ensayada, vista superior	- 33 -
Figura 4-10 Tensiones de la estructura ensayada, vista inferior	- 34 -
Figura 4-11 Tensiones evaluadas en los puntos críticos	- 34 -
Figura 4-12 Sección vertical sobre los puntos de tensión máxima	- 35 -
Figura 4-13 Sección horizontal, a una profundidad $h=2.5\text{mm}$ del espesor de la placa	- 35 -
Figura 4-14 Sección horizontal, a una profundidad $h=3.5\text{mm}$ del espesor de la placa	- 36 -
Figura 4-15 Valores de las reacciones	- 36 -
Figura 4-16 Estado del contacto	- 37 -
Figura 4-17 Presión de contacto	- 37 -
Figura 4-18 Comparación de los contactos del modelizado 2 y 3	- 38 -
Figura 4-19 Superposición de imágenes de estado de contacto y presión de contacto del modelizado 2	- 39 -
Figura 4-20 Superposición de imágenes de estado de contacto y presión de contacto del modelizado 3	- 39 -
Figura 4-21 Hipótesis de relación geométrica entre el perfil circular y la distribución de las presiones de contacto	- 40 -
Figura 4-22 Esquema de cargas	- 41 -

NOTACIÓN

c	Zona portante de la placa de anclaje
t	Espesor de la placa de anclaje
f_y	Límite elástico del acero
f_{jd}	Resistencia máxima del hormigón
γ_{m0}	Coefficiente de reducción de resistencia del material
N_{ed}	Axil de diseño
M_{ed}	Momento flector de diseño
a, a', b, b', g	Características geométricas de la placa
h_c	Canto del perfil anclado
Z	Reacción en los pernos
x	Zona de compresión bajo la placa
$M_{ed(1)}$	Momento flector de diseño provocado por "Z"
$M_{ed(2)}$	Momento flector de diseño debido a la zona de compresiones
$M_{pl,Rd}$	Momento plástico resistente de la sección

1 INTRODUCCIÓN

1.1.- Objeto y motivación

La carrera hacia el aprovechamiento máximo de los materiales es una tendencia que es creciente en la sociedad actual. Hoy en día, debido a las circunstancias económicas, es imprescindible hacer cálculos precisos, para poder obtener la seguridad que buscamos en las estructuras al coste más bajo. En este punto, las normativas entran en juego, cumpliendo un papel fundamental en la disposición de las herramientas de cálculo para que todos nosotros, los ingenieros, podamos ejercer nuestra actividad profesional, sintiéndonos respaldados por un ente que guíe nuestras decisiones.

No obstante, hay ciertos momentos en los que nos encontramos con un reto, con algo a lo que no nos hemos enfrentado antes, y además la normativa no deja muy claro qué decisiones tomar.

Este proyecto surge del vacío existente en la norma acerca del cálculo de placas de anclaje que conectan perfiles tubulares. ¿Hasta dónde llegan las compresiones debidas al contacto? ¿Es suficiente considerar el perfil tubular circular, como un perfil tubular cuadrado equivalente, que circunscribe al tubular circular? Encontraremos las respuestas en este documento, haciendo una reflexión y una propuesta de incorporación a la norma de los resultados obtenidos.

En base a los estudios numéricos realizados, se propone una nueva metodología de cálculo para el caso de placas de anclaje con perfiles tubulares circulares.

1.2.- Organización del documento

Este documento se organiza en los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Acercamiento a la materia desde un punto de vista teórico, basándonos en la normativa actual vigente en Europa para el cálculo de las placas de anclaje, el *Eurocódigo 3*, en adelante, [1], implementado también en el *Código Técnico de la Edificación* [2]. Además, se realiza un ejemplo de aplicación de la normativa para afianzar los conocimientos y tomarlo como base de los resultados que deberían obtenerse siguiendo el método de los elementos finitos.

Capítulo 3. Modelización de la placa de anclaje del ejercicio realizado en el Capítulo 2, utilizando diferentes estrategias de modelización. Realizaremos un proceso en cascada subiendo el nivel de complejidad en cada modelizado. Se inicia con un modelizado de placa de anclaje donde se considera únicamente la zona de apoyos obtenida de manera teórica siguiendo [1], seguido de una comparativa con el resultado obtenido en ANSYS®. El siguiente escalón es implementar el problema de contacto al modelizado del apartado anterior, dotando de libertad a la placa de anclaje de contactar con la superficie rígida situada en la base. Además, se desarrolla una comparativa con los resultados obtenidos siguiendo la norma.

Capítulo 4. Modelización de una placa de anclaje en la que el perfil soldado es un perfil tubular. Siguiendo los conocimientos obtenidos en los apartados anteriores, se propone abordar el problema inicial del proyecto con el método de los elementos finitos.

Por último, en los anexos se presentan los códigos utilizados para generar el modelizado de placas de anclaje incluyendo no linealidades en los materiales y el contacto, para implementarlos en ANSYS Mechanical APDL

2 CÁLCULO DE PLACAS DE ANCLAJE SEGÚN NORMATIVA

2.1.- Resumen de la normativa

Trataremos en este documento la metodología de cálculo que propone [2], que es análogo al propuesto por la normativa europea [1]. Según esta normativa, los esfuerzos que se transmiten a la cimentación sólo se transmiten en una zona alrededor del perfil, la zona portante, cuya anchura a partir del perfil tiene el valor "c".

La expresión para calcular el valor de "c" es:

$$c = t \left(\frac{f_y}{3f_{jd}\gamma_{m0}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

Donde:

t : Espesor de la placa de anclaje

f_y : Límite elástico del acero de la placa

f_{jd} : Resistencia máxima del hormigón.

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{ck}$$

Donde:

β_j : es un coeficiente que puede tomarse igual a 2/3 si el mortero de nivelación situado entre la placa y el hormigón de la cimentación tiene una resistencia al menos igual a $0.2f_{ck}$ y un espesor no mayor a 0.2 veces la menor dimensión de la placa.

$$k_j = \sqrt{\frac{a_1 b_1}{ab}} \leq 5 \text{ Siendo } a_1, b_1 \text{ las dimensiones del soporte y } a, b \text{ las de la placa}$$

f_{ck} : resistencia del hormigón a compresión

γ_{m0} : Coeficiente de disminución de resistencia de los materiales

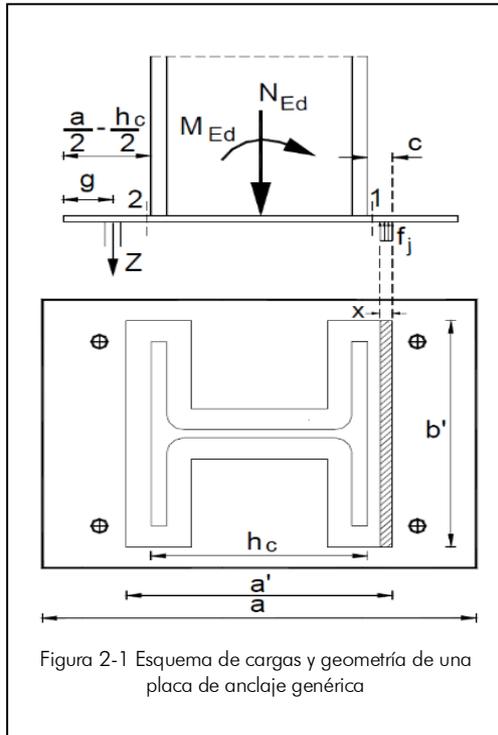
Como podemos observar, si estamos en un proceso de dimensionamiento, el cálculo de las placas de anclaje será iterativo, ya que el valor del semiancho del área portante "C" depende del espesor de la placa utilizado.

Una vez se ha calculado el área portante, se procede a la comprobación de la placa de anclaje.

Se verá el caso general de placas de anclaje sometidas a flexocompresión.

2.1.1 Comprobación de las dimensiones en planta de la placa

Se debe comprobar que la resultante de compresiones en la cara inferior de la placa no supere a la resistencia de cálculo del hormigón. Para poder comprobar este caso en flexocompresión tenemos que recurrir a las ecuaciones de equilibrio, a partir de las cargas y dimensiones que se detallan en la figura 2-1:



Al no existir cargas con componente horizontal, nos basta con la ecuación de equilibrio de fuerzas verticales y la ecuación de equilibrio de momentos. Cabe destacar que, en este punto, la comprobación se vuelve bidimensional.

Ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F = 0 \rightarrow N_{ed} + Z - x \cdot b' \cdot f_{jd} = 0 \quad (2-2)$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_{ed} + N_{ed} \left(\frac{a}{2} - g \right) - x \cdot b' \cdot f_{jd} \left(\frac{a'}{2} - \frac{x}{2} + \frac{a}{2} - g \right) = 0 \quad (2-3)$$

De estas dos ecuaciones se despejan los valores de "x", el valor de la zona estimada de transmisión de compresión de la placa de anclaje al hormigón, y Z, el valor de la fuerza realizada por el anclaje a tracción.

La comprobación radica en evaluar si $x < (t + 2 \cdot c)$.

Si el valor de x es menor, las dimensiones en planta son admisibles.

2.1.2 Comprobación del espesor suficiente de la placa

Se comprueba que el momento flector producido en las secciones que se muestran en la figura inferior no superan el momento resistente plástico de la placa.

Hipótesis:

Para la comprobación del momento resistente, se considera a la placa como un voladizo equivalente de espesor 1mm, empotrado en el borde del perfil anclado a la placa.

Siendo así, tendríamos dos momentos de diseño, el primero, producido por la reacción de los anclajes "Z" y el producido por la resultante de compresiones en el hormigón.

De tal forma:

$$M_{ed(1)} = f_{jd} \cdot b' \cdot x \cdot \left(c - \frac{x}{2} \right) \quad (2-4)$$

$$M_{ed(2)} = Z \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{h_c}{2} - g \right) \quad (2-5)$$

El máximo flector obtenido de las dos ecuaciones anteriores se compara con el momento resistente plástico

de la sección de $1\text{mm}\cdot t$.

$$M_{pl,Rd} = \frac{t^2 \cdot f_y}{4\gamma_{m0}} \quad (2-6)$$

Si éste es menor que el momento resistente plástico obtenido por la expresión anterior, el espesor de la placa de anclaje es suficiente.

Cumpléndose las condiciones explicadas con anterioridad, el cálculo expuesto es válido para cualquier clase de perfil anclado en la placa base.

2.2 Ejemplo. Perfil HEB

2.2.1 Datos

Geométricos:

Dimensiones de la placa: $300 \times 300 \times 6\text{mm}$

Perfil HEB 140: $h_c = 140\text{mm}$

Distancia de los pernos al borde (g) = 42.5mm

Materiales:

Hormigón HA-25

Acero S-235JR

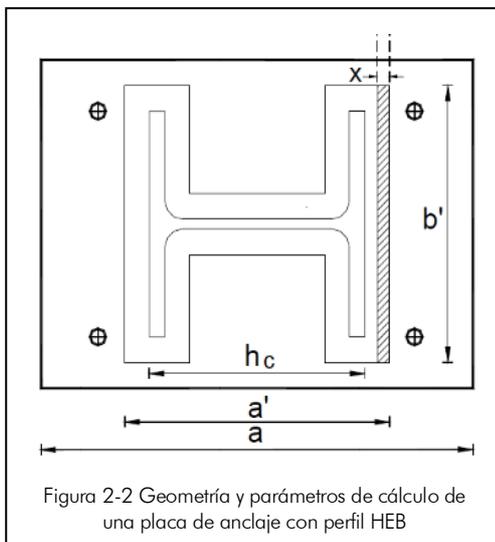
Cargas:

$N_{ed} = 0\text{ kN}$

$M_{ed} = 3.85\text{ kN/m}$

2.2.2 Resolución

Paso 0. Obtención de dimensiones restantes y resistencias de los materiales:



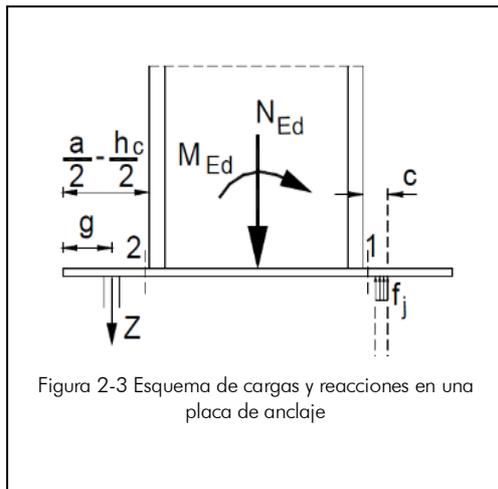
$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{ck} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{600^2}{300^2}} \cdot \frac{25}{1.5} = 23.81\text{MPa}$$

$$c = t \left(\frac{f_y}{3f_{jd}\gamma_{m0}} \right)^{\frac{1}{2}} = 6 \cdot \left(\frac{235/1.05}{3 \cdot 23.81} \right)^{\frac{1}{2}} = 10.62\text{mm}$$

Calculamos las dimensiones del área portante, a' y b'

$$a' = b' = h_c + 2c = 140 + 2 \cdot 10.62 = 161.24\text{mm}$$

Paso 1. Planteamos las ecuaciones de equilibrio



$$\sum F = 0 \rightarrow N_{ed} + Z - x \cdot b' \cdot f_{jd} = 0; Z = x \cdot 161.24 \cdot 23.81$$

$$\sum M_z = 0 = M_{ed} + N_{ed} \left(\frac{a}{2} - g \right) - x \cdot b' \cdot f_{jd} \left(\frac{a'}{2} - \frac{x}{2} + \frac{a}{2} - g \right)$$

$$3.85 \cdot 10^6 - x \cdot 161.24 \cdot 23.81 \left(\frac{161.24}{2} - \frac{x}{2} + \frac{300}{2} - 42.5 \right) = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$x = 5.408 \text{ mm}$$

$$Z = 20764.15 \text{ N}$$

Paso 2.- Comprobación de las dimensiones de la placa

$$x < (t + 2 \cdot c); 5.408 \text{ mm} \leq 27.24 \text{ mm} \rightarrow \text{Cumple}$$

Paso 3.- Comprobación del espesor suficiente de la placa

$$M_{ed(1)} = f_{jd} \cdot b' \cdot x \cdot \left(c - \frac{x}{2} \right) = 23.81 \cdot 161.24 \cdot 5.408 \cdot \left(10.62 - \frac{5.408}{2} \right) = 164351.87 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$M_{ed(2)} = Z \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{h_c}{2} - g \right) = 20764.15 \cdot \left(\frac{300}{2} - \frac{140}{2} - 42.5 \right) = 778655 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{t^2 \cdot f_y}{4 \gamma_{m0}} = \frac{6^2 \cdot 235000}{4 \cdot 1.05} = 2014285.714 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

En vista de los resultados, las dimensiones de la placa **son suficientes** para resistir las cargas actuantes.

2.2.3 Observaciones

Como podemos comprobar al haber seguido este ejemplo, en ningún momento se menciona el espesor de las alas ni del alma del perfil HEB. Haciendo un ejercicio mental, si cambiásemos un perfil HEB por un perfil tubular cuadrado, la solución siguiendo este método no cambiaría, ya que sólo estamos considerando la importancia en el borde del perfil. Sin embargo, en un perfil circular, ¿hasta dónde tomamos "x"? La respuesta es que no tenemos certeza, pudiendo incurrir en incoherencia o en hipótesis inválidas.

3 CÁLCULO DE PLACAS DE ANCLAJE MEDIANTE MEF

3.1 Aplicación de las hipótesis de la normativa al MEF

En una primera instancia, se realizará un modelizado sencillo, en adelante “modelizado 1”, acorde a las hipótesis generadas por la normativa. Incluiremos pues, en este modelizado, la zona de tracciones “Z” correspondiente a los anclajes y la zona de presión del hormigón “x”.

Para ello, necesitamos generar una geometría que nos permita aplicar dichas hipótesis. Por tanto, nuestra geometría debe tener una zona bajo la placa que simule la zona de presiones, calculada a partir del ejercicio del apartado 2.2, y una línea dispuesta a una distancia “g”, de manera que podamos aplicar la restricción de movimientos que provocan los pernos sobre la placa.

3.1.1 Geometría

Utilizando la herramienta ANSYS Spaceclaim® construimos una placa base estándar, que nos pueda servir de apoyo para elaborar varias placas base con perfiles distintos si lo necesitáramos.

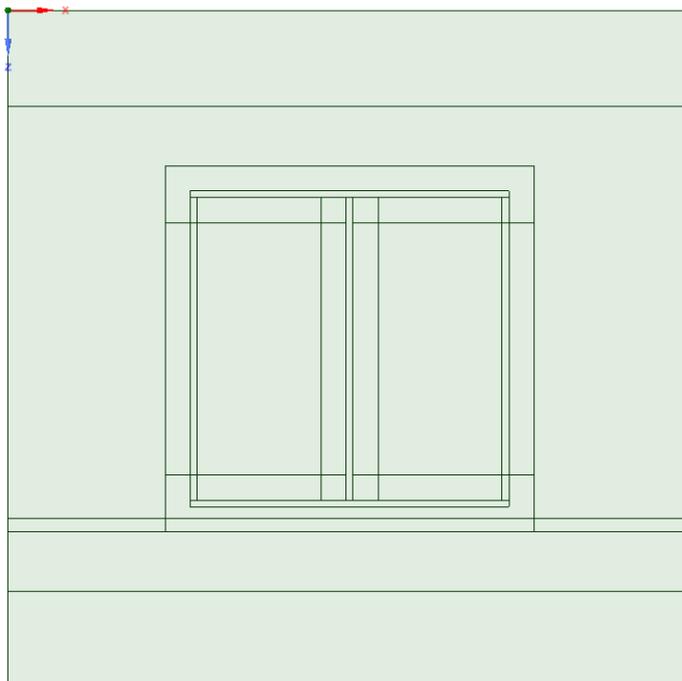


Figura 3-1 Geometría genérica para el cálculo de placas de anclaje con perfiles HEB, IPE o cuadrados

En este plano de planta podemos distinguir su uso para perfiles HEB, IPE, y tubulares cuadrados, así como la zona de compresiones "x" y la zona de tracciones "Z".

Particularizando para el ejemplo del perfil HEB, extruimos la geometría deseada y el resto se une, para dar lugar a un perfil HEB con una placa base de 6mm de espesor.

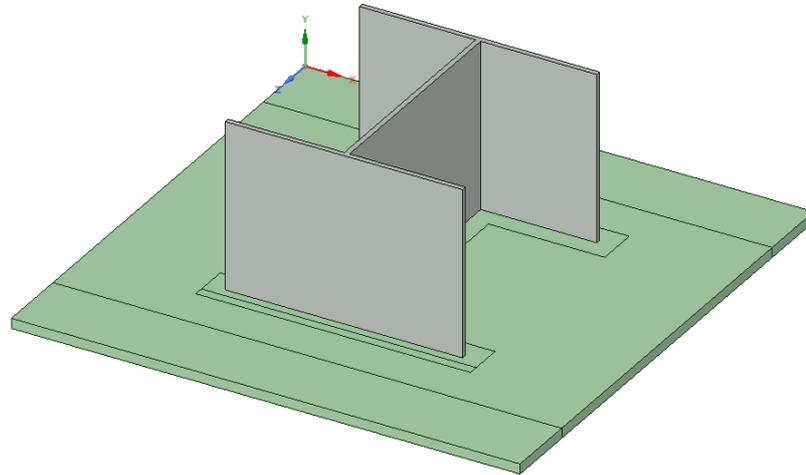


Figura 3-2 Geometría 3D realizada con los datos del ejemplo anterior

3.1.2 Tipo de Elemento

El tipo de elemento que nos proporciona la mayor fiabilidad para este estudio debido a sus características es el elemento tipo Brick, que en ANSYS corresponde al elemento SOLID186. Este tipo de elemento ofrece 20 nodos, en cada uno de ellos con tres grados de libertad.

Las ventajas que ofrece este tipo de elemento radican en que permite el análisis elastoplástico y se adecua bien a las geometrías complejas, porque puede ser con forma tetraédrica u hexaédrica.

Además, nos permite evaluar la variación de tensiones que se produce en el interior de la placa con exactitud, creando más de un elemento en el espesor de la misma, lo que no se puede conseguir con elementos tipo placa generalizados como los SHELL181.

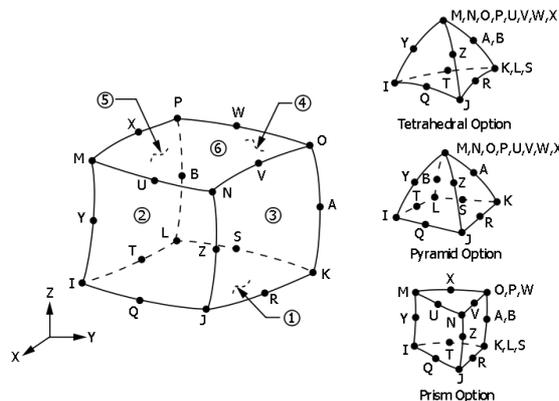


Figura 3-3 Elemento SOLID 186, formas, nodos y grados de libertad.

3.1.3 Materiales

El material utilizado para realizar este estudio es el acero S-235JR.

La ley de comportamiento escogida es bilineal, por una razón, estamos haciendo un análisis de comprobación de resistencia, por lo que previsiblemente estaremos en una zona cercana al límite elástico.

La normativa referente al acero estructural en España, la EAE, dice así:

“En esta instrucción se utilizará el diagrama tensión deformación bilineal, con segunda rama horizontal, si bien, en el caso de análisis no lineal puede utilizarse como alternativa el diagrama tensión-deformación bilineal, con segunda rama inclinada”

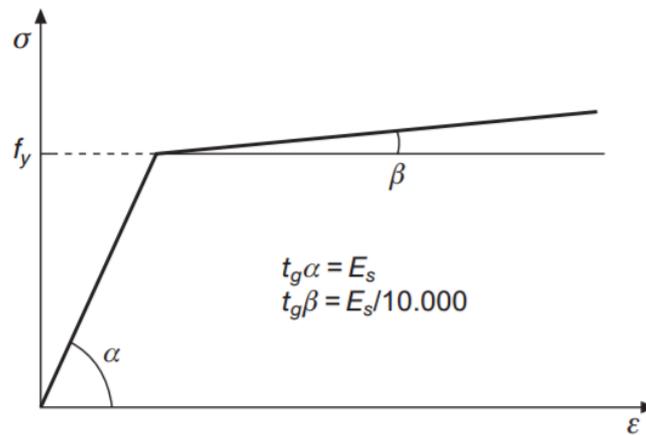


Figura 3-4 Curva de comportamiento del acero teórica según EAE

Además, en la gráfica que acompaña a la indicación, se da información sobre el módulo tangente que habría que considerar en caso de realizar el análisis elastoplástico con la segunda rama inclinada:

El módulo tangente será, como máximo el 10% del módulo de Young, “E”.

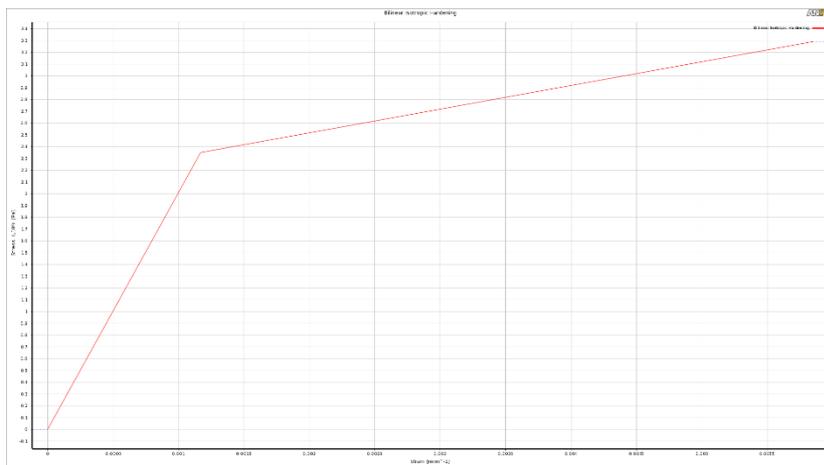


Figura 3-5 Curva de comportamiento del acero S-235JR incluida en ANSYS

3.1.4 Mallado

El mallado es la parte más importante de cualquier modelizado, un mallado con elementos demasiado agudos puede conducir a concentración de tensiones en la solución final, a resultados inexactos o a la no convergencia de la solución.

Para ser precisos a la hora de mallar, hemos escogido un tamaño de elemento acorde a la geometría, de 3mm tamaño máximo por cara y elemento, mínimo 1 mm.

El método de mallado elegido es el "Multizone", este tipo de mallado, cuando nuestra geometría 3D tiene ángulos de 90° o menores, además de sólidos complejos, es el adecuado, ya que separa zonas automáticamente y realiza un mallado que se adapta reduciendo el tamaño en las zonas más problemáticas, además de conectar todos los sólidos que estén compartiendo topología colocando un único nodo en la interfaz entre éstos.

Añadimos otra condición más, la división del espesor en 2 utilizando un "Edge Sizing" en las cuatro esquinas de la placa.

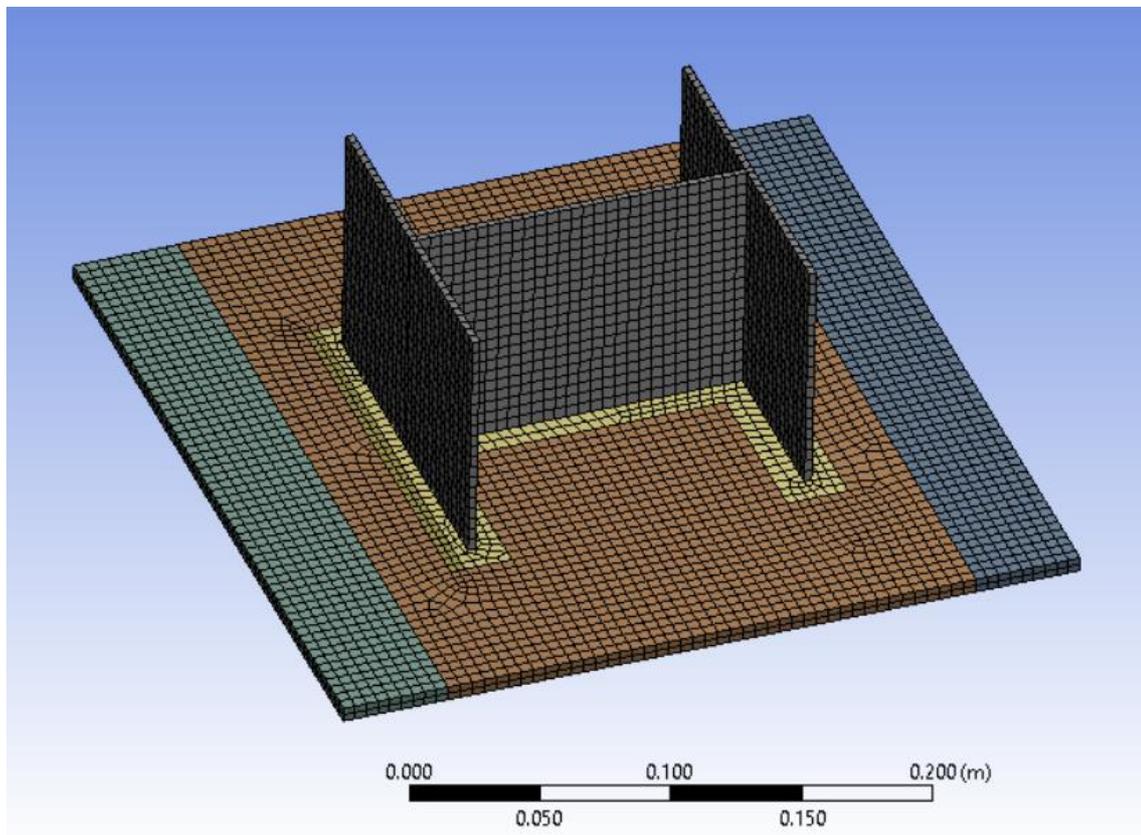


Figura 3-6 Mallado de la placa base utilizando un mallado MultiZone de 3mm.

3.1.5 Aplicación de cargas y condiciones de contorno

El objetivo de este modelizado es aplicar las hipótesis de la normativa para poder realizar la comprobación de la placa. Por tanto, debemos adecuar las cargas y las condiciones de contorno para que sea fiel al ejemplo 1.

Paso 1) Aplicar cargas

Aplicaremos un $M_{ed} = 3.85\text{kN/m}$ sobre la parte superior de la sección.

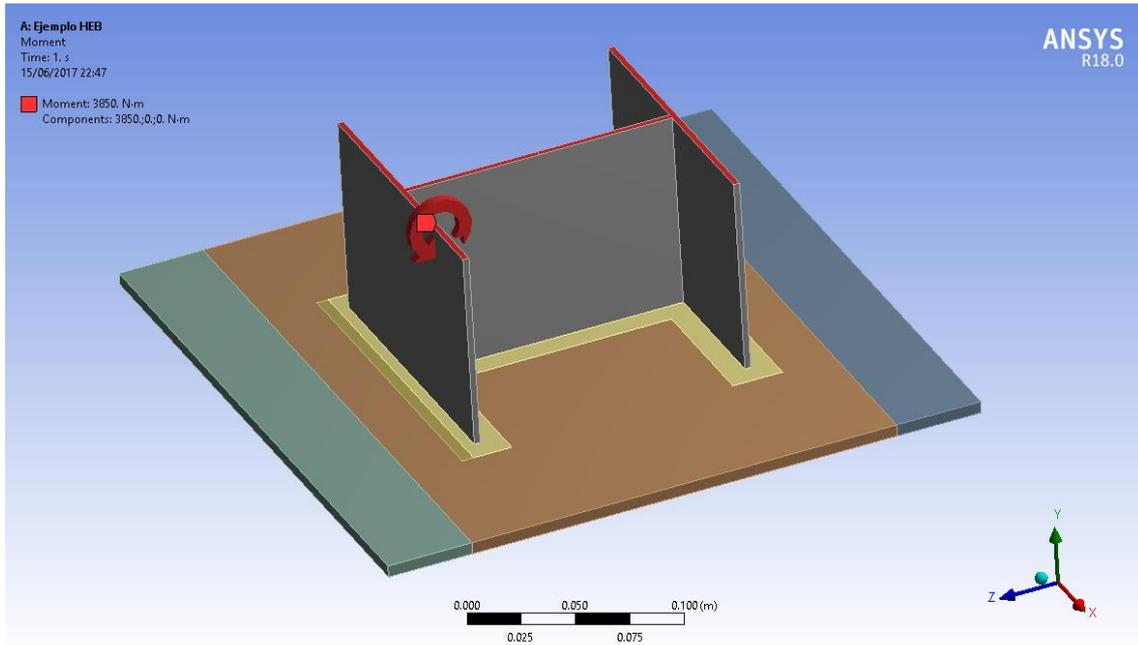


Figura 3-7 Distribución de momentos sobre la parte superior del perfil HEB

Todos los nodos se encuentran acoplados al nodo central del plano superior. En la imagen no se ve con claridad si el momento que aplica es distribuido, por lo que se comprueba enseñando por pantalla las ecuaciones de ligadura aplicadas al modelizado:

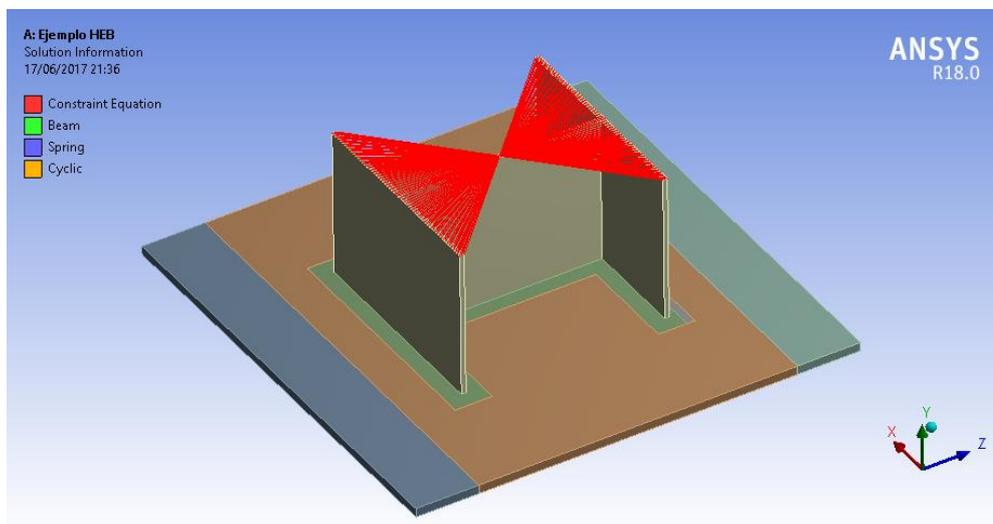


Figura 3-8 Ecuaciones de ligadura aplicadas al modelizado

Paso 2) Condiciones de contorno

Para poder evaluar el valor de la fuerza "Z" y la presión en la zona "x" que hace que el sistema esté en equilibrio (sería análogo a resolver las ecuaciones de equilibrio), impedimos los desplazamientos en los puntos creados específicamente para esta finalidad. En la parte de contacto entre el acero de la placa base, impedimos los desplazamientos en superficie, y en la línea de pernos impedimos desplazamientos en línea.

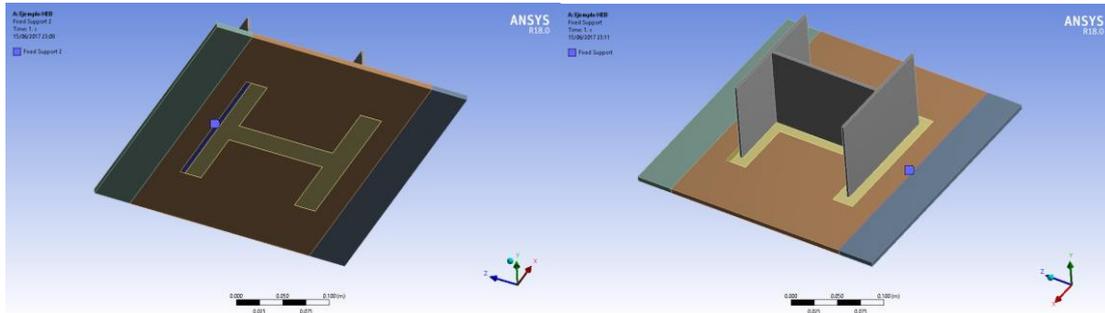


Figura 3-9 Condiciones de contorno asignadas. Izq: Desplazamientos impedidos en superficie. Dcha: desplazamientos impedidos en línea

3.1.6 Extracción de resultados

Deformada

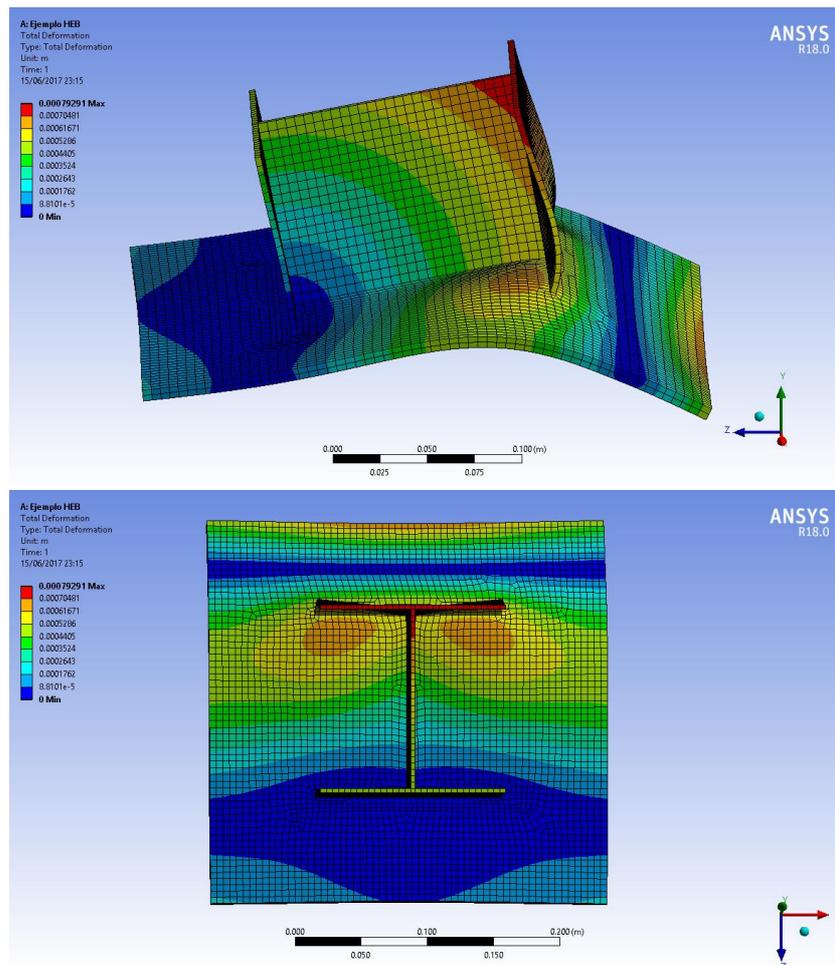


Figura 3-10 Solución de la deformada de la placa base del modelizado 1. Arriba: vista 3D. Debajo: vista en planta

La deformada no se encuentra de interés para este apartado, sólo para una valoración cualitativa del

resultado obtenido. Las zonas con desplazamiento 0 son las que tienen condiciones de contorno aplicadas. Debido a la aplicación del flector en el perfil, la parte derecha se encuentra levantada sobre la parte izquierda de la Figura 3-10 superior.

Tensiones

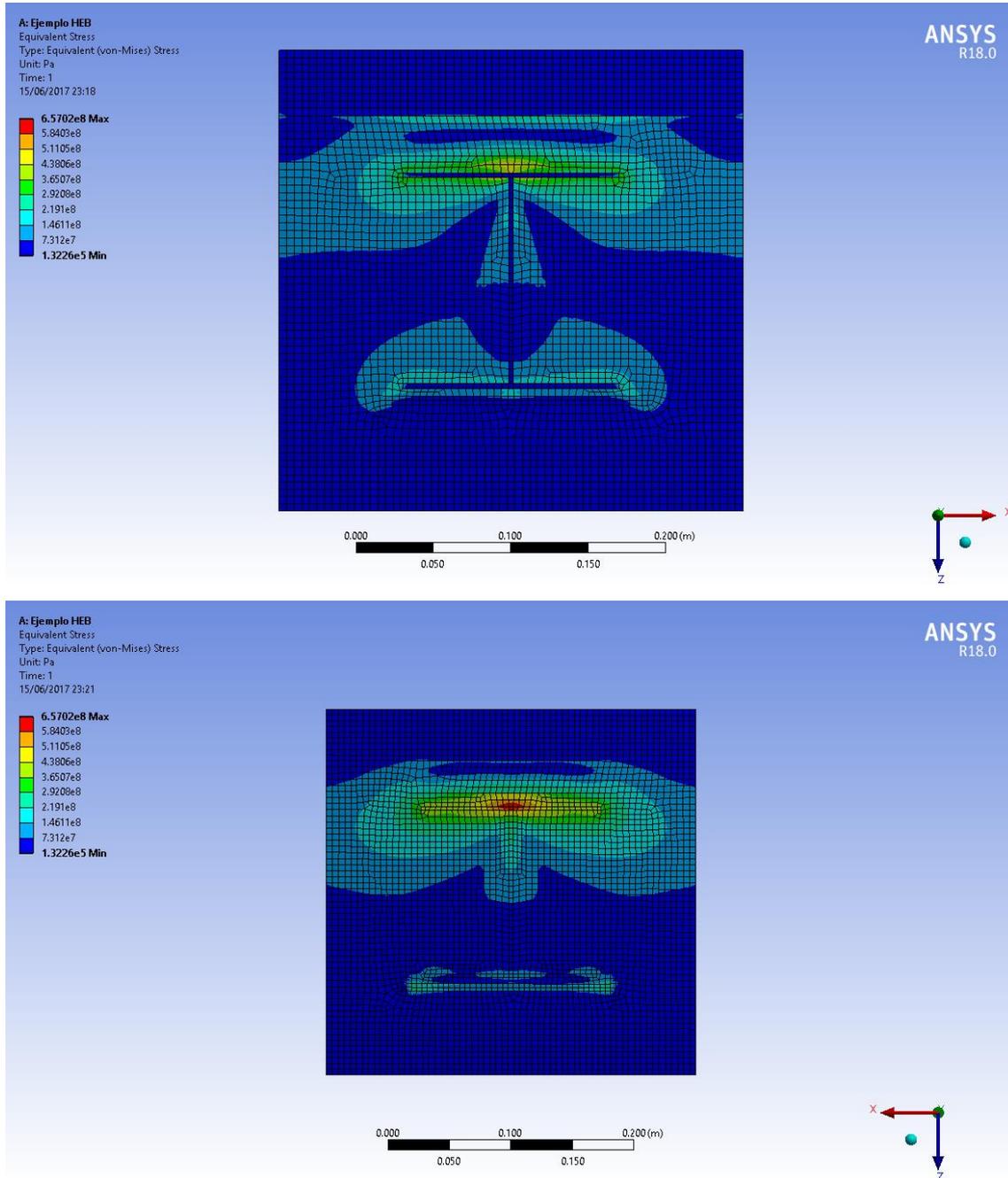


Figura 3-11 Solución de tensiones de la placa base del modelizado 1. Arriba: vista superior. Debajo: vista inferior

No es posible valorar cuantitativamente el resultado de las tensiones obtenidas, ya que, viendo la deformada anterior, estamos permitiendo una deformación que no se produciría si existiese un soporte de hormigón bajo la placa.

Sin embargo, la distribución de tensiones tiene la forma propuesta por [1] y [2] para la zona portante, en la que se distribuyen las tensiones por la placa de anclaje.

Reacciones

Como hemos fijado dos puntos, sin axil actuante, el valor de las reacciones debe ser simétrico:

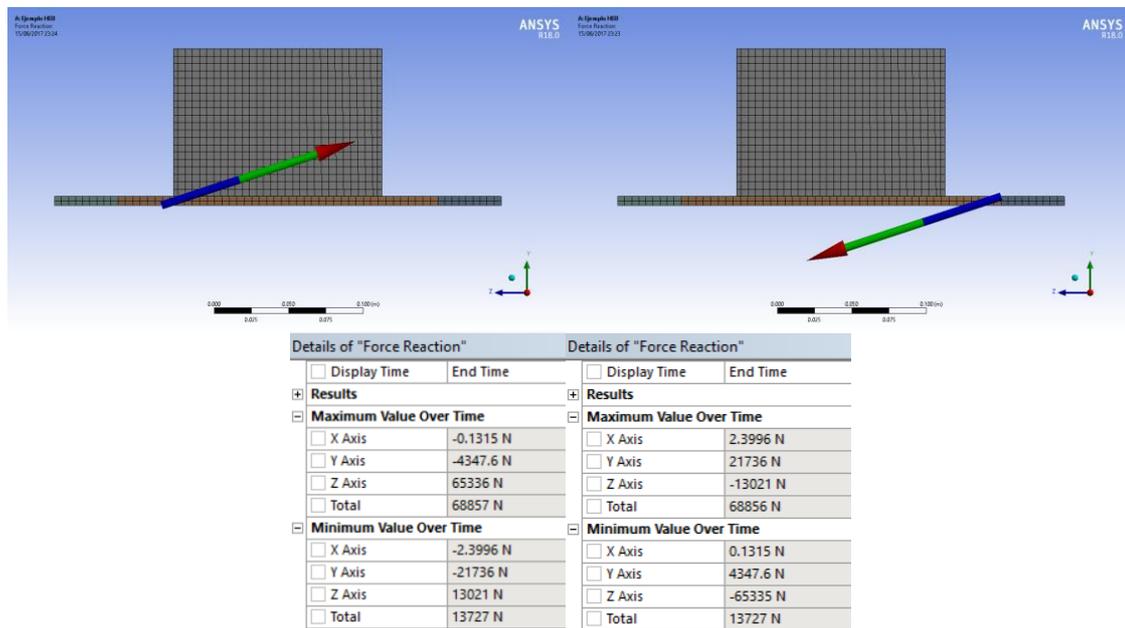


Figura 3-12 Reacciones en la zona de compresiones del hormigón y de los pernos, respectivamente

Al aplicar el momento según el eje x positivo, como era de esperar, se producen reacciones en dirección "Y" en sentido positivo en la zona de compresión y en la zona de tracción, la reacción en sentido contrario.

Aparecen componentes de reacción en el eje Z, debido a la condición de contorno de desplazamiento nulo en los puntos indicados con anterioridad, no obstante, esta reacción no es de valor para el análisis que estamos realizando.

La reacción vertical resulta: 21736N

3.1.7 Comparativa de resultados

La diferencia de resultados del MEF (modelizado 1) respecto a la normativa es de: $\frac{21655-20142}{20142} = 7.5\%$.

Limitaciones:

No tenemos certeza de que la zona de contacto se restrinja únicamente a la zona propuesta por la norma, ni tampoco estamos pudiendo evaluar la presión transmitida por la placa al hormigón, sólo imponemos que la tensión que resiste el hormigón es la máxima, desconociendo si el hormigón falla bajo la placa por transmitirse más presión que su f_{jd} .

Damos pie a hacer un cálculo más fino para determinar el espesor óptimo de la placa, con un modelizado en el que la complejidad radica en el problema de contacto.

Por estas razones, nace el modelizado 2.

3.2.- Aplicación del problema de contacto a la placa de anclaje

El diseño de las placas de anclaje es un problema puramente de contacto, por lo que, al no estar incluyendo este comportamiento en el MEF, estamos alejándonos demasiado de lo que sucede en la realidad.

En adelante, se referirá al modelizado con contacto como “modelizado 2”.

3.2.1 Geometría

Aprovechando la geometría del apartado 3.1, crearemos un sólido debajo de la placa de anclaje, que será el sólido con el que contactará la placa base.

El sólido creado es el representado en color tierra.

Como se puede ver, el perfil HEB tiene en este ejemplo las medidas estándar, con un ancho de alma de 7mm y un ancho de alas de 12mm.

Además, se le han incluido a la placa de anclaje dos nuevas zonas, delimitadas por una circunferencia de 40mm de diámetro, que emulan las arandelas que están en contacto con la placa y transmiten la fijación de los pernos a la misma.

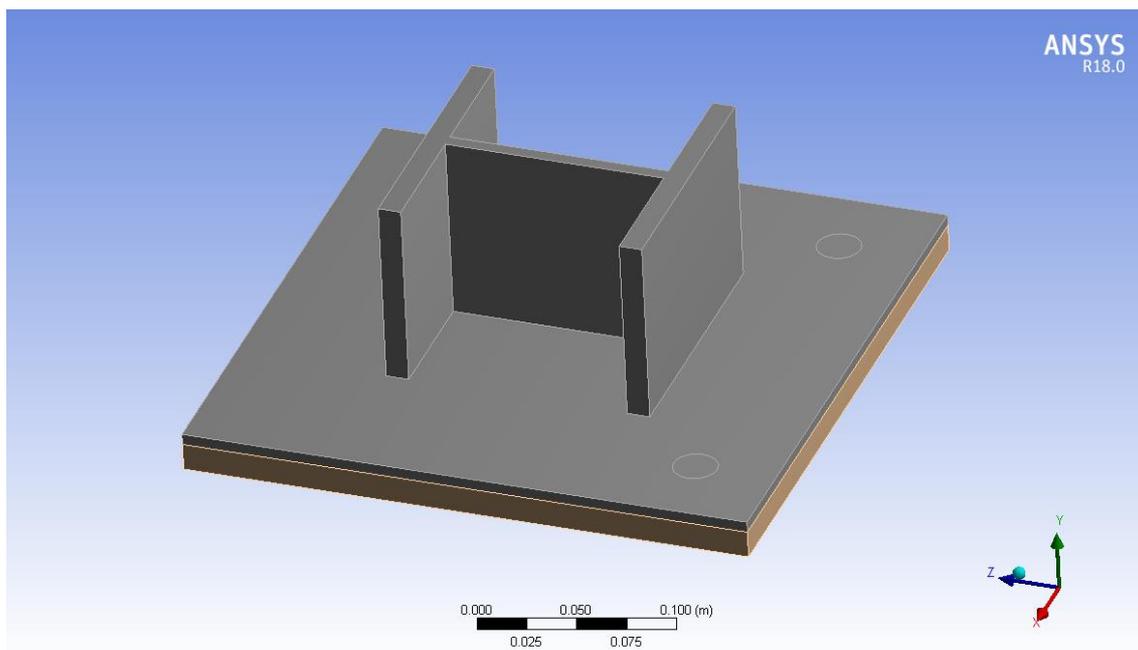


Figura 3-13 Geometría 3D

3.2.2 Tipos de Elementos

En el problema de contacto, utilizaremos el elemento SOLID186 para el mallado de los volúmenes, y para la zona de contacto, se utilizan los elementos CONTA174 y TARGE170.

Estos dos últimos son los que proporcionarán la relación entre la superficie de contacto y la superficie objetivo, por lo que es imprescindible asignar el elemento CONTA174 a la superficie que va a contactar,

es decir, la que sufre mayores desplazamientos (por lo general) y el elemento TARGE170 a la superficie que tiene que ser contactada, dicho de otra forma, la que no debe ser presumiblemente atravesada por el elemento móvil.

Nota: en casos en los que no está claro cuál de los dos elementos es el que contacta y viceversa, podemos activar la opción de que el contacto sea simétrico, por lo que ambas caras actúan como contacto y como objetivo para el sólido contiguo. El inconveniente de utilizar esta opción es el coste computacional que conlleva, ya que tiene que evaluar el contacto en dos pares de caras en vez de en un solo par.

3.2.3 Clase de Contacto

ANSYS® nos ofrece una gran variedad de tipos de contactos, desde los más simples, como el contacto de unión (Bonded) hasta los casos más complejos con fricción entre las dos caras de contacto.

El escogido para este punto 3.2 será el contacto sin fricción entre las dos caras, debido a que para el caso de estudio, la componente horizontal de la reacción obtenida del apartado anterior (2.4N) es 3 órdenes más pequeña que la componente vertical (21655N), además de que mientras más complejo sea el contacto, más probabilidades hay de que la solución no converja.

El contacto entre las dos caras podemos asignarlo manualmente en la pestaña de contacto, aunque escogiendo los parámetros de búsqueda automática de contacto, el propio programa detecta los contactos.

Como se ha comentado, el contacto asignado es "Frictionless" entre las dos caras que se ven a continuación:

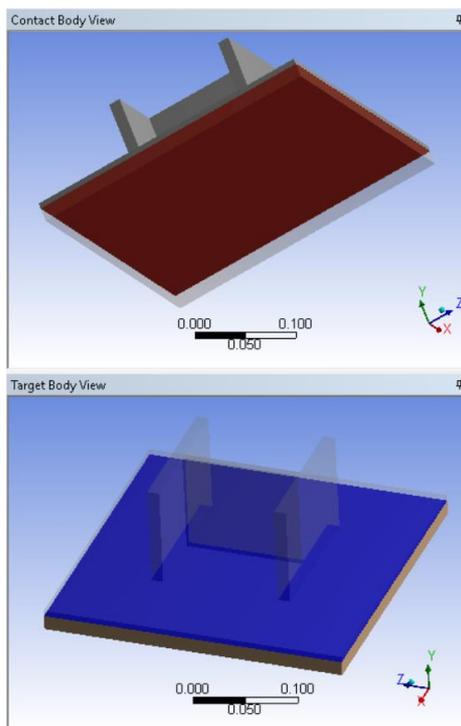


Figura 3-14 Esquema de contacto

Los parámetros que se le han asignado a este contacto, con los cuales hemos obtenido la convergencia de la solución son los siguientes:

El comportamiento del contacto es asimétrico.

La formulación con la que se calcula el contacto es "Pure Penalty". Es una función de aproximación que se guía por otros parámetros que la "Normal Lagrange", la explicación de su funcionamiento escapa del alcance de este trabajo, no obstante, es una buena opción a probar si la solución no converge con la función "Normal Lagrange" tradicional.

La rigidez del contacto se ha introducido manualmente, reduciéndola a 0.1. Con este parámetro estamos relajando la tolerancia del contacto, con lo que en alguna iteración de la solución el programa permite la penetración parcial del sólido de contacto. Los beneficios de reducir este parámetro es que la convergencia se alcanza de manera más rápida, pero perdemos robustez en el modelo, con lo que tendremos especial cuidado de chequear la solución por posible penetración en la solución final.

El resto de parámetros se han dejado controlados por el programa.

3.2.4 Materiales

Indeformable:

En un principio podríamos haber asignado al material situado bajo la placa base el comportamiento tipo indeformable, pero la rigidez del contacto que se formaba entre éste y la placa base, en situación deformable, hacía imposible la convergencia. Se recurre pues a hacer un material de tipo “deformable” pero con un módulo de elasticidad 5 órdenes mayor que la del acero para simular el sólido rígido.

Acero S-235JR:

Las tensiones obtenidas tras solucionar el modelizado actual son más altas que el límite elástico del material, por lo que se decide hacer un modelo elastoplástico perfecto para el acero, pudiendo así comparar los resultados con los de la norma y forzando así la redistribución plástica en la sección de la placa base.

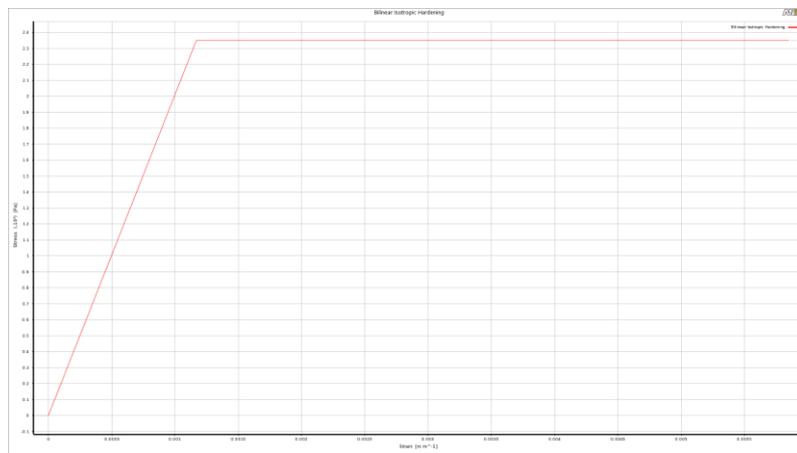


Figura 3-15 Implementación del modelo elastoplástico perfecto al acero S235-JR

3.2.5 Mallado

Se utiliza un mallado “MultiZone” al igual que en el apartado anterior.

Con el fin de ajustar el mallado a la forma circular de las arandelas, utilizamos un “Edge Sizing” de 10

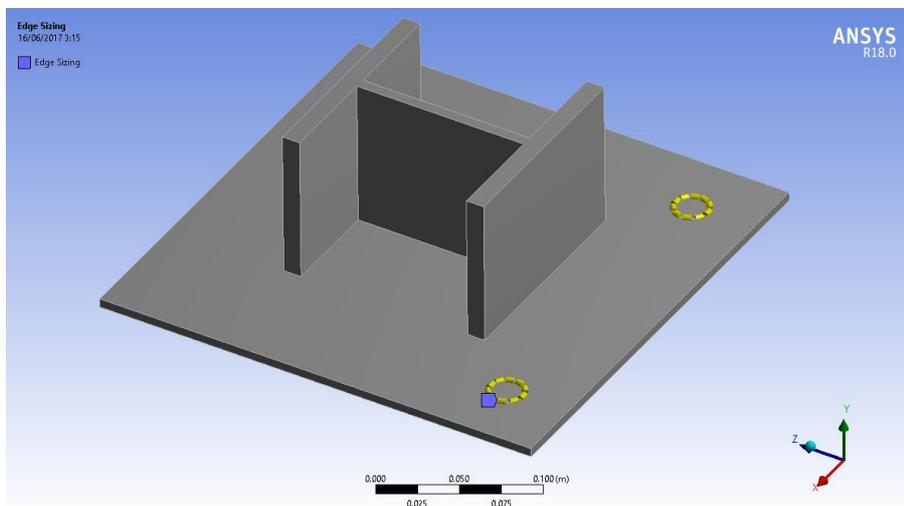


Figura 3-16 Aplicación de división de bordes sobre los detalles circulares

divisiones uniformes a lo largo de la circunferencia.

Para este apartado del proyecto se ha hecho un análisis de sensibilidad respecto al mallado. Se ha concluido lo siguiente:

- El tamaño de elemento no hace variar la solución en un grado notable
- El número de divisiones en el espesor de la placa condiciona enormemente la solución obtenida. Si colocamos un solo elemento en el espesor, la solución obtenida en mitad de la misma corresponde a la interpolación de los valores entre la zona de contacto y la parte superior de la placa, por lo que no es suficientemente precisa. Con dos divisiones la solución en el espesor es aceptable y la diferencia respecto a 4 divisiones no es demasiada. Ésta última es la escogida para dar el resultado final, no obstante, es recomendable ajustarse al número de elementos y nodos necesarios y suficientes como para dar una solución precisa, ya que podemos incurrir en modelizados que tarden horas en solucionarse siendo poco complejos.

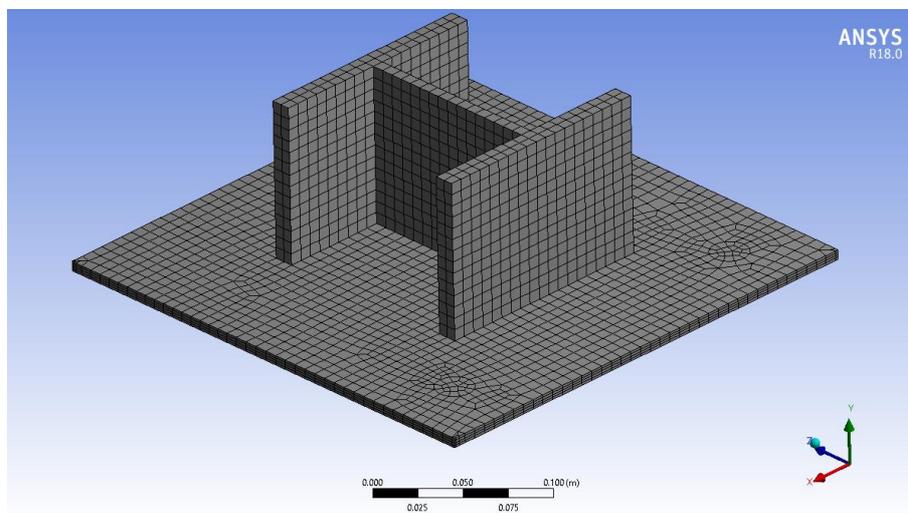


Figura 3-17 Mallado final

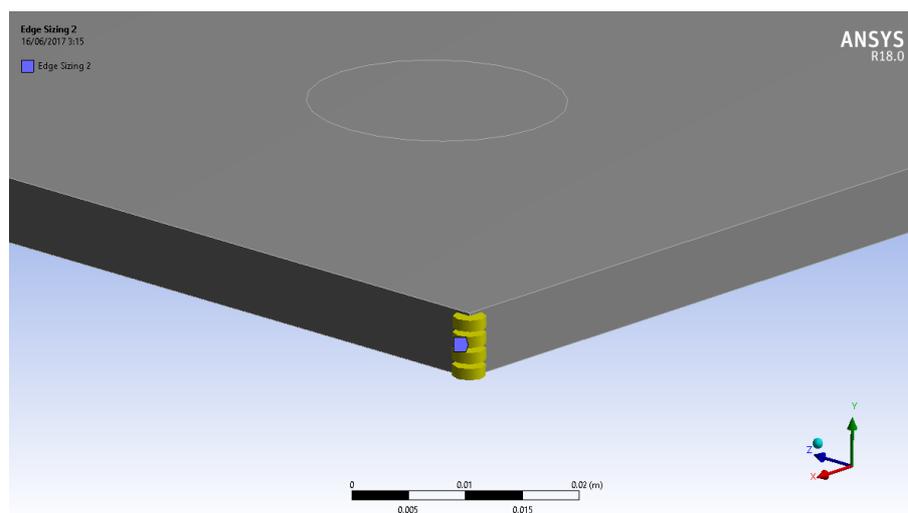


Figura 3-18 Aplicación de división al espesor de la placa de anclaje

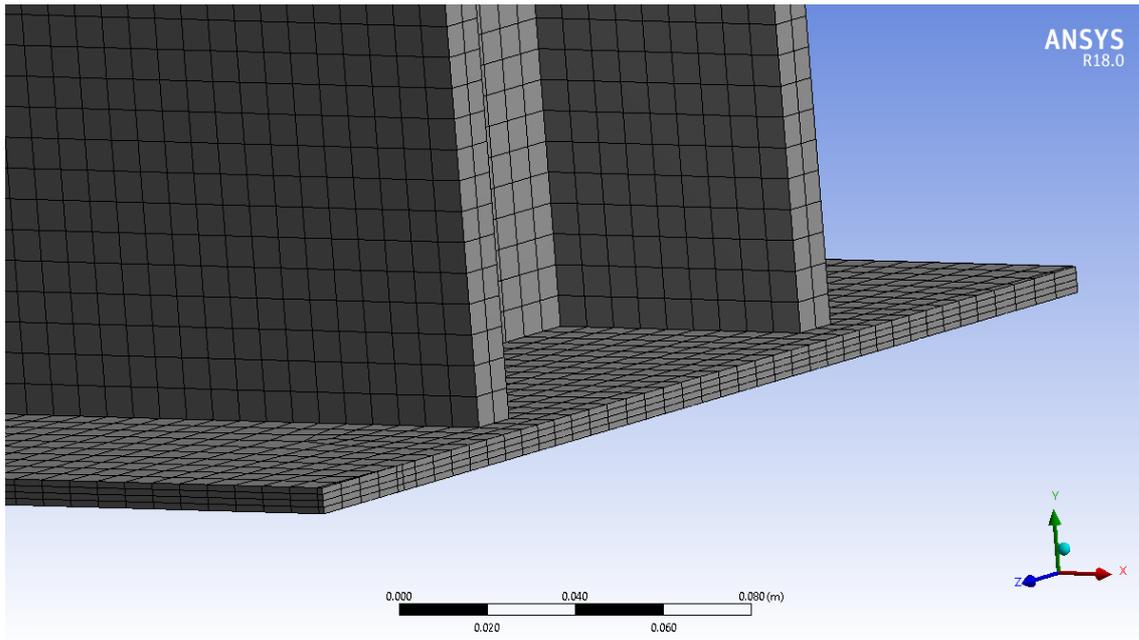


Figura 3-19 Sección y zoom para una mejor apreciación del mallado

El mallado obtenido aplicando las condiciones anteriores es de gran calidad, estructurado y robusto, lo que permitirá que la solución converja en pocas iteraciones.

3.2.6 Aplicación de cargas y condiciones de contorno

Paso 1) Aplicar cargas

Aplicaremos un $M_{ed} = 3.85\text{kN/m}$ sobre la parte superior de la sección.

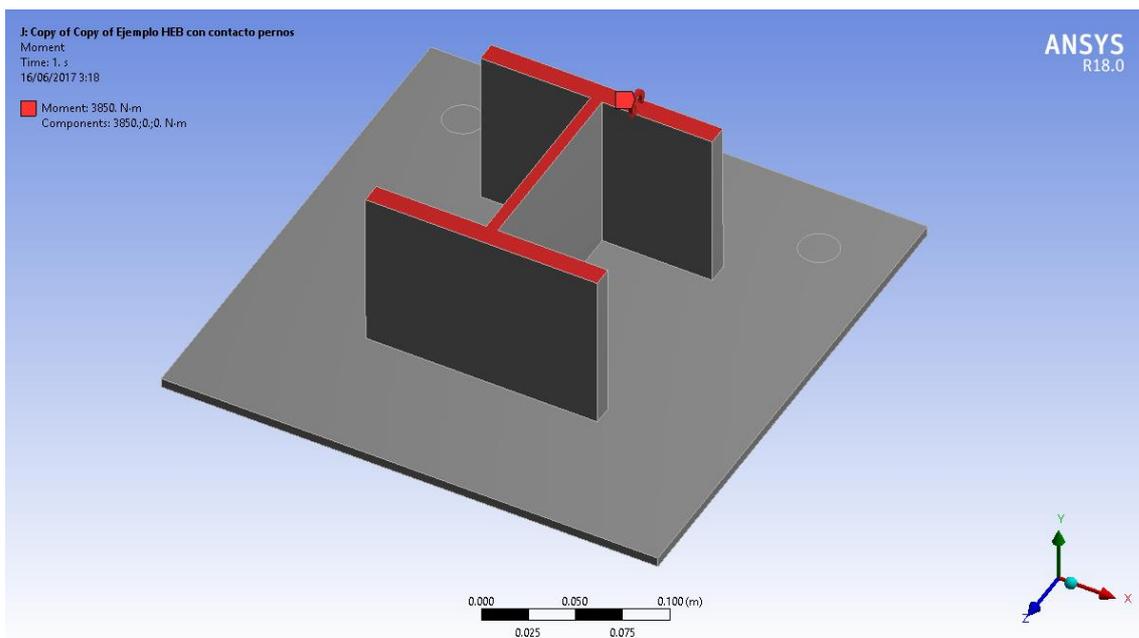


Figura 3-20 Aplicación de momentos en la parte superior del perfil HEB

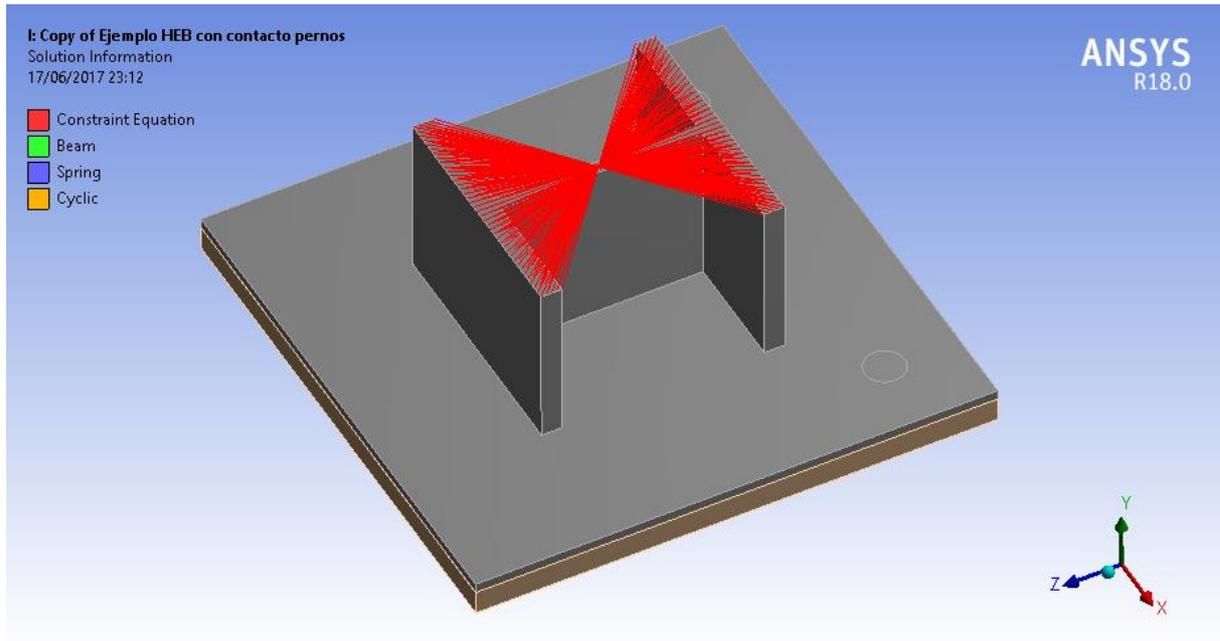


Figura 3-21 Ecuaciones de ligadura creadas al aplicar un momento en la parte superior

Se puede apreciar, de nuevo, que en la aplicación de momentos se está aplicando de manera uniforme a toda la sección superior del perfil, haciendo esclavos a todos los nodos que existen en dicha superficie al nodo maestro, que corresponde con el del centro de la sección.

Paso 2) Condiciones de contorno

En el problema de contacto, impedimos el desplazamiento y el giro en la base del sólido indeformable, así como los desplazamientos únicamente en la superficie de la arandela.

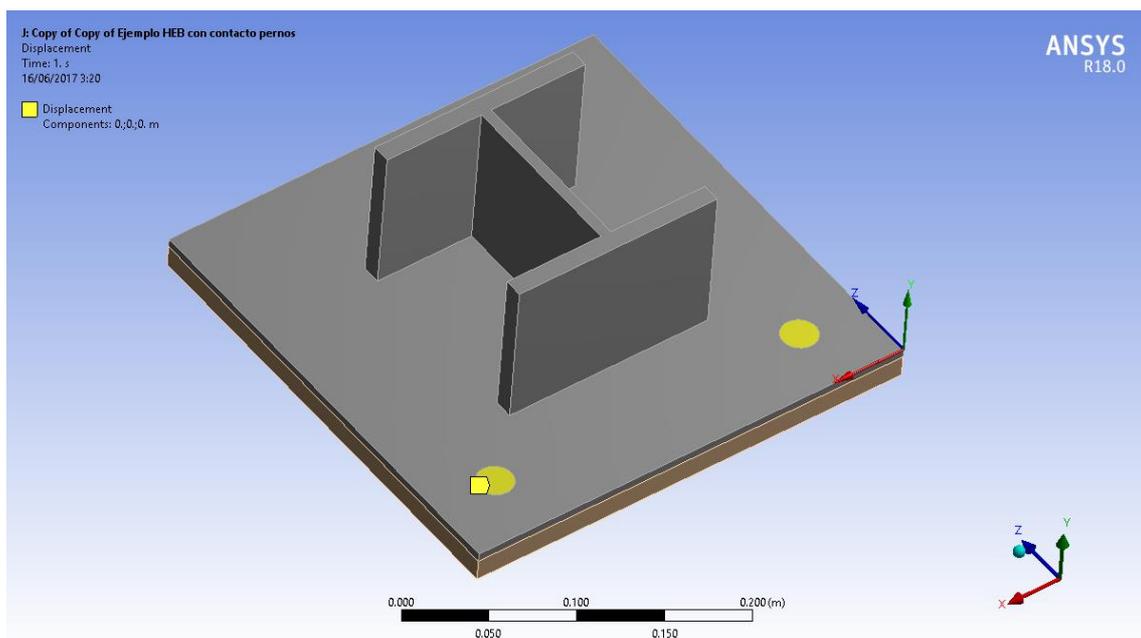


Figura 3-22 Condiciones de contorno de desplazamientos sobre la placa de anclaje

3.2.7 Extracción de resultados

Deformada

La deformación total, se muestra a continuación aumentada 40 veces por claridad visual

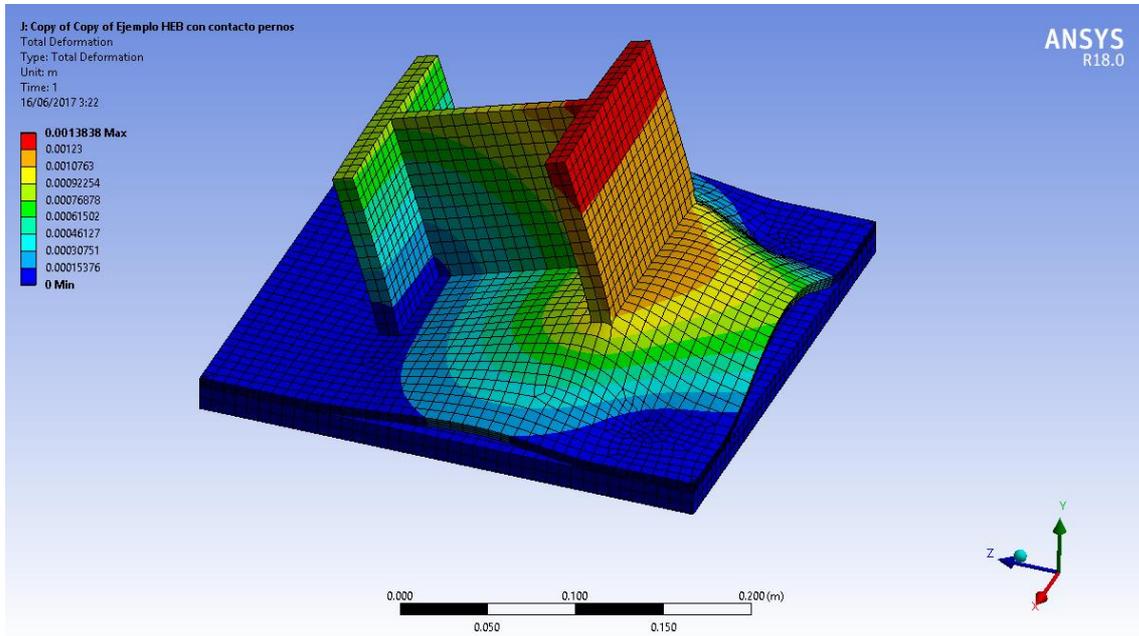


Figura 3-23 Deformada 3D de la placa base y soporte, vista superior

Como podríamos esperar, la placa sufre un levantamiento entre las dos condiciones de contorno de desplazamiento 0 (los pernos), aun así, la deformación máxima vertical que sufre el modelizado es de 1.38mm.

De esta vista también se puede comprobar que el contacto funciona a la perfección impidiendo la penetración de la placa a través del soporte indeformable que se ha colocado en la base.

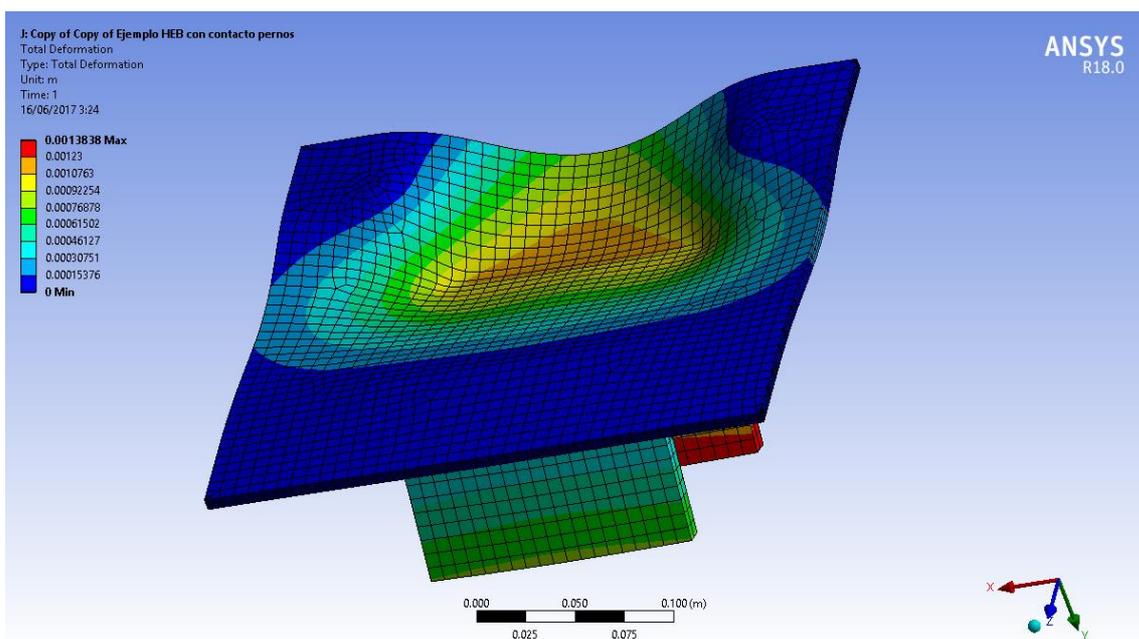


Figura 3-24 Deformada 3D de la placa base, vista inferior

Tensiones

Comprobamos que la tensión máxima no supera el agotamiento del acero S-235, que tiene una tensión de rotura, según [2], de 360MPa. En el caso de que plastificase, evaluaremos si es significativa dicha plastificación.

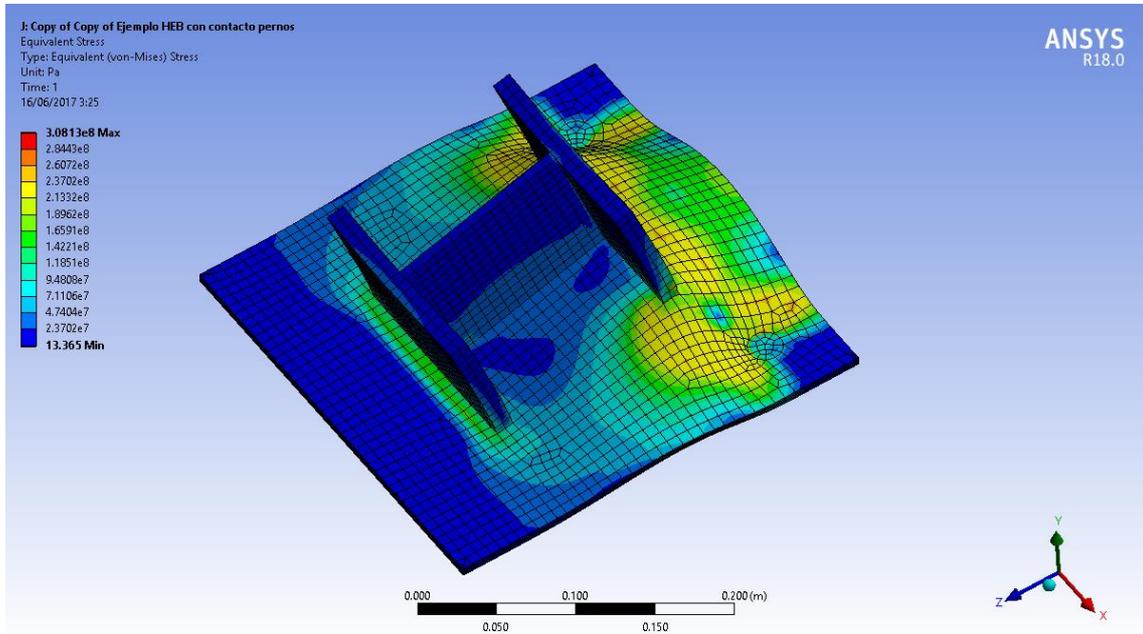


Figura 3-25 Distribución de tensiones sobre la placa base, vista 3D

La tensión máxima se produce en un punto del perfil, a 2cm de altura de la placa, pero lo que nos atañe son las tensiones en la placa. Los máximos que se producen en la misma son:

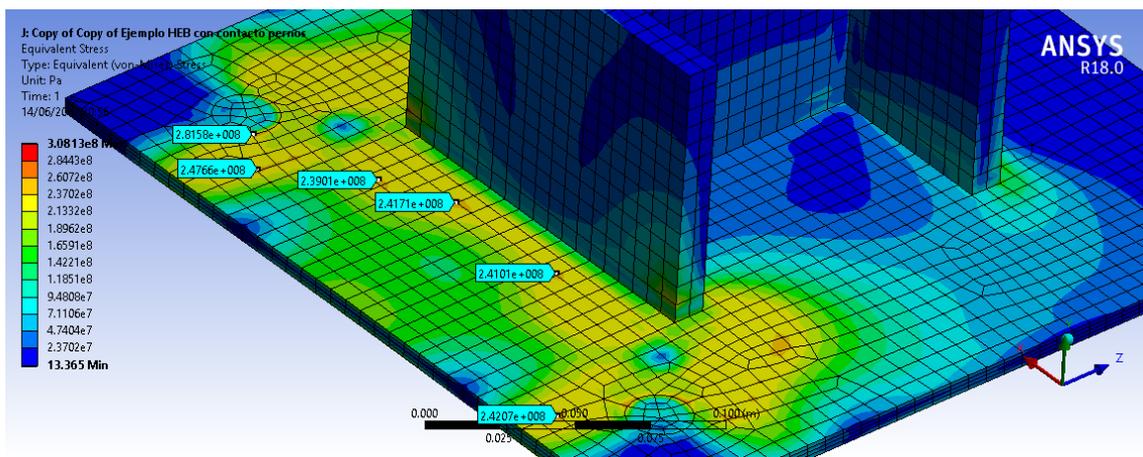


Figura 3-26 Detalle de tensiones sobre la placa base, anotados los puntos de tensión máxima

Para evaluar si en estos puntos se ha agotado la sección completa, realizamos un corte por dichos puntos:

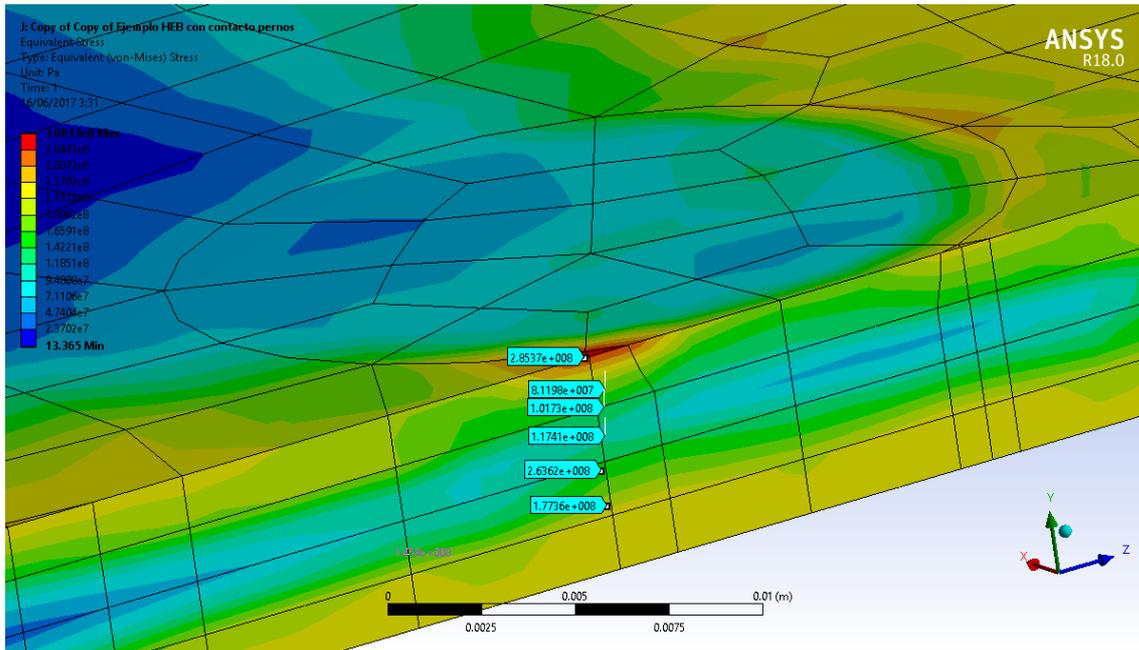


Figura 3-27 Sección vertical de la placa a través del punto de máxima tensión, vista 3D

Como podemos comprobar, la zona que supera el límite elástico se encuentra limitado a un espesor ínfimo, el espesor de la placa son 6mm, la zona plastificada es 1/12 del espesor, lo que supone una plastificación del 8.3% de esa sección lineal.

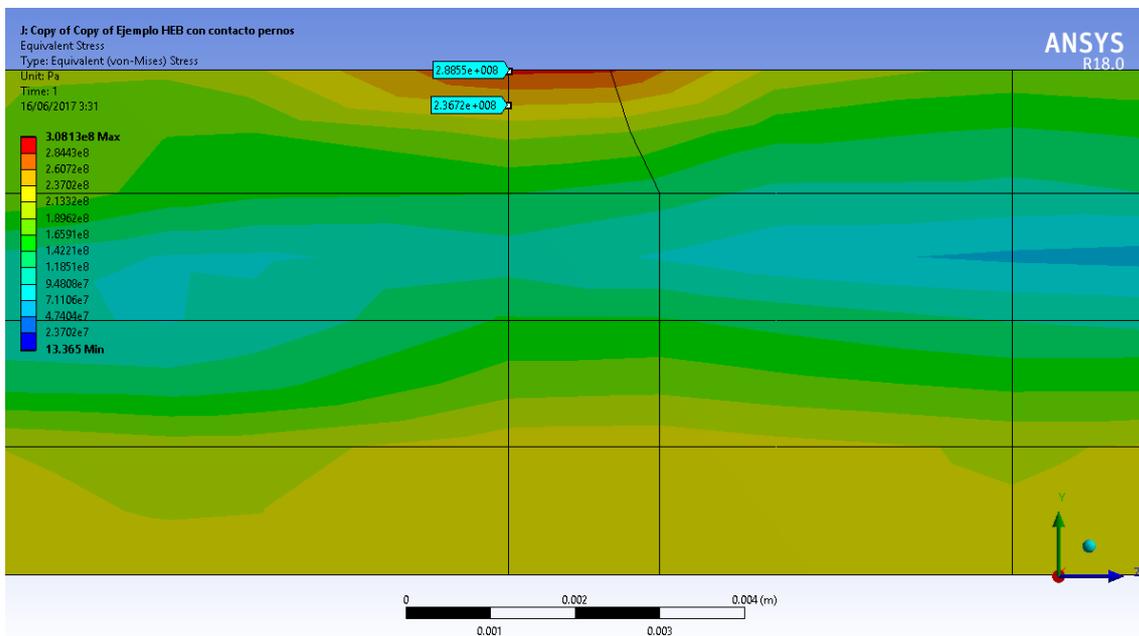


Figura 3-28 Sección vertical de la placa a través del punto de máxima tensión, alzado

Tomando cortes a diferentes espesores:

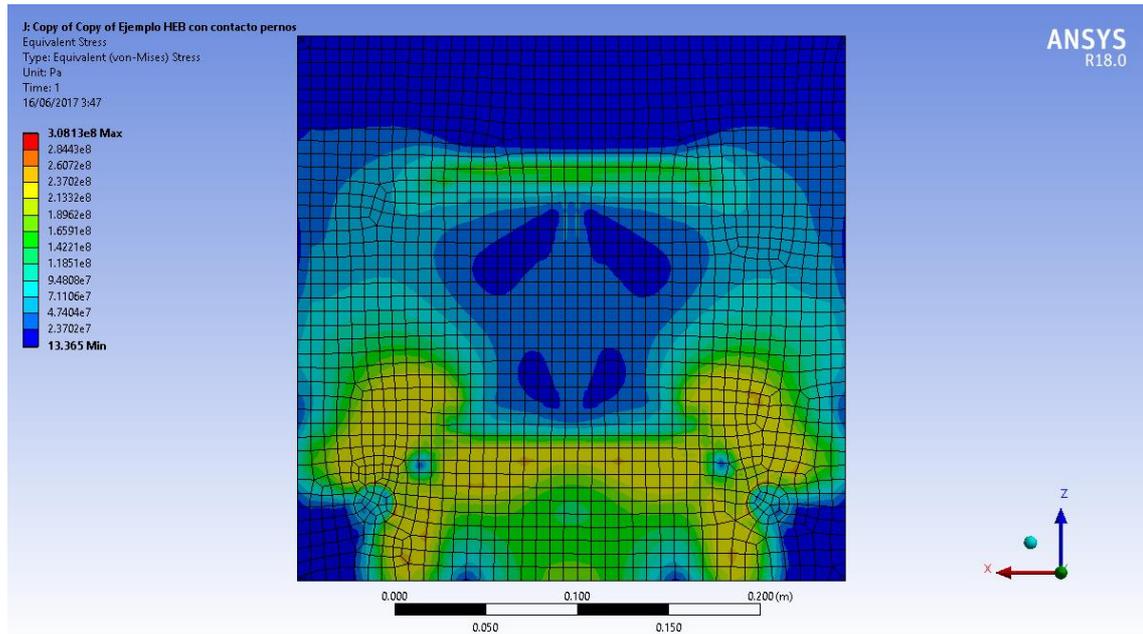


Figura 3-29 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=0\text{mm}$

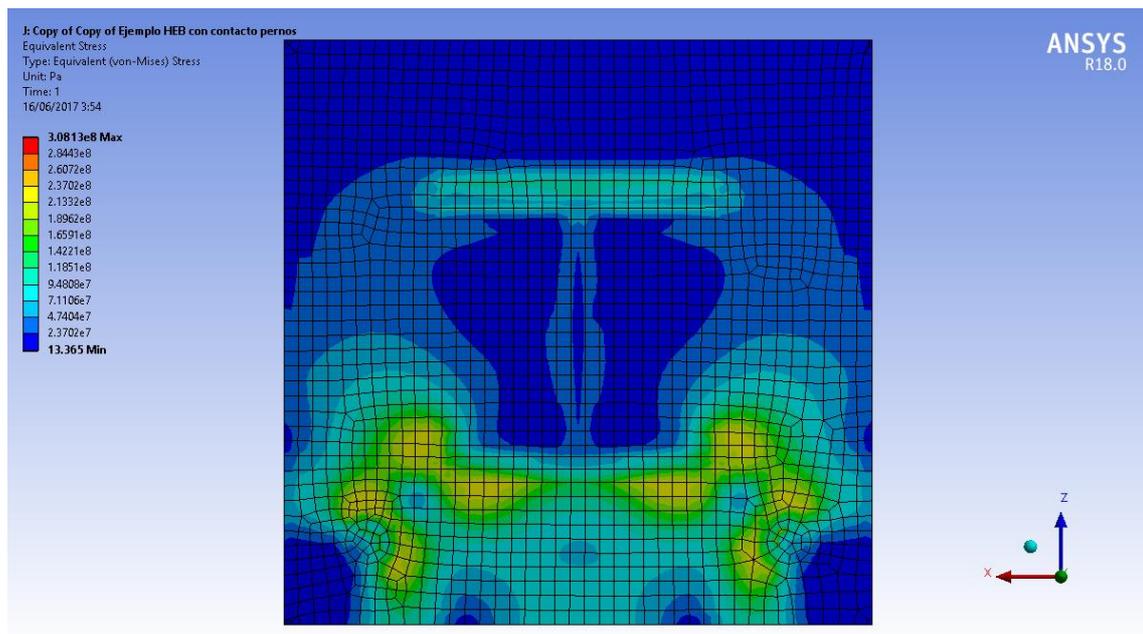


Figura 3-30 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=1.5\text{mm}$

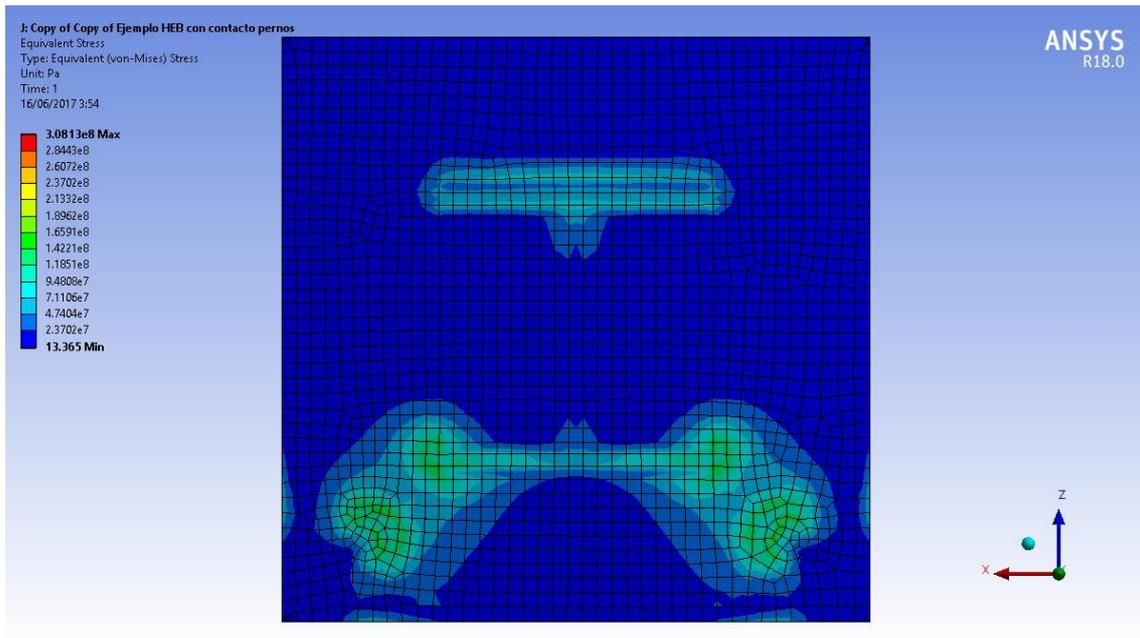


Figura 3-31 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=3\text{mm}$

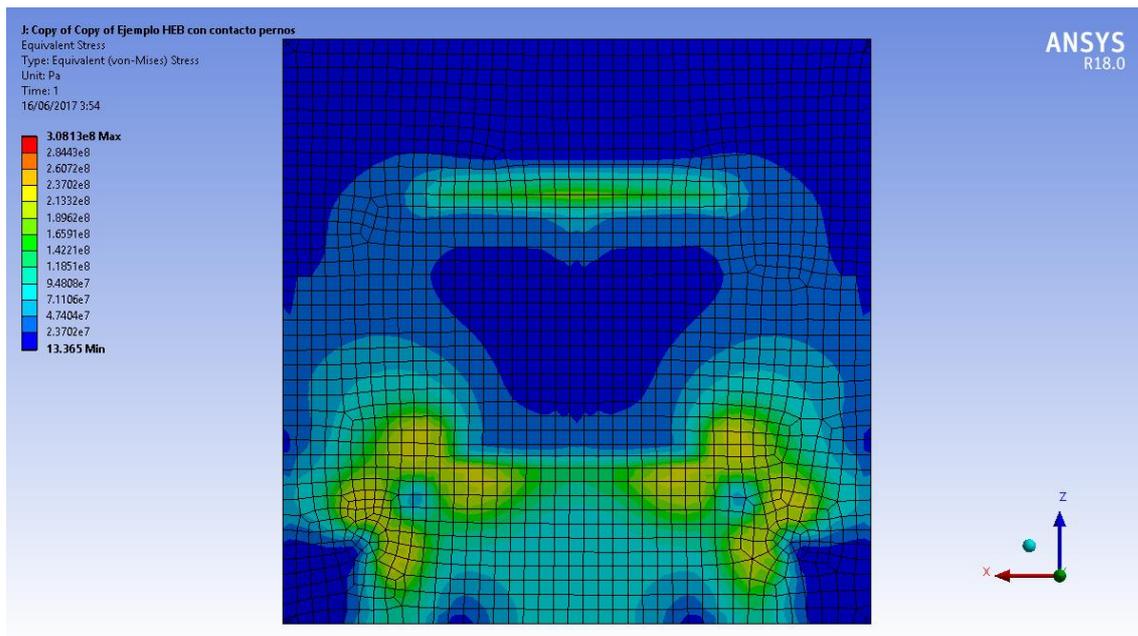


Figura 3-32 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=4.5\text{mm}$

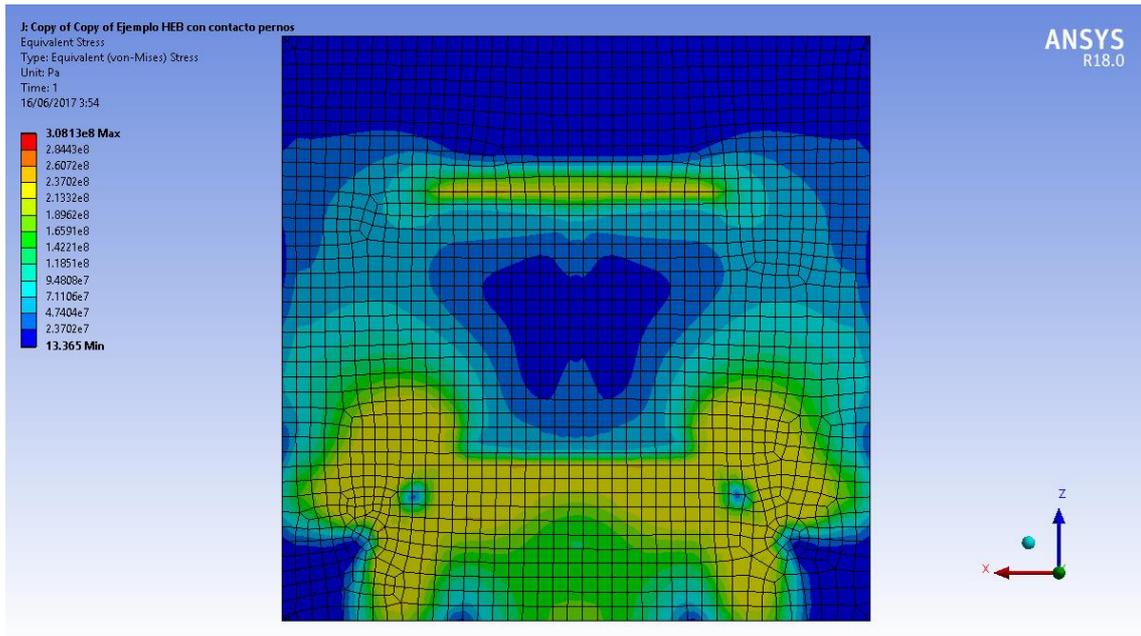


Figura 3-33 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=6\text{mm}$

Podemos comprobar que las tensiones más altas se producen en las superficies inferior y superior, absorbiendo las tensiones en el interior de la placa.

Es interesante comprobar la redistribución de tensiones que se producen bajo la cabeza del perfil que se encuentra a compresión, ya que coinciden plenamente con la distribución de la zona portante propuesta por [1] y [2].

De las imágenes anteriores concluimos que la sección no plastifica en todo el espesor, sino que en ciertos puntos la sección de la placa base está a tensión muy por debajo del límite elástico, como en $t=3\text{mm}$, cuya tensión máxima es de:

$S_{\max}=203\text{MPa}$, pudiendo optar a reducir aún más el espesor de la placa de anclaje.

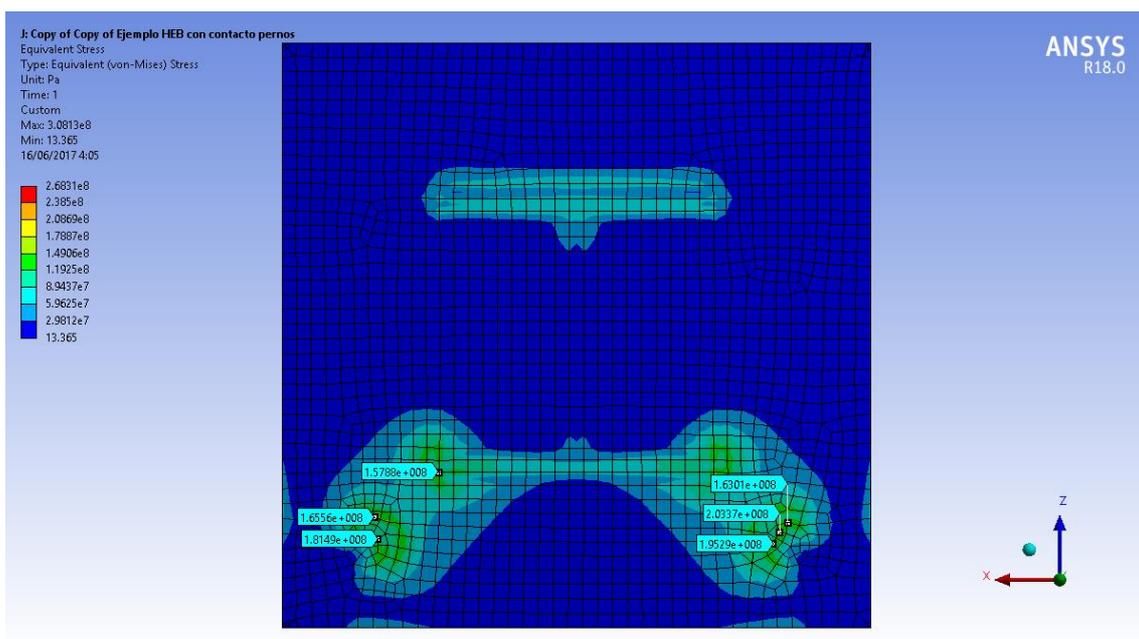


Figura 3-34 Sección horizontal de la placa, a la altura de espesor $h=3\text{mm}$, con anotaciones sobre la tensión

Reacciones

Obteniéndose un valor de 'Z' de 29464N, a repartir entre dos pernos, porque se está evaluando el valor total de las reacciones en las dos zonas. Cada perno deberá resistir 14732N de tracción.

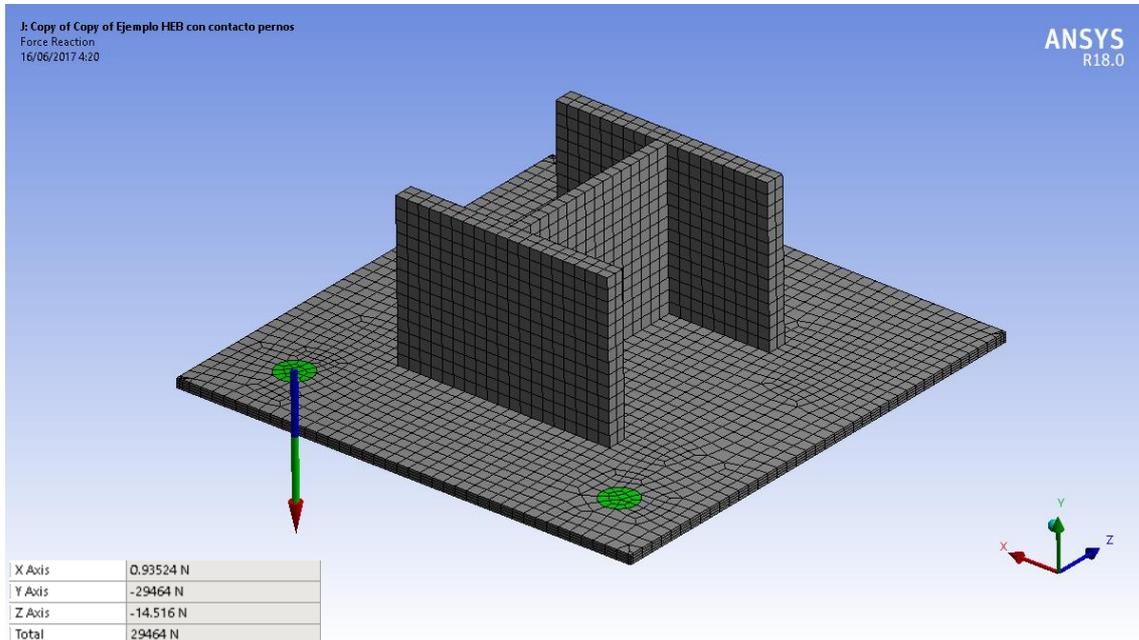


Figura 3-35 Reacciones en las condiciones de contorno de desplazamiento en la placa base, junto a su valor

Contacto

En las imágenes que suceden observaremos las zonas que están contactando, así como la presión que se produce en el contacto.

Zona de Contacto:

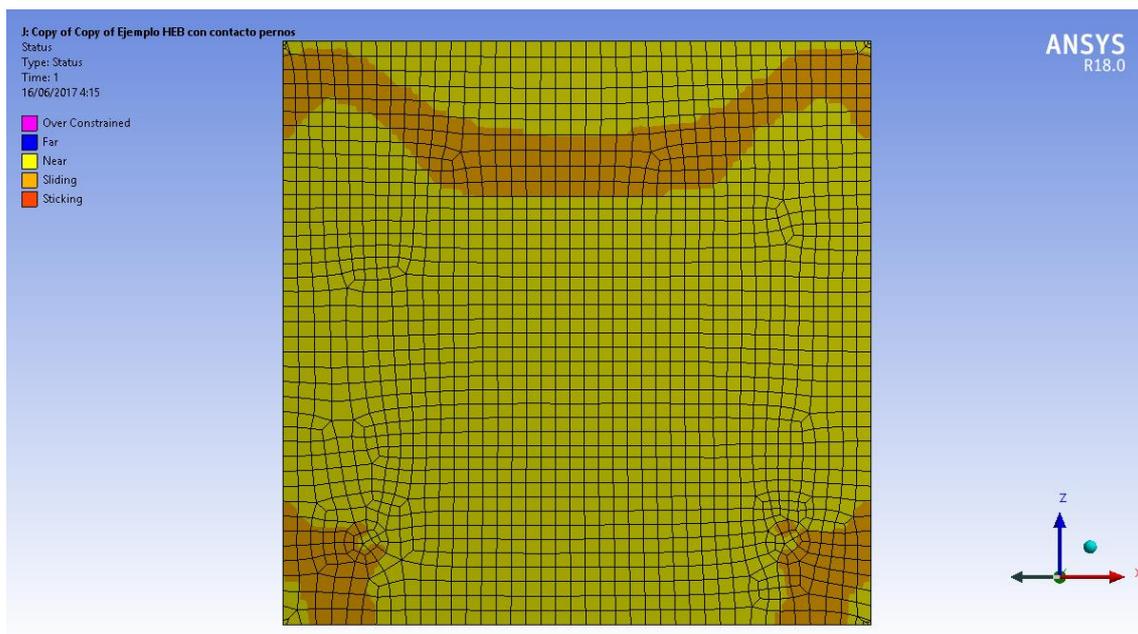


Figura 3-36 Situación del contacto. "Sliding" = deslizando, "Near" = cerca

Presión de contacto:

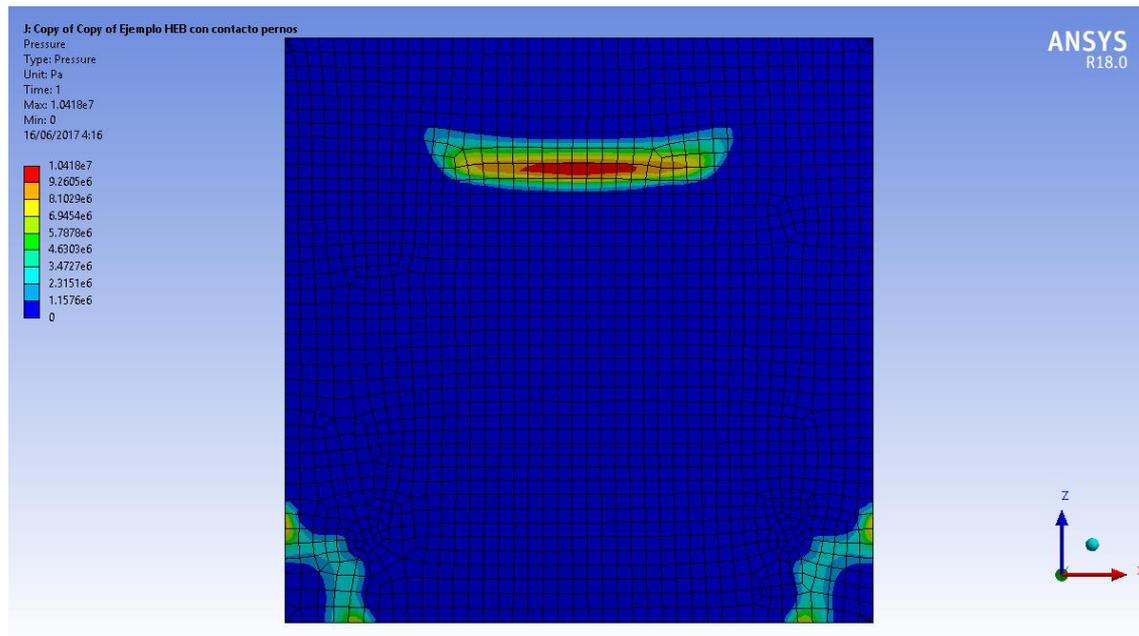


Figura 3-37 Presión de contacto en la interfaz placa base-soporte

La presión máxima de contacto transmitida al hormigón es de ¡10.5MPa! Cumplimos con el valor máximo que se puede transmitir al hormigón f_{jd} , recordemos, de valor 23.80MPa.

3.2.8 Comparativa de resultados

La zona de presión de contacto resultante de la resolución del modelizado, representa fielmente la forma que la normativa vigente propone para la zona en la que la placa transmite las presiones al soporte de hormigón.

El hecho de que la presión máxima sea mucho menor (la mitad) que la propuesta en el ejemplo del apartado 2.2, se debe a que en el modelizado de MEF en el que estamos incluyendo el contacto, no forzamos a la zona de contacto a trabajar a su máxima capacidad de compresión, sino que es resultado de la resolución del problema. Además, la zona en la que se distribuyen las presiones es ostensiblemente mayor a la propuesta por la normativa, obteniéndose presiones menores.

La fuerza que deben realizar los pernos para compensar las tracciones que genera el momento aplicado, es mayor a la obtenida mediante el cálculo propuesto por [2]. Esto se debe a que en el modelizado 2 estamos incluyendo dos efectos no lineales al cálculo, primero, la no linealidad del material, segundo, el problema de contacto. Por lo que el resultado obtenido de las reacciones debería ser más preciso en el modelizado de MEF.

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN: PERFILES TUBULARES CIRCULARES

4.1 Descripción del problema

Como se nombró al inicio de este documento, haciendo el cálculo según la normativa para esta clase de perfiles anclados en una base, surgen numerosas preguntas a las que no podemos dar respuesta sin incurrir en hipótesis no contrastadas.

Por tanto, se realizará un modelizado de elementos finitos para esclarecer el vacío que deja la norma y, en última instancia, la evaluación de los resultados y cómo aplicarlos al cálculo de la normativa sin tener que realizar un modelizado de elementos finitos.

4.2 Datos de la placa de anclaje

Geométricos:

Dimensiones de la placa: 300x300x6mm

Perfil tubular circular: $r=66\text{mm}$, $t_{\text{perfil}}=3\text{mm}$

Distancia de los pernos al borde (g)=42.5mm

Materiales:

Hormigón HA-25

Acero S-235JR

Cargas:

$N_{\text{ed}}=0\text{ kN}$

$M_{\text{ed}}=3.85\text{kN/m}$

4.3 Cálculo de la placa de anclaje mediante MEF

4.3.1 Geometría

Se diseña en Spaceclaim Design Modeler, para generar de forma sencilla los detalles de la placa base con el perfil. Primero se realiza el volumen hexaédrico que corresponde a la placa base, posteriormente, se proyectan dos circunferencias que al extruirlas generan el perfil tubular circular. Le damos una altura genérica al perfil de 100mm.

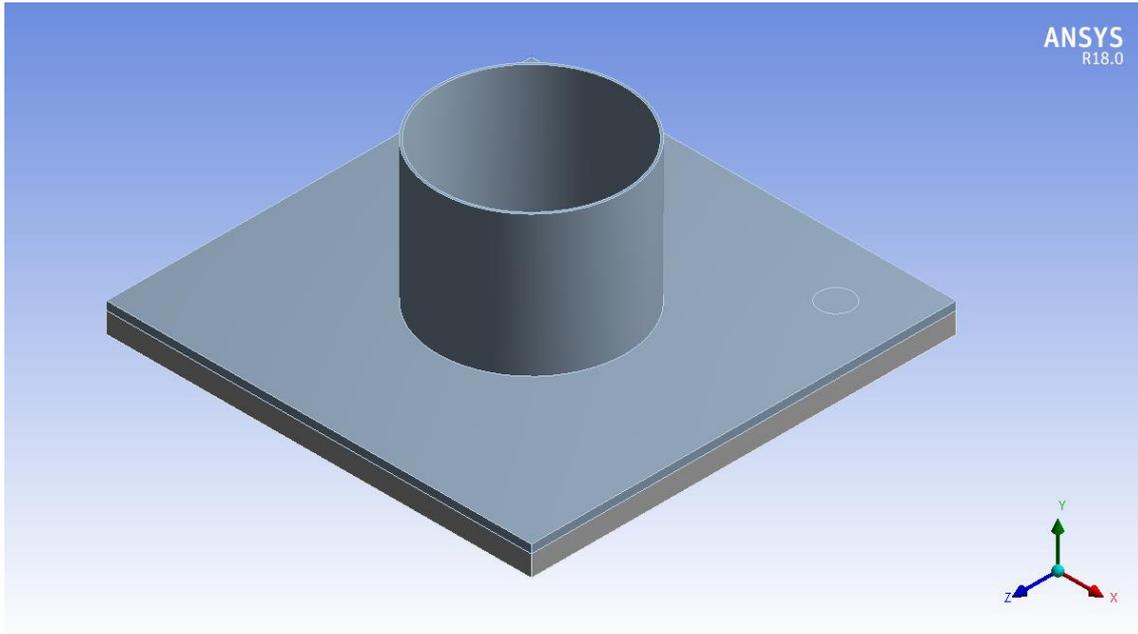


Figura 4-1 Geometría del modelizado con perfil tubular

4.3.2 Tipo de Elemento

Los tipos de elementos utilizados son:

- SOLID186 para las regiones sólidas
- CONTA174 para la cara inferior de la basa
- TARGE170 para la cara superior del soporte

4.3.3 Clase de contacto

La clase de contacto utilizada para este problema sigue siendo el contacto sin fricción. Los parámetros de entrada del contacto seguirán siendo Pure Penalty, con rigidez de contacto (contact stiffness) de 0.1.

4.3.4 Materiales

Acero S-235JR: módulo de elasticidad $E=210000\text{MPa}$, módulo tangente: 0.0005MPa . (Modelo Elastoplástico perfecto)

Indeformable: módulo de elasticidad: $2.1 \cdot 10^{13}\text{MPa}$. Simulamos un sólido indeformable respecto al acero.

4.3.5 Mallado

Seguiremos las directrices expuestas en el apartado 3.2, utilizaremos un mallado de las mismas características, MultiZone, con 4 divisiones en el espesor y 10 en la zona de las arandelas.

Mallado resultante:

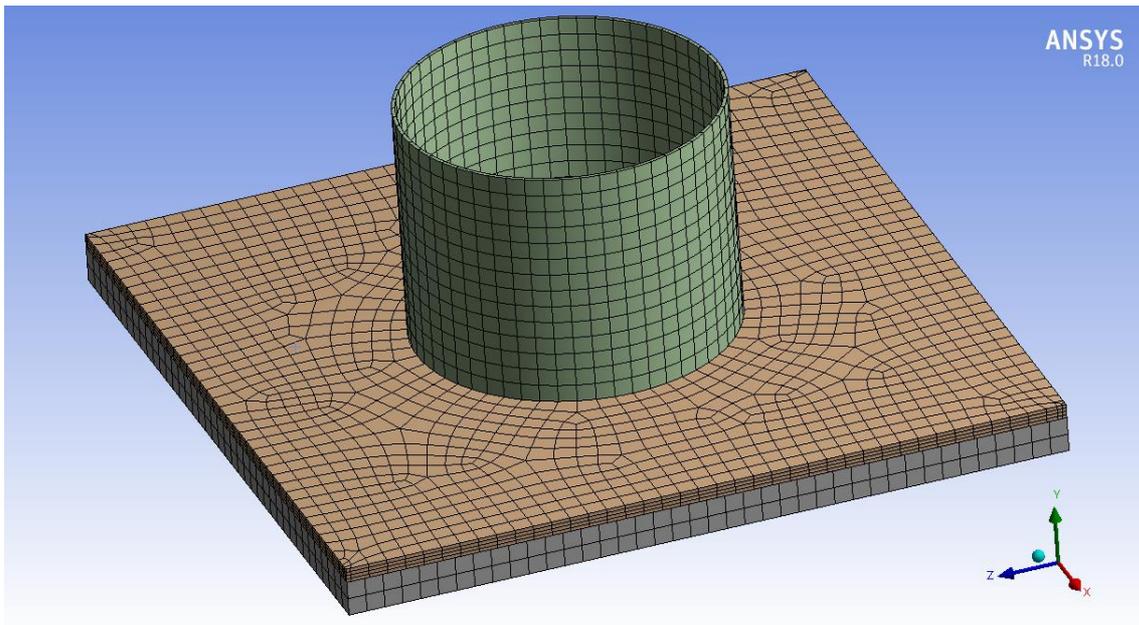


Figura 4-2 Mallado resultante del modelizado 3

4.3.6 Aplicación de cargas y condiciones de contorno

Paso 1) Aplicar cargas

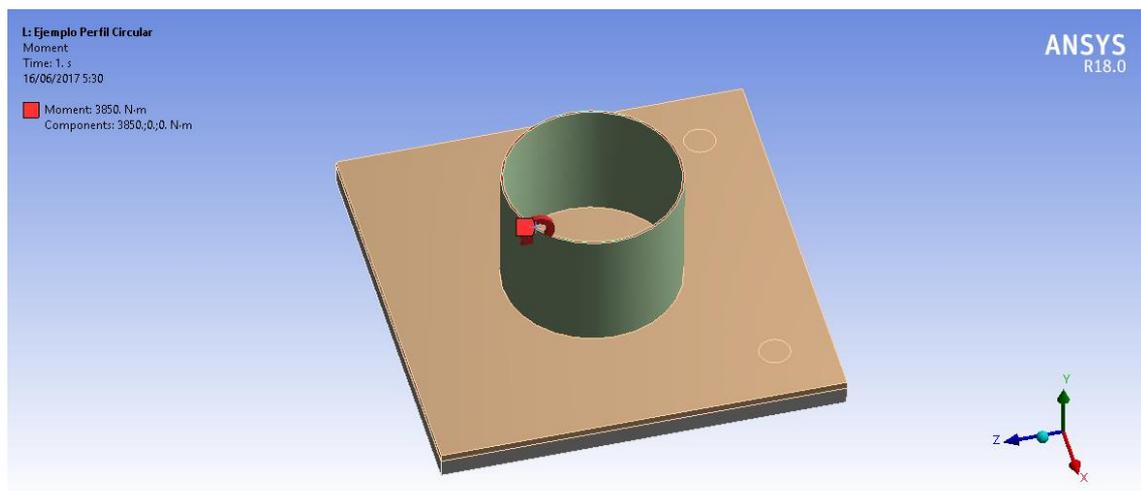


Figura 4-3 Aplicación de momento de diseño a la parte superior del perfil circular

Aplicaremos un $M_{ed} = 3.85\text{kN/m}$ sobre la parte superior de la sección.

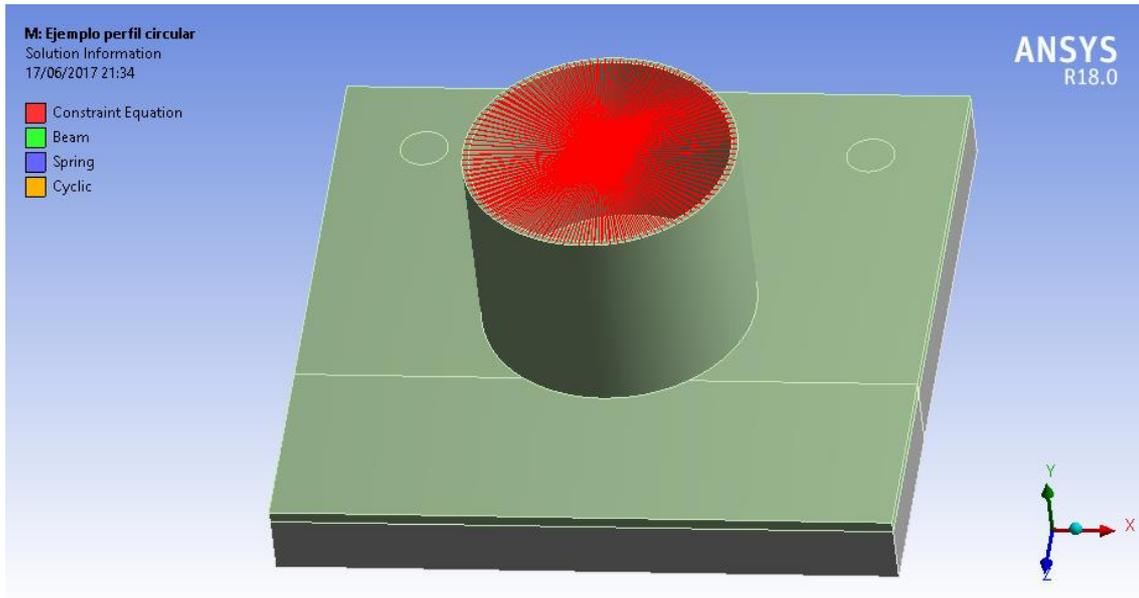


Figura 4-4 Ecuaciones de ligadura obtenidas al aplicar momento en la superficie superior

Paso 2) Condiciones de contorno

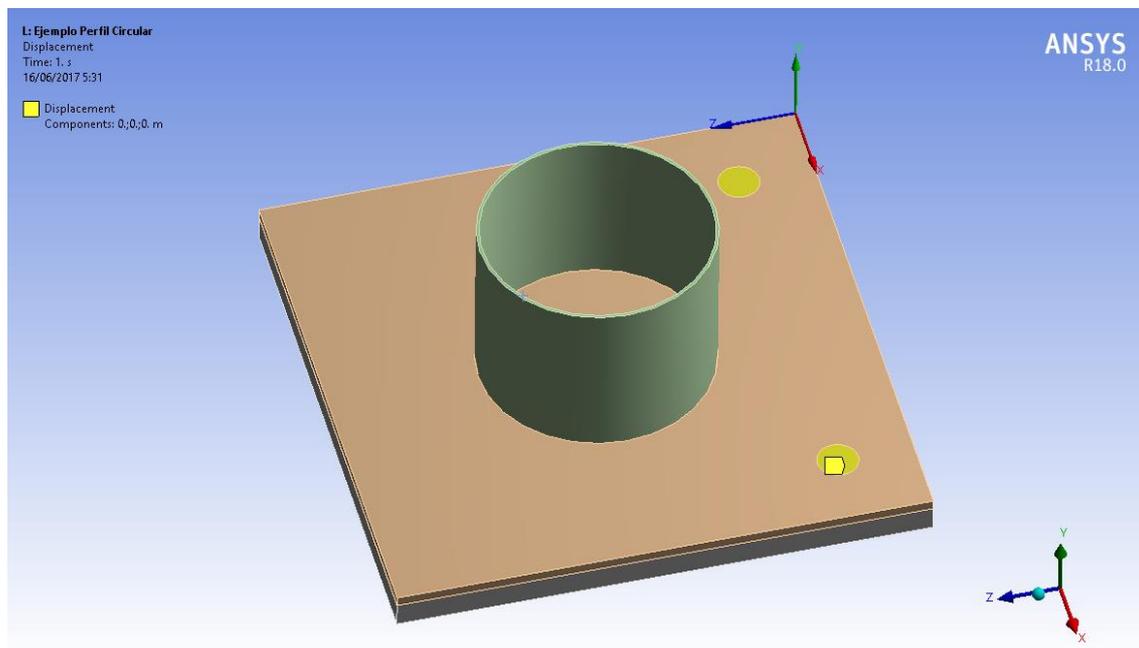


Figura 4-5 Condiciones de contorno de desplazamiento nulo en las arandelas de la placa de anclaje

En el problema de contacto, impedimos el desplazamiento y el giro en la base del sólido indeformable, así como los desplazamientos únicamente en la superficie de la arandela.

4.3.7 Extracción de resultados

Deformada

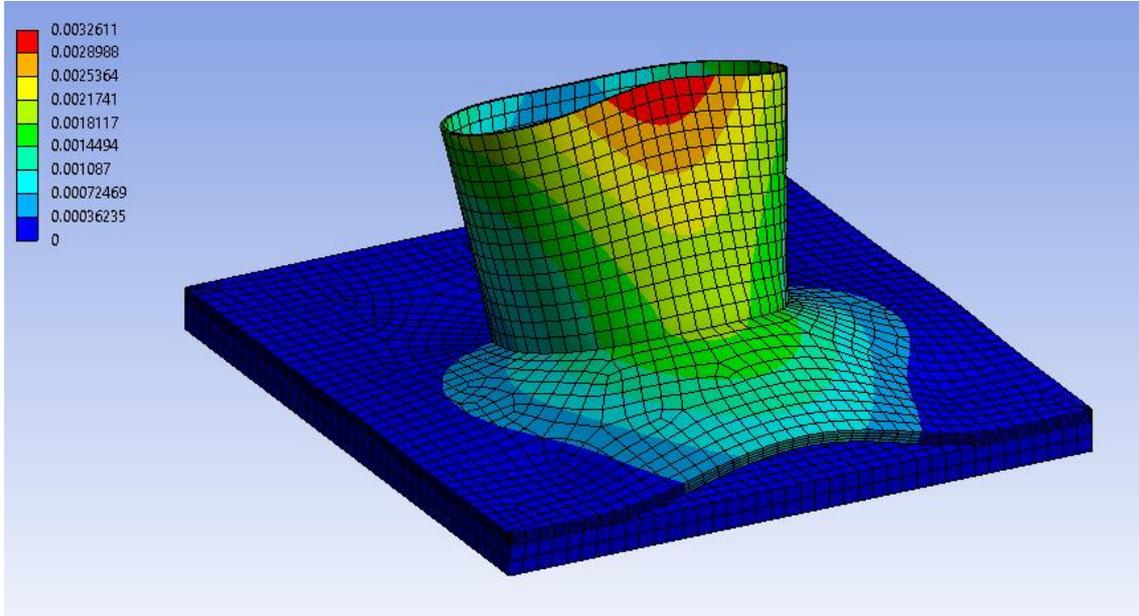


Figura 4-7 Deformada obtenida tras solucionar, factor de escala aplicado: 21, vista 3D

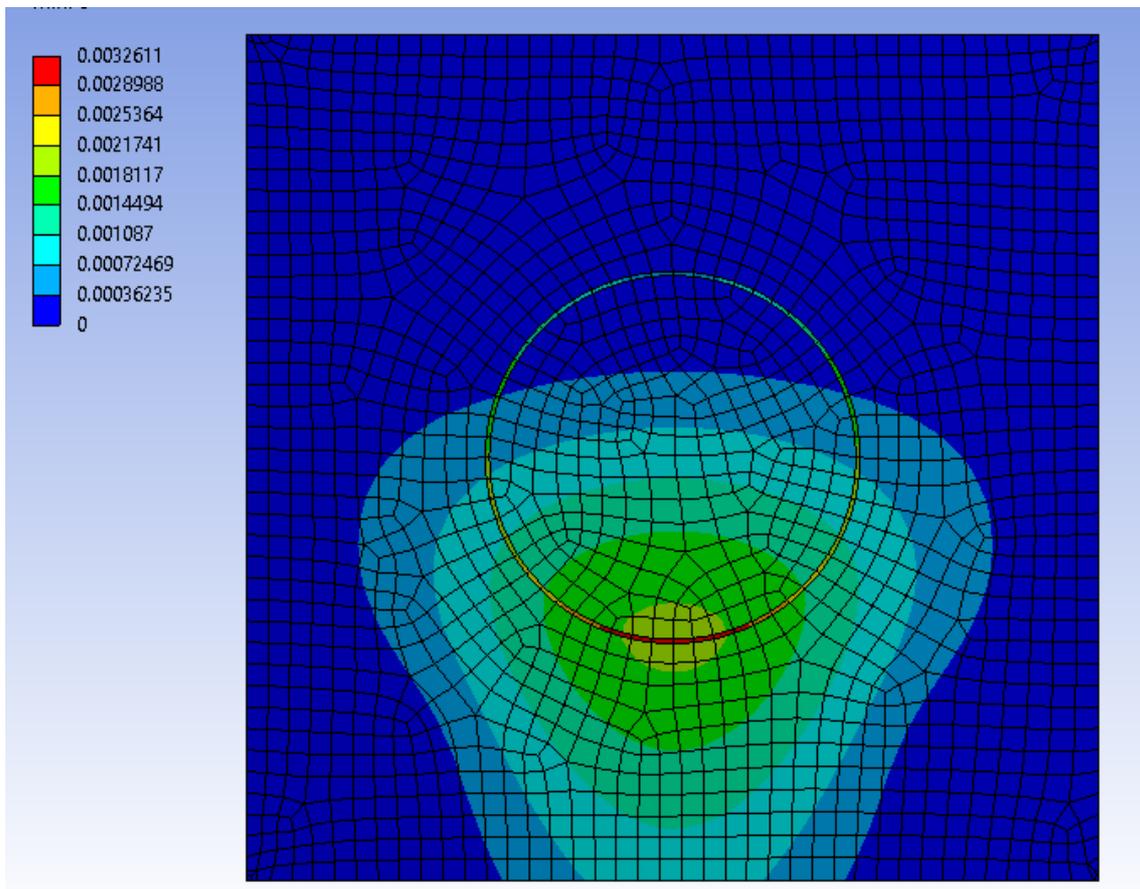


Figura 4-6 Deformada obtenida tras solucionar, factor de escala aplicado: 21, vista en planta

Tensiones

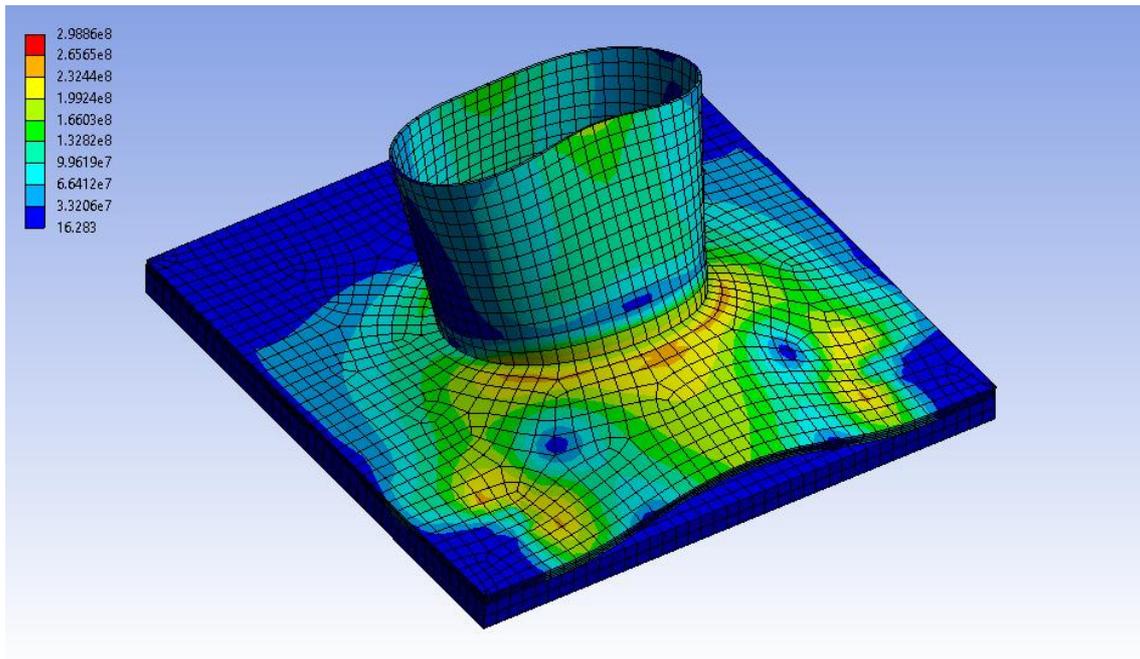


Figura 4-8 Tensiones de la estructura ensayada, vista 3D

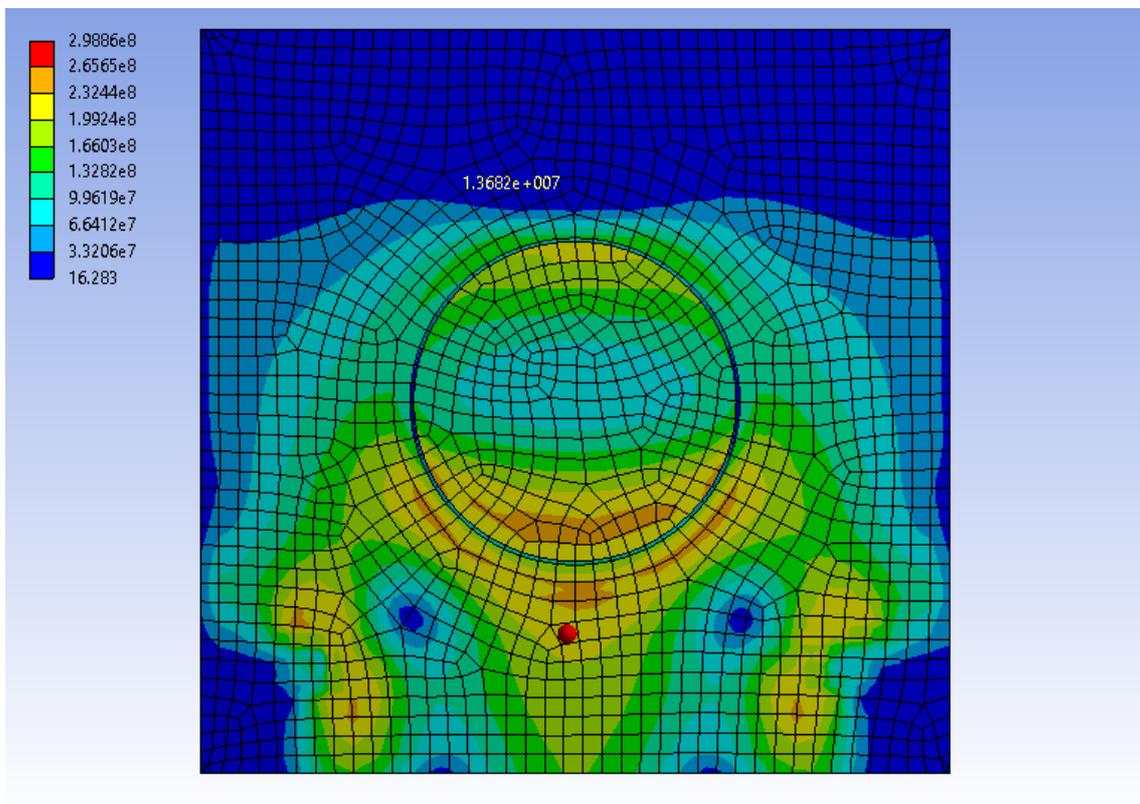


Figura 4-9 Tensiones de la estructura ensayada, vista superior

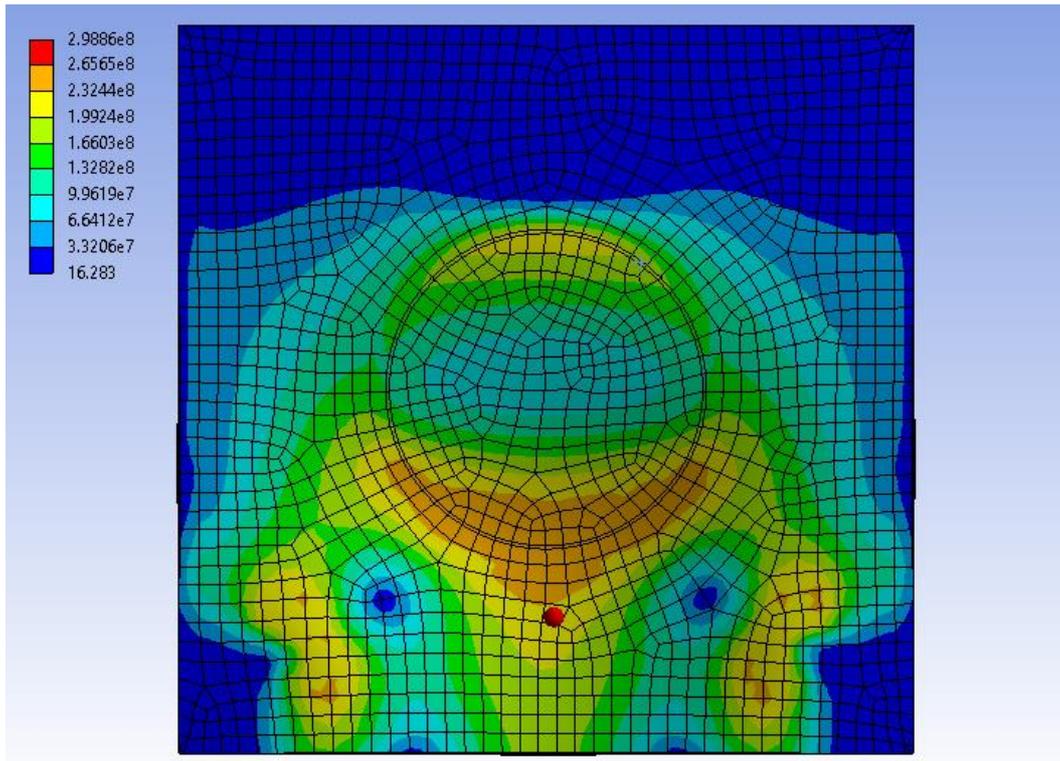


Figura 4-10 Tensiones de la estructura ensayada, vista inferior

El punto de tensión máxima se genera dentro del perfil tubular, en la unión con la placa de anclaje. Como no se ha incluido en el modelado el cordón de soldadura, se produce una concentración de tensiones por el encuentro a 90° entre el perfil y la placa. Despreciando este efecto, ya que se solventará con la soldadura, en la placa se producen las siguientes tensiones máximas:

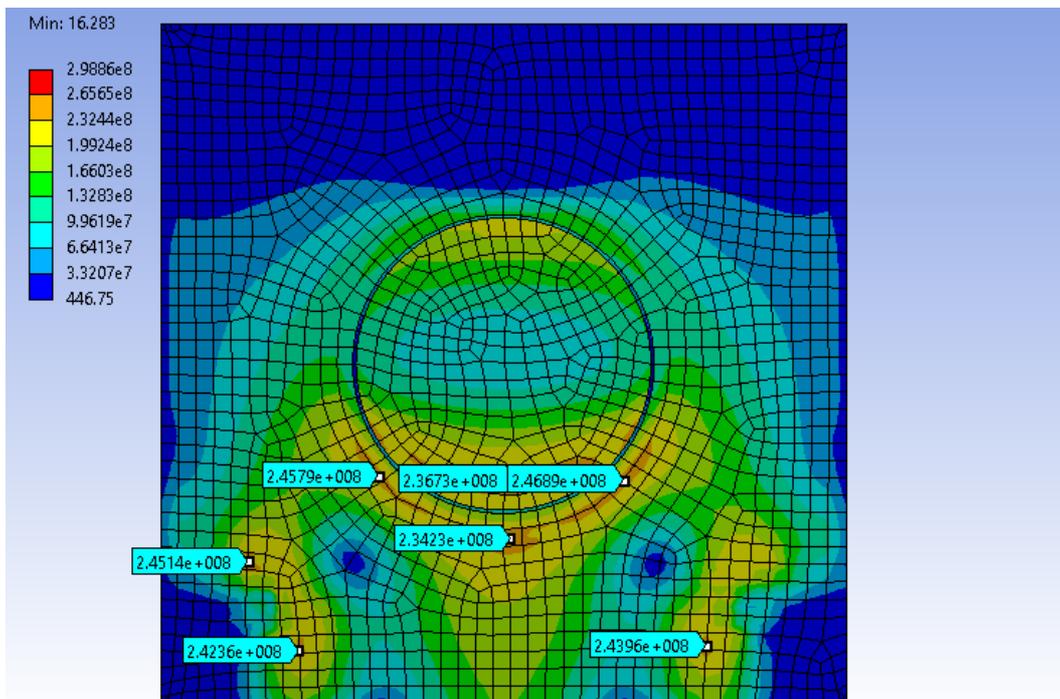


Figura 4-11 Tensiones evaluadas en los puntos críticos

Podemos observar la similitud entre el caso del perfil tubular circular y el perfil HEB, en ambos se superan las tensiones de límite elástico, pero en zonas puntuales y sólo en superficie, como se ve a continuación:

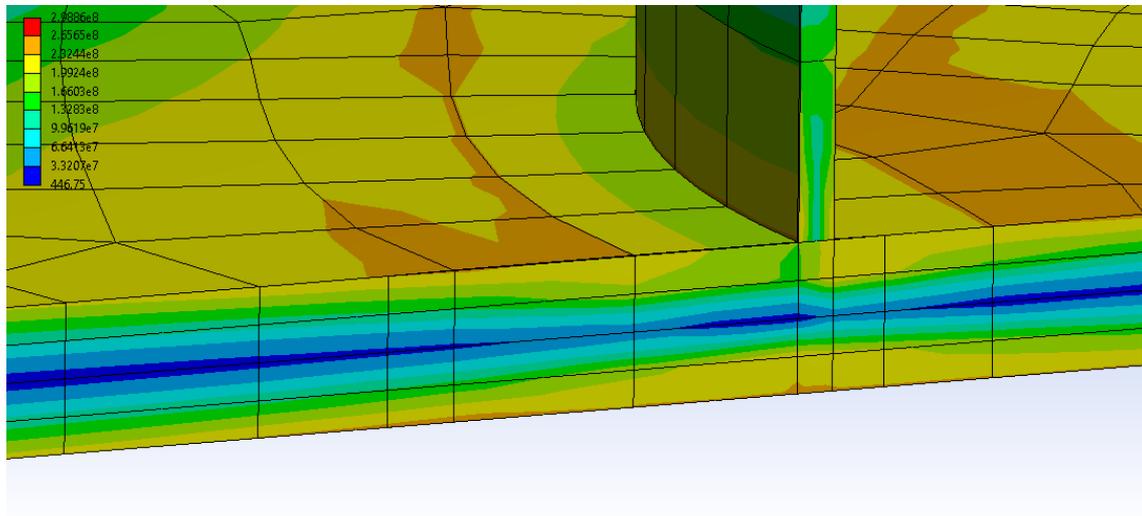


Figura 4-12 Sección vertical sobre los puntos de tensión máxima

En este caso en concreto, las tensiones máximas se dan en la superficie de la placa, por lo que asumimos, al estar muy por debajo de la tensión de rotura, que la placa resiste las acciones a las que está sometida.

Como antes, hay una franja de perfil que no se encuentra aprovechada, cercano al centro de la placa:

$h=2.5\text{mm}$

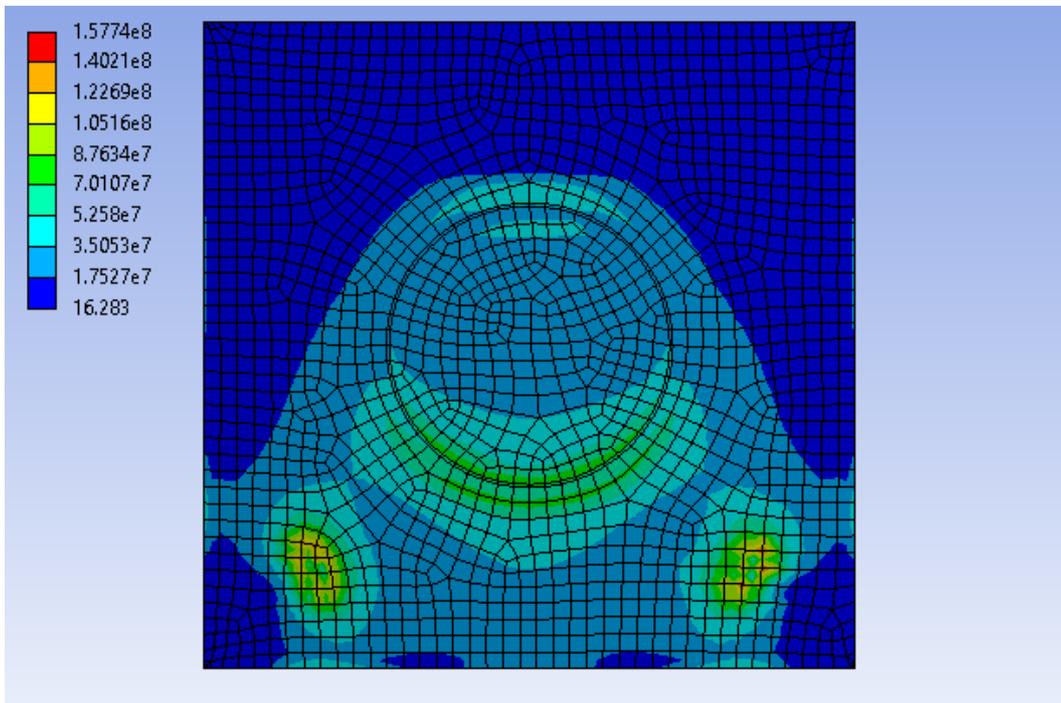


Figura 4-13 Sección horizontal, a una profundidad $h=2.5\text{mm}$ del espesor de la placa

La tensión máxima en $h=2.5\text{mm}$ (siempre midiendo desde la parte superior de la placa) es de 158MPa.

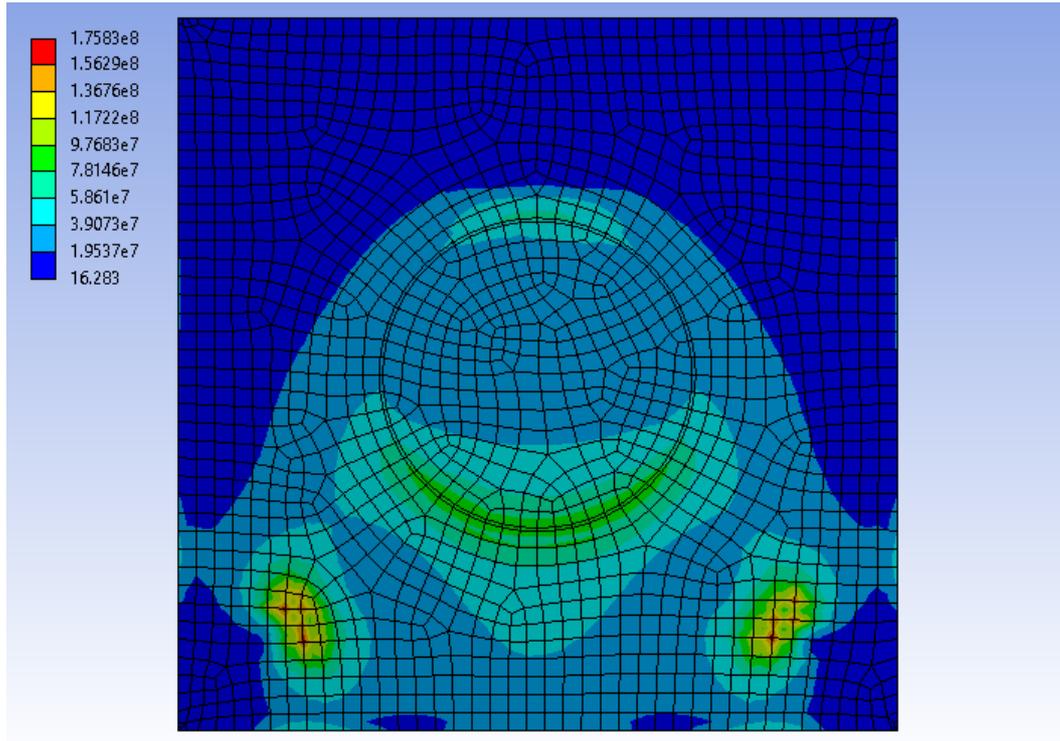


Figura 4-14 Sección horizontal, a una profundidad $h=3.5\text{mm}$ del espesor de la placa

La tensión máxima es de 176MPa .

Con estos resultados, podemos presuponer que la placa de anclaje aún no ha llegado a su óptimo de espesor, pudiendo prescindir de la capa de 2.5mm a 3.5mm , convirtiendo la placa de anclaje a un espesor de $t=5\text{mm}$.

Se dejará a un lado esta nueva iteración, para realizarla como trabajo futuro.

Reacciones

El valor máximo obtenido en las reacciones que simulan los pernos es de $Y=22761\text{N}$, Lo que equivaldría a dimensionar los pernos para una fuerza de 11380N cada uno.

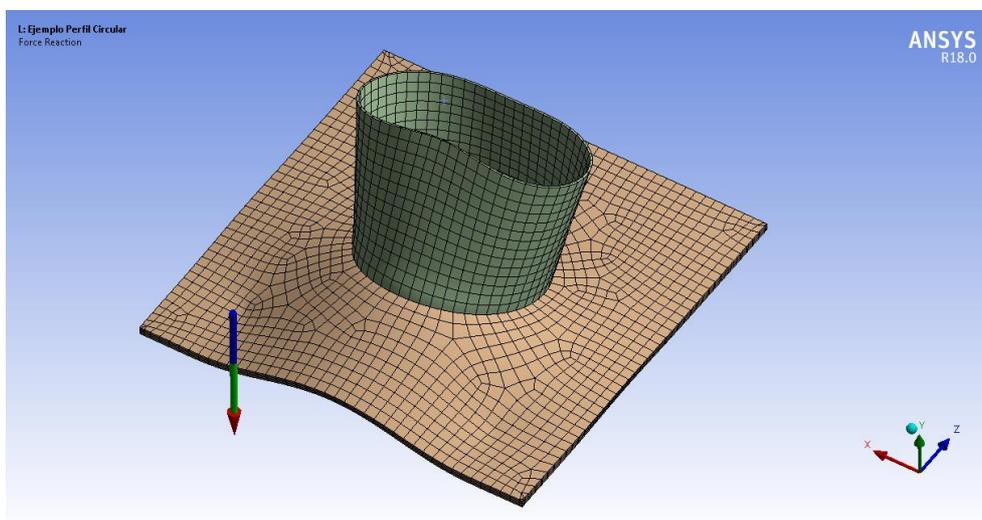


Figura 4-15 Valores de las reacciones

Contacto

En las figuras 4-16 veremos el estado de contacto y en la 4-17 la presión de contacto generada.

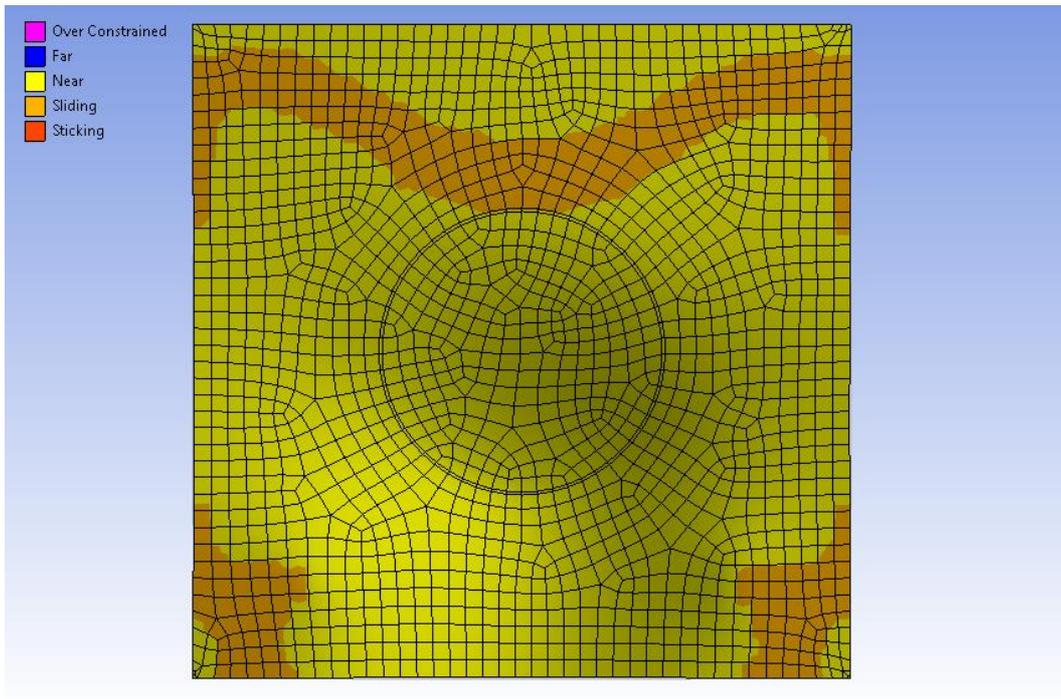


Figura 4-16 Estado del contacto

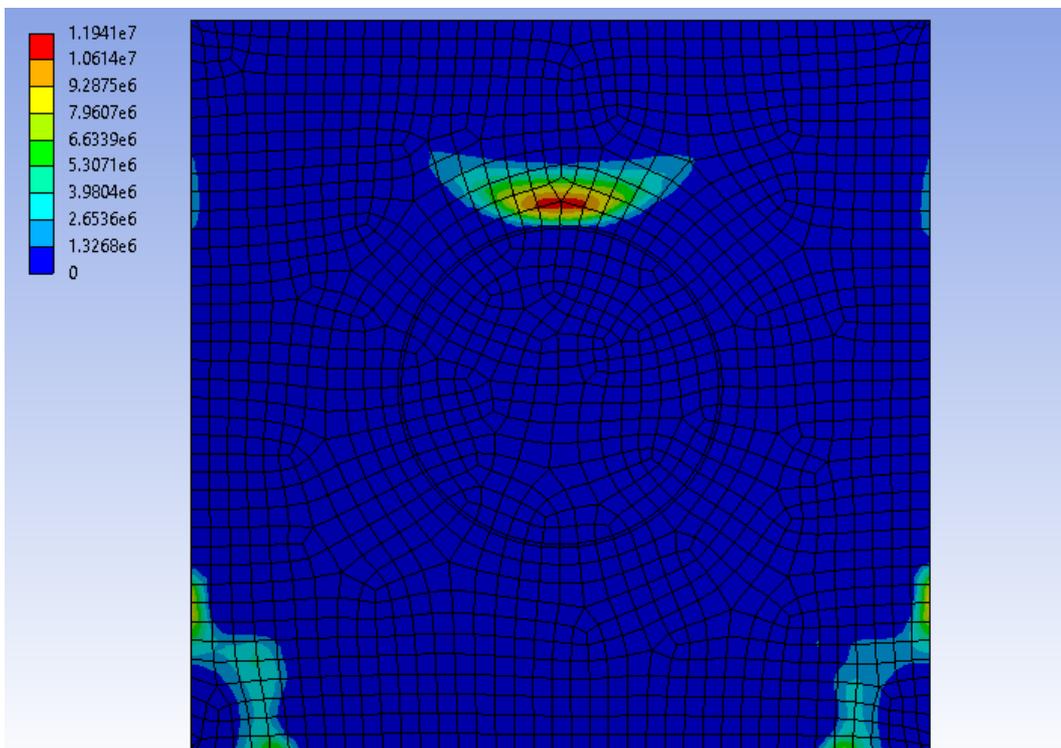


Figura 4-17 Presión de contacto

La presión de contacto obtenida con este modelizado es de 11.94MPa, de nuevo mucho menor que la calculada de manera teórica con la norma.

4.3.8 Comparativa de resultados

Los resultados obtenidos de los modelizados de contacto son muy similares, observemos el contacto que se produce:

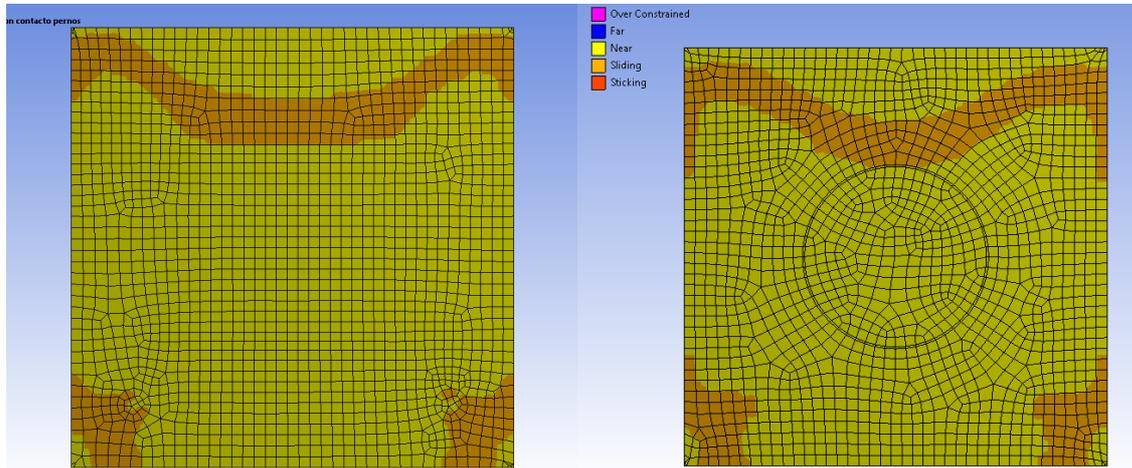


Figura 4-18 Comparación de los contactos del modelizado 2 y 3

De estas dos figuras podemos sacar la conclusión de que la forma del contacto está vinculada íntegramente con la forma del borde del perfil. En la izquierda observamos que la diagonal del contacto hacia las esquinas se produce a partir de la esquina del perfil, hecho que comprobamos en la derecha, como el perfil circular no tiene esquina, dicha diagonal parte de la zona más alejada del perfil, en el ángulo de 90°.

Respecto a las presiones de contacto:

Para poder realizar el siguiente paso en nuestro razonamiento, superpongamos las imágenes de las presiones de contacto y su distribución y los perfiles.

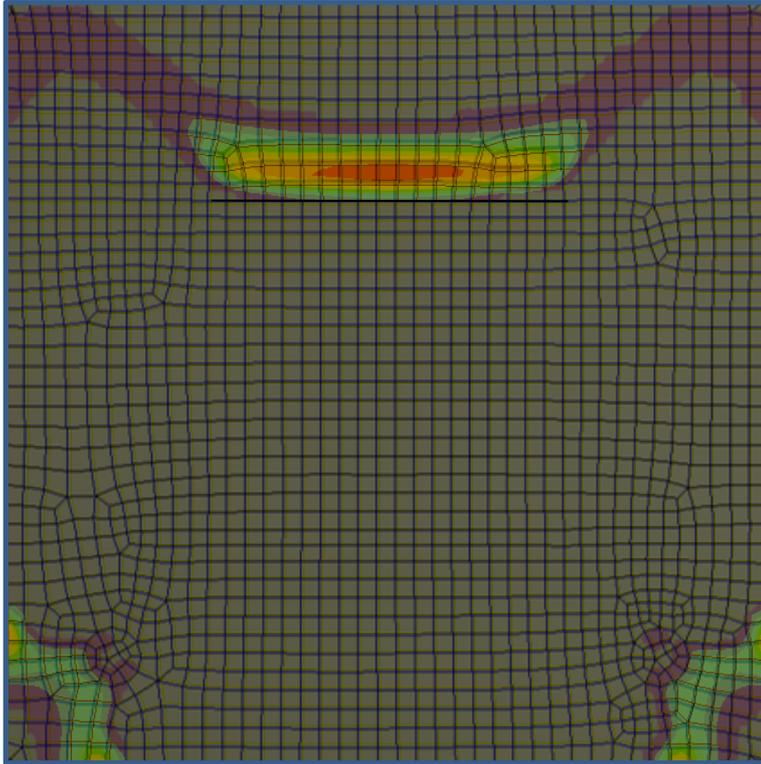


Figura 4-19 Superposición de imágenes de estado de contacto y presión de contacto del modelizado 2

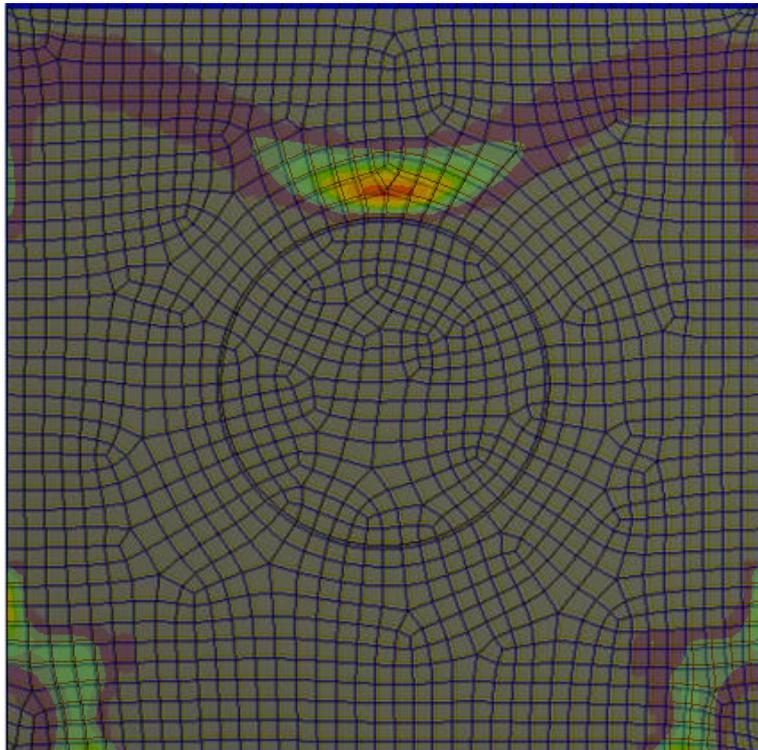


Figura 4-20 Superposición de imágenes de estado de contacto y presión de contacto del modelizado 3

A partir de la superposición de las imágenes, podemos determinar que a medida que el diagrama de presiones sube por la diagonal de la zona de contacto, la energía se disipa, quedando concentrada en la rama horizontal.

En el siguiente paso, intentamos delimitar geoméricamente el área de contacto para el perfil circular.

Se encuentran las siguientes posibles relaciones:

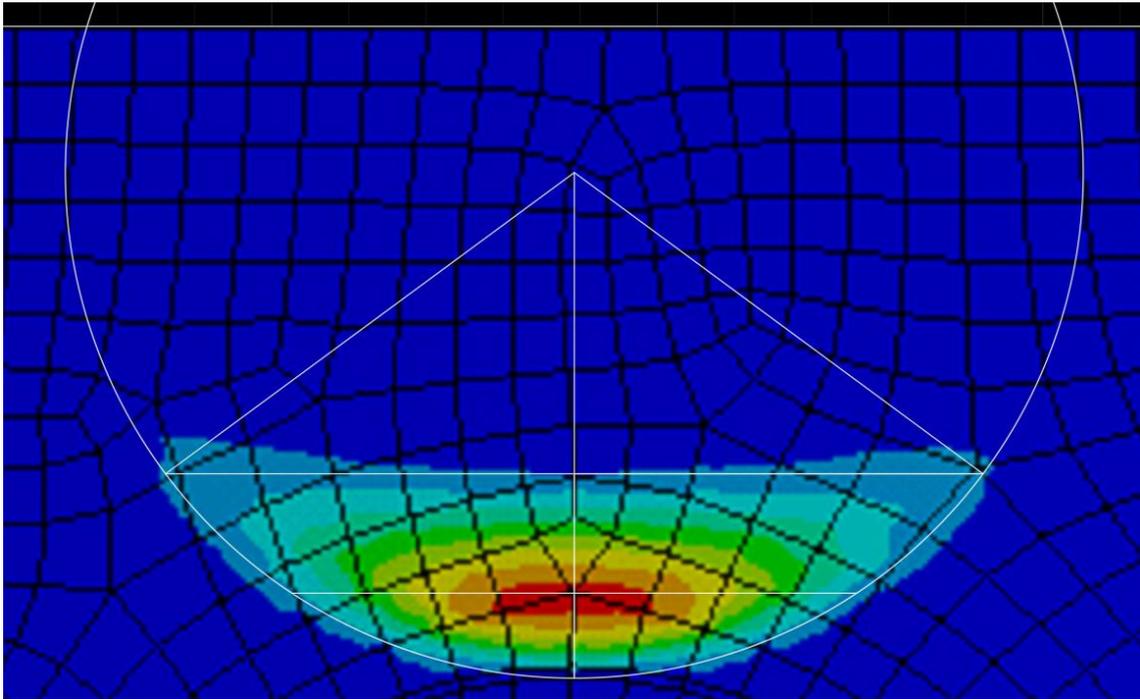


Figura 4-21 Hipótesis de relación geométrica entre el perfil circular y la distribución de las presiones de contacto

La forma que tiene el contacto, es el reflejo del perfil circular, se delimitan los contornos con la circunferencia de radio r_h , que corresponde al radio del perfil circular.

La línea que delimita la profundidad de la presión de contacto, será dependiente del momento aplicado, de la resistencia del acero y del espesor de la placa, en ningún caso de la resistencia del hormigón. Para encontrar una expresión que aproxime esta distancia, debemos hacer una serie de valoraciones:

Una mayor resistencia del acero, disminuiría las presiones de contacto, por tanto "bajaría" la línea, de la misma forma, el espesor de la placa de anclaje, a mayor espesor, menor presión de contacto, por ende, menor profundidad de las presiones de contacto. Si aumentamos el momento actuante, aumenta la presión de contacto y sube la línea superior. De momento, conocemos el área encerrada: $1977.9mm^2$. Como también tenemos el dato de las reacciones producidas en los pernos "Z", despejamos el valor de la presión media que hace que el sistema se encuentre en equilibrio:

$$Z = 22761N = 1977.9 \cdot f_c \Rightarrow f_c = 11.50MPa \text{ de media en el área del segmento circular.}$$

Concluyendo:

Conociendo el área de contacto, podemos realizar la comprobación de cuál es la profundidad de las presiones, despejando de las ecuaciones de equilibrio "Z" y "x". Obteniendo una solución lógica para el caso de perfiles circulares.

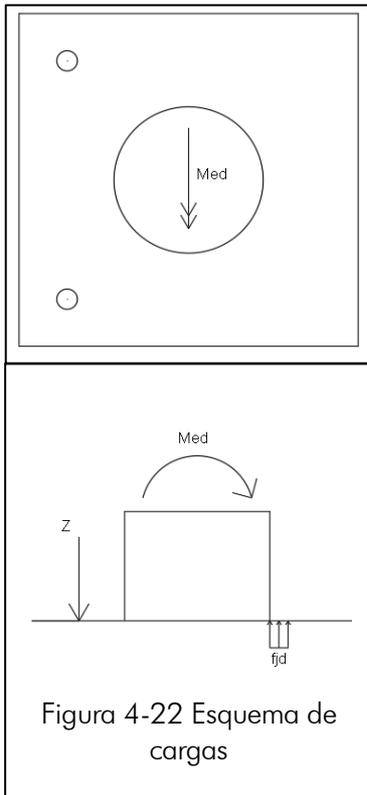
La propuesta para este trabajo fin de grado será realizar la comprobación según la normativa, utilizando la ecuación del segmento circular en lugar de utilizar "c". Tras unas operaciones geométricas, se llega a la ecuación de la superficie en función de "x".

$$A = r_h^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r}\right)\right) \right) \quad (4-1)$$

De la distribución de presiones, determinamos que el baricentro de presiones se encuentra en $x/4$

4.4 Método analítico propuesto

Para verificar que las hipótesis de cálculo realizadas son eficaces para el cálculo de placas de anclaje con perfiles circulares, realizaremos el ejemplo del apartado 4, pero utilizando la normativa modificada.



Datos:

Geométricos:

Dimensiones de la placa: 300x300x6mm

Perfil tubular circular: $r=66\text{mm}$, $t_{\text{perfil}}=3\text{mm}$

Distancia de los pernos al borde (g)= 42.5mm

Materiales:

Hormigón HA-25

Acero S-235JR

Cargas:

$N_{\text{ed}}=0\text{ kN}$

$M_{\text{ed}}=3.85\text{kN/m}$

Paso 0. Obtención de dimensiones restantes y resistencias de los materiales

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{ck} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot \frac{25}{1.5} = 22.13\text{MPa}$$

Paso 1.- Planteamiento de las ecuaciones de equilibrio

Una vez obtenidas todas las variables que intervienen en las ecuaciones de equilibrio, procedemos a plantearlas. Como hemos incluido la incógnita dentro de una relación trigonométrica, tendremos que iterar.

$$\sum F = 0 \rightarrow N_{ed} + Z - A' \cdot f_{jd} = 0; Z = r_h^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right)\right) \right) \cdot f_{jd}$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_{ed} - r_h^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right)\right) \right) \cdot f_{jd} \left(\frac{a}{2} - g + r_h + \frac{x}{4} \right) = 0$$

Sustituyendo:

$$\sum F = 0 \rightarrow Z = 66^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{66}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{66}\right)\right) \right) \cdot 22.13$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow 3.85 \cdot 10^6 - 66^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{66}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{66}\right)\right) \right) \cdot 22.13 \left(150 - 42.5 + 66 + \frac{x}{4} \right) = 0$$

Resolviendo la ecuación de momentos, la profundidad de las compresiones "x" es de **x=16.411mm**

Despejando Z en la ecuación de equilibrio de fuerzas: **Z=21677.59N**

Con una diferencia respecto al modelizado de elementos finitos de: $\frac{22761-21677.59}{22761} \cdot 100 = 4.76\%$

$$c = t \left(\frac{f_y}{3f_{jd}\gamma_{m0}} \right)^{\frac{1}{2}} = 6 \cdot \left(\frac{235/1.05}{3 \cdot 22.13} \right)^{\frac{1}{2}} = 11.016mm$$

Paso 2.- Comprobación de las dimensiones de la placa

$$x < (t + 2 \cdot c); 16.411mm \leq 28.032mm \rightarrow \text{Cumple}$$

Paso 3.- Comprobación del espesor suficiente de la placa

$$M_{ed(1)} = r_h^2 \cdot \left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{sen}\left(\arccos\left(1 - \frac{x}{r_h}\right)\right) \right) \cdot f_{jd} \cdot \frac{x}{4} = 88937.724 N \cdot mm$$

$$M_{ed(2)} = Z \cdot \left(\frac{a}{2} - r_h - g \right) = 21677.59 \cdot \left(\frac{300}{2} - 66 - 42.5 \right) = 899619.985 N \cdot mm$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{t^2 \cdot f_y}{4\gamma_{m0}} = \frac{6^2 \cdot 235000}{4 \cdot 1.05} = 2014285.714 N \cdot mm$$

Las dimensiones de la placa son suficientes para resistir la carga actuante

5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

5.1.- Cálculo de placas de anclaje según Normativa

El estudio incluido en este capítulo está dedicado a focalizar la teoría existente sobre el cálculo de placas de anclaje. Se determina que hay dos formas de cálculo, una siguiendo la metodología Americana de la ACI y otra siguiendo la metodología de la normativa europea.

El capítulo se centró en el desarrollo de la normativa europea, por ser esta la que nos atañe.

Se deducen una serie de ideas para el cálculo de placas de anclaje sometidas a flexocompresión, las cuales se pueden resumir en las siguientes:

- El modelo a seguir es un modelo 2D, un corte vertical en la geometría de la placa en su punto central.
- La zona que transmite los esfuerzos de la placa hacia el soporte de hormigón es la zona portante, definida por "c", quedando delimitada para el caso de flexocompresión por "x".
- Se modeliza la influencia de los pernos por una fuerza "Z" y la reacción del hormigón queda definida por la zona portante y por su resistencia a compresión.
- Es un problema que se resuelve únicamente con las ecuaciones de equilibrio de fuerza vertical y momentos
- Una vez resueltas las ecuaciones de equilibrio se toman los momentos provocados por la reacción del hormigón y la fuerza Z de los pernos respecto al borde de perfil más próximo. Estos momentos se comparan con el momento resistente plástico de la placa de anclaje.

Asimismo, tras la realización de un ejercicio práctico con un perfil HEB, se determina:

- El cálculo de placas de anclaje para perfiles HEB, IPE y tubulares cuadrados seguirían el mismo procedimiento y tendrían el mismo resultado si los perfiles tienen el mismo canto.
- No es posible aplicar esta metodología sin incurrir a hipótesis no contrastadas para el caso de perfiles tubulares circulares.

5.2.- Cálculo de placas de anclaje mediante MEF

En este apartado se describió la modelización del caso del ejemplo práctico del apartado anterior con diferentes estrategias.

Para dar pie a análisis más complejos, se realizó un modelizado de dificultad baja, asumiendo las hipótesis de la normativa como base para poder comparar al final del subapartado los resultados obtenidos.

De este primer modelizado se sacan las siguientes conclusiones:

- El resultado que permite comparación es el valor de la fuerza Z que permite que el modelizado esté en equilibrio de fuerzas y de momentos. El resultado obtenido es que la diferencia que produce el modelizado mediante MEF respecto al cálculo según la normativa, es de un 7.5%, siendo los valores más desfavorables en el cálculo numérico, es decir, del lado de la seguridad.
- Sabiendo que el resultado es suficientemente exacto, a pesar de estar comparando un modelizado 2D con uno 3D incluso añadiendo no linealidad en el material, permitimos seguir añadiendo complejidad al modelizado de MEF.

En el segundo modelizado, se introduce el problema de contacto, pues se justifica que el contacto en placas

de anclaje es el fenómeno predominante.

Tras una descripción de los parámetros de entrada al modelizado de elementos finitos, se extraen unos resultados muy interesantes:

- La forma que tiene la zona de presiones de contacto, es análogo al que propone la normativa
- Las presiones de contacto que se generan son mucho menores a la resistencia del hormigón del soporte a compresión. Este resultado no es comparable al obtenido con la normativa, pues en ésta se fija de entrada este valor, y en el modelizado de MEF con contacto es un resultado final.
- La tensión de límite elástico se supera únicamente en zonas muy acotadas del espesor del perfil, no llegando al 8.5% del espesor del perfil plastificado. Además, justificamos que en el análisis de la normativa se permiten tensiones por encima del límite elástico, ya que utilizamos la expresión del momento resistente plástico para realizar las comprobaciones.
- En ningún caso se supera la tensión última del acero escogido para realizar el modelizado.
- Se determina que el análisis es satisfactorio y que la aplicación del problema de contacto es aplicable a toda clase de placas de anclaje, con todo tipo de perfiles.

5.3.- Cálculo de placas de anclaje con perfiles tubulares

El apartado 4 detalla el análisis de una placa de anclaje con un perfil tubular circular, con datos geométricos y de cargas reales. Se seguirá el esquema descrito con anterioridad en el modelizado con contacto del perfil HEB.

Tras la obtención de unos resultados similares cuantitativamente a los obtenidos anteriormente, se estudia la morfología de la solución de presiones de contacto en el caso de perfiles tubulares circulares, llegando a los siguientes razonamientos, comparándolos con los del modelizado 2:

- El contacto de la placa con el soporte comienza en el borde último del perfil anclado, en la zona que transmite compresión. Si se aumenta el momento flector de cálculo este contacto viaja desde este extremo del perfil hacia el borde de la placa, siguiendo una diagonal desde la esquina del perfil.
- Dado que los perfiles tubulares no tienen ningún tramo recto, esta diagonal se traza desde el extremo del perfil circular, no existiendo un tramo recto como propone la normativa.
- La forma del límite de contacto está estrechamente ligada a la forma del perfil tubular, se puede comprobar en vista de los resultados que la presión de contacto tiene la forma del reflejo del perfil circular.

Estos razonamientos dan pie a la proposición de una expresión matemática, la del sector circular, para delimitar las presiones de contacto, en lugar de utilizar la expresión de cálculo de área de una superficie rectangular.

Por último, se realiza la aplicación de la expresión propuesta para resolver el problema de la normativa con un perfil tubular circular, obteniendo unos resultados que, antes de la realización de este trabajo fin de grado, eran imposibles de obtener.

6 TRABAJOS FUTUROS

Viendo el potencial que tienen las herramientas de cálculo en la actualidad, junto a una normativa a la que ya han avalado infinidad de resultados experimentales, se podrían desarrollar toda clase de experimentos virtuales, no sólo para el caso de placas de anclaje, sino para cada uno de los sistemas estructurales que se estudian, para buscar el proceso de aprovechamiento máximo de los materiales.

De manera más concreta, el diseño de uniones tiene una franja amplia para seguir optimizándose, empleando métodos numéricos e incluyendo irregularidades en los materiales, contacto entre perno-anclaje-estructura, etc.

No obstante, centrándonos en el análisis de placas de anclaje, el trabajo fin de grado propuesto deja una puerta abierta para realizar los siguientes posibles trabajos futuros:

- Análisis experimental y virtual de placas de anclaje de perfiles tubulares circulares.
- Optimización de placas de anclaje mediante MEF.
- Análisis y parametrización de placas de anclaje de perfiles con sección genérica.
- Análisis y comprobación de placas de anclaje usando interacciones fluido-estructura (CFD).

7 REFERENCIAS

- [1] Eurocódigo 3: Diseño de Estructuras de Acero, Parte 1-8: Diseño de Uniones. Norma Europea, EN-1993-1-8, mayo de 2005.
- [2] CTE-DB-SE-A, Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad Estructural-Acero.
- [3] Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de Acero, Parte 1-1: Reglas generales y Reglas para edificación. Norma Europea, EN 1993-1-1, mayo de 2005.
- [4] UNE-EN 40-3-3: Columnas y báculos de alumbrado. Parte 3-3: Diseño y verificación. Verificación por cálculo, 2003
- [5] F. Owens, O. Hag-Elsafi, S. Alampalli, «A simplified Design Procedure For End-Plates and Base-Plates of Cantilevered Traffic Structures»
- [6] Instituto Técnico de la Estructura en Acero, «Tomo 13, Diseño de Uniones» ITEA, p. Tomo 13
- [7] R. Argüelles, «Tomo II, Estructuras de Acero: Uniones y Sistemas Estructurales», Bellisco, 2001
- [8] ANSYS, Inc, «ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide», noviembre de 2013
- [9] ANSYS, Inc, «Contact Analysis in ANSYS», 2004

8 ANEXOS

En los anexos que se muestran a continuación, se incluyen los códigos utilizados para generar el proyecto en ANSYS APDL, de perfiles tubulares con diferentes características.

7.1 Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material lineal, con contacto

```
!*****LOGFILE TFG*****!  
FINISH  
/CLEAR  
/PREP7  
  
!*****!  
!*****TIPO DE ELEMENTO*****!  
!*****!  
ET,1,SHELL181  
ET,2,CONTA173  
ET,3,TARGE170  
ET,4,BEAM188  
  
!*****!  
!***PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**!  
!*****!  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,1,,2.1e6*98.1  
MPDATA,PRXY,1,,0.3  
  
!*Material auxiliar  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,3,,2e15  
MPDATA,PRXY,3,,0.5  
  
!*****!  
k,1,0-0.15,0-0.15,0  
k,2,0.3-0.15,0-0.15,0  
k,3,0.3-0.15,0.3-0.15,0  
k,4,0-0.15,0.3-0.15,0  
!Puntos de los concentradores de tensión  
k,10,0.2646-0.15,0.0354-0.15  
k,11,0.2469-0.15,0.0319-0.15  
k,12,0.2504-0.15,0.0496-0.15  
k,13,0.2681-0.15,0.0531-0.15  
!Hacemos simetría  
FLST,3,4,3,ORDE,2  
FITEM,3,10  
FITEM,3,-13  
KSYMM,X,P51X, , , ,0,0  
FLST,3,8,3,ORDE,4  
FITEM,3,5  
FITEM,3,-8  
FITEM,3,10  
FITEM,3,-13  
KSYMM,Y,P51X, , , ,0,0  
  
!Introducimos lineas y splines  
LSTR,1,2  
LSTR,2,3  
LSTR,3,4  
LSTR,4,1
```

	LSTR, 26, 25
FLST,2,5,3	LSTR, 25, 24
FITEM,2,6	LSTR, 24, 23
FITEM,2,5	LSTR, 23, 22
FITEM,2,8	LSTR, 22, 21
FITEM,2,7	LSTR, 21, 28
FITEM,2,6	LSTR, 28, 27
SPLINE,P51X	LSTR, 27, 26
FLST,2,5,3	k,0,0,0
FITEM,2,16	LSTR, 25, 29
FITEM,2,9	LSTR, 29, 23
FITEM,2,14	LSTR, 29, 21
FITEM,2,15	LSTR, 29, 27
FITEM,2,16	FLST,2,2,4
SPLINE,P51X	FITEM,2,30
FLST,2,5,3	FITEM,2,24
FITEM,2,20	AL,P51X
FITEM,2,19	FLST,2,2,4
FITEM,2,18	FITEM,2,31
FITEM,2,17	FITEM,2,23
FITEM,2,20	AL,P51X
SPLINE,P51X	FLST,2,2,4
FLST,2,5,3	FITEM,2,22
FITEM,2,11	FITEM,2,32
FITEM,2,12	AL,P51X
FITEM,2,13	FLST,2,2,4
FITEM,2,10	FITEM,2,21
FITEM,2,11	FITEM,2,33
SPLINE,P51X	AL,P51X
FLST,2,2,8	FLST,2,2,4
FITEM,2,0,0,0	FITEM,2,28
FITEM,2,0.066,0,0	FITEM,2,34
CIRCLE,P51X,,,,,360,8	AL,P51X
	FLST,2,2,4
	FITEM,2,27
	FITEM,2,35
!Creamos el area de la placa base	AL,P51X
!con lineas aux	FLST,2,2,4

FITEM,2,26					K, ,P51X
FITEM,2,36					FLST,3,2,8
AL,P51X					FITEM,3,-0.1,0.5E-01,0
FLST,2,2,4					FITEM,3,-0.1,-0.5E-01,0
FITEM,2,25					K, ,P51X
FITEM,2,29					FLST,3,2,8
AL,P51X					FITEM,3,0.1,0.5E-01,0
FLST,2,4,4					FITEM,3,0.1,-0.5E-01,0
FITEM,2,37					K, ,P51X
FITEM,2,30					FLST,3,2,8
FITEM,2,31					FITEM,3,0.5E-01,-0.1,0
FITEM,2,38					FITEM,3,-0.5E-01,-0.1,0
AL,P51X					K, ,P51X
FLST,2,4,4					LSTR, 15, 31
FITEM,2,39					LSTR, 31, 24
FITEM,2,38					LSTR, 31, 30
FITEM,2,32					LSTR, 30, 22
FITEM,2,33					LSTR, 30, 19
AL,P51X					LSTR, 24, 32
FLST,2,4,4					LSTR, 32, 15
FITEM,2,40					LSTR, 26, 33
FITEM,2,39					LSTR, 33, 7
FITEM,2,34					LSTR, 7, 26
FITEM,2,35					LSTR, 32, 33
AL,P51X					LSTR, 8, 16
FLST,2,4,4					LSTR, 22, 34
FITEM,2,37					LSTR, 34, 19
FITEM,2,40					LSTR, 20, 13
FITEM,2,36					LSTR, 28, 35
FITEM,2,29					LSTR, 34, 35
AL,P51X					LSTR, 35, 12
					LSTR, 28, 12
LSTR, 14, 18					LSTR, 12, 36
LSTR, 15, 24					LSTR, 36, 28
LSTR, 19, 22					LSTR, 26, 37
FLST,3,2,8					LSTR, 37, 36
FITEM,3,0.5E-01,0.1,0					LSTR, 7, 37
FITEM,3,-0.5E-01,0.1,0					LSTR, 6, 11

LSTR, 17, 3	FITEM,2,52
LSTR, 9, 4	FITEM,2,51
LSTR, 5, 1	AL,P51X
LSTR, 10, 2	FLST,2,3,4
FLST,2,5,4	FITEM,2,49
FITEM,2,22	FITEM,2,50
FITEM,2,23	FITEM,2,42
FITEM,2,45	AL,P51X
FITEM,2,46	FLST,2,6,4
FITEM,2,47	FITEM,2,50
AL,P51X	FITEM,2,12
FLST,2,3,4	FITEM,2,55
FITEM,2,42	FITEM,2,7
FITEM,2,44	FITEM,2,52
FITEM,2,45	FITEM,2,54
AL,P51X	AL,P51X
FLST,2,6,4	FLST,2,3,4
FITEM,2,44	FITEM,2,57
FITEM,2,11	FITEM,2,56
FITEM,2,41	FITEM,2,43
FITEM,2,14	AL,P51X
FITEM,2,48	FLST,2,6,4
FITEM,2,46	FITEM,2,13
AL,P51X	FITEM,2,58
FLST,2,3,4	FITEM,2,18
FITEM,2,43	FITEM,2,61
FITEM,2,47	FITEM,2,60
FITEM,2,48	FITEM,2,57
AL,P51X	AL,P51X
FLST,2,5,4	FLST,2,5,4
FITEM,2,24	FITEM,2,21
FITEM,2,49	FITEM,2,56
FITEM,2,54	FITEM,2,60
FITEM,2,51	FITEM,2,59
FITEM,2,25	FITEM,2,28
AL,P51X	AL,P51X
FLST,2,3,4	FLST,2,3,4
FITEM,2,53	FITEM,2,59

FITEM,2,61
FITEM,2,62
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,62
FITEM,2,63
FITEM,2,64
AL,P51X
FLST,2,5,4
FITEM,2,27
FITEM,2,64
FITEM,2,66
FITEM,2,26
FITEM,2,65
AL,P51X
FLST,2,3,4
FITEM,2,53
FITEM,2,65
FITEM,2,67
AL,P51X
FLST,2,6,4
FITEM,2,8
FITEM,2,67
FITEM,2,66
FITEM,2,63
FITEM,2,17
FITEM,2,68
AL,P51X
FLST,2,6,4
FITEM,2,70
FITEM,2,3
FITEM,2,69
FITEM,2,15
FITEM,2,41
FITEM,2,10
AL,P51X
FLST,2,6,4
FITEM,2,16

FITEM,2,69
FITEM,2,2
FITEM,2,19
FITEM,2,72
FITEM,2,58
AL,P51X
FLST,2,6,4
FITEM,2,71
FITEM,2,1
FITEM,2,5
FITEM,2,68
FITEM,2,20
FITEM,2,72
AL,P51X
FLST,2,6,4
FITEM,2,71
FITEM,2,4
FITEM,2,70
FITEM,2,9
FITEM,2,55
FITEM,2,6
AL,P51X

FLST,5,12,5,ORDE,9
FITEM,5,12
FITEM,5,-13
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
FITEM,5,19
FITEM,5,23
FITEM,5,-27
FITEM,5,29
FITEM,5,32
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y

!* AREVERSE,_Y1,0 CMDELE,_Y1 !Divisiones de malla comunes FLST,5,36,4,ORDE,12 FITEM,5,21 FITEM,5,-36 FITEM,5,42 FITEM,5,-45 FITEM,5,47 FITEM,5,-53 FITEM,5,56 FITEM,5,-57 FITEM,5,59 FITEM,5,61 FITEM,5,-65 FITEM,5,67 CM,_Y,LINE LSEL, , , ,P51X CM,_Y1,LINE CMSEL,,_Y !* LESIZE,_Y1, , ,30, , , ,1 !* FLST,5,4,4,ORDE,2 FITEM,5,37 FITEM,5,-40 CM,_Y,LINE LSEL, , , ,P51X CM,_Y1,LINE CMSEL,,_Y !* LESIZE,_Y1, , ,50, , , ,1 !* FLST,5,4,4,ORDE,4 FITEM,5,46	FITEM,5,54 FITEM,5,60 FITEM,5,66 CM,_Y,LINE LSEL, , , ,P51X CM,_Y1,LINE CMSEL,,_Y !* LESIZE,_Y1, , ,50, , , ,1 !* FLST,5,4,4,ORDE,4 FITEM,5,41 FITEM,5,55 FITEM,5,58 FITEM,5,68 CM,_Y,LINE LSEL, , , ,P51X CM,_Y1,LINE CMSEL,,_Y !* LESIZE,_Y1, , ,80, , , ,1 !* FLST,5,16,4,ORDE,2 FITEM,5,5 FITEM,5,-20 CM,_Y,LINE LSEL, , , ,P51X CM,_Y1,LINE CMSEL,,_Y !* LESIZE,_Y1, , ,8, , , ,1 !* FLST,5,4,4,ORDE,2 FITEM,5,1 FITEM,5,-4
---	--

```

CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , , ,100, , , , ,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,69
FITEM,5,-72
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , , ,25, , , , ,1
!*
CSWPLA,11,0,1,1,

!*****!
!*****MALLADO DE LA PLACA*****!
!*****!

!Procedemos al mallado de la placa base como
!un shell181
sect,2,shell,,Placabase
secddata, 0.006,1,0,3
secoffset, TOP
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1

TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 11
SECNUM, 2
!*
AMESH,ALL
!Creamos el poste

k,0,0,0,0.1
LSTR, 29, 38
FLST,2,8,4,ORDE,2
FITEM,2,21
FITEM,2,-28
ADRAG,P51X, , , , , 73

!*****!
!*****MALLADO DEL POSTE*****!
!*****!

sect,1,shell,,Poste
secddata, 0.003,1,0,3
secoffset, TOP
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
!Mallamos el poste
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 1
!*
FLST,5,8,4,ORDE,8
FITEM,5,74
FITEM,5,77
FITEM,5,79
FITEM,5,81
FITEM,5,83
FITEM,5,85
FITEM,5,87
FITEM,5,89
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , , ,30, , , , ,1

```

```

!*
AMESH,33,40,1

!*****!
!*****ECUACIONES DE LIGADURA*****!
!*****!

!Procedemos a hacer un CERIG en los puntos del
poste
!para acoplar los esfuerzos al nodo central
NKPT,0, 38
FLST,5,240,1,ORDE,23
FITEM,5,27919
FITEM,5,27925
FITEM,5,-27954
FITEM,5,28105
FITEM,5,28111
FITEM,5,-28139
FITEM,5,28285
FITEM,5,28291
FITEM,5,-28319
FITEM,5,28465
FITEM,5,28471
FITEM,5,-28499
FITEM,5,28645
FITEM,5,28651
FITEM,5,-28679
FITEM,5,28825
FITEM,5,28831
FITEM,5,-28859
FITEM,5,29005
FITEM,5,29011
FITEM,5,-29039
FITEM,5,29185
FITEM,5,-29213
/NOPR
CM,_NODECM,NODE
*SET,_z1, 29359

```

```

NSEL,S,,P51X
NSEL,A,,_Z1
CM,_CERGCM,NODE
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*
/NOPR
CMSEL,S,_CERGCM
/GO
CERIG,29359,ALL,ALL,, , ,
/NOPR
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*

!*****!
!*****ELEMENTO AUXILIAR*****!
!*****!

!Creamos un elemento BEAM auxiliar para que
inserte
!el nodo central en las matrices
SECTYPE, 3, BEAM, RECT, Aux, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.001,0.001,0,0,0,0,0,0,0,0,0
TYPE, 4
MAT, 3
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 3
TSHAP,LINE
!*
E,28465,29359
E,27925,29359

!*****!
!*****CONDICIONES DE CONTORNO*****!
!*****!

```

!Procedemos a establecer las CC

FLST,2,128,1,ORDE,29

FITEM,2,10054

FITEM,2,10744

FITEM,2,10774

FITEM,2,-10782

FITEM,2,10862

FITEM,2,-10868

FITEM,2,13501

FITEM,2,14851

FITEM,2,-14859

FITEM,2,14939

FITEM,2,-14945

FITEM,2,16379

FITEM,2,-16386

FITEM,2,16437

FITEM,2,16467

FITEM,2,-16474

FITEM,2,21632

FITEM,2,-21640

FITEM,2,21720

FITEM,2,-21726

FITEM,2,22475

FITEM,2,-22490

FITEM,2,23875

FITEM,2,-23889

FITEM,2,25230

FITEM,2,25355

FITEM,2,-25368

FITEM,2,26590

FITEM,2,-26603

!*

/GO

D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,

!*****!

!**APLICACIÓN FUERZAS Y MOMENTOS**!

!*****!

!Aplicamos el momento y la fuerza en el nodo central

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,29359

!*

/GO

F,P51X,MY,3.85 !mkN

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,29359

!*

/GO

F,P51X,FZ,-30*9.81/1000 !kN

!*****!

!*****CONTACTO*****!

!*****!

!Primero definimos la superficie objetivo

FLST,3,4,4,ORDE,2

FITEM,3,1

FITEM,3,-4

LGEN,2,P51X, , , , , -0.00000001, ,0

FLST,2,4,4

FITEM,2,90

FITEM,2,93

FITEM,2,92

FITEM,2,91

AL,P51X

/COM, CONTACT PAIR CREATION - START

CM,_NODECM,NODE

CM,_ELEMCM,ELEM

CM,_KPCM,KP

CM,_LINECM,LINE

CM,_AREACM,AREA

CM,_VOLUCM,VOLU

```

/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,
MAT,1
R,3,0,0,10,0,0,0
REAL,3
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,41
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,5,-1
TYPE,5
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,8
ASEL,A,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,12
ASEL,A,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
ASEL,A,,,17
ASEL,A,,,18
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,20
ASEL,A,,,21
ASEL,A,,,22
ASEL,A,,,23
ASEL,A,,,24
ASEL,A,,,25
ASEL,A,,,26
ASEL,A,,,27
ASEL,A,,,28
ASEL,A,,,29
ASEL,A,,,30
ASEL,A,,,31
ASEL,A,,,32
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109
8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM

```

```

CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
FLST,5,27679,2,ORDE,2
FITEM,5,39122
FITEM,5,-66800
CM,_ELMCM,ELEM
ESEL,S, , ,P51X
ESURF,,REVERSE

!*****!
!*****EXTRACCIÓN DE RESULTADOS*****!
!*****!

/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
*ask,ENTER para ver tensiones,1
PLESOL, S,EQV, 0,1.0

!*****!
!*****SOLUCIÓN*****!
!*****!

allsel
!Solucionamos el problema no lineal
FINISH
/SOL
NLGEOM,ON
NSUBST,20,1000
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
LNSRCH,ON
SOLVE
FINISH

```

7.2 Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material lineal, sin contacto

```

!*****!
!*****LOGFILE TFG*****!
!*****!

FINISH
/CLEAR
/PREP7

!*****!
!*****TIPO DE ELEMENTO*****!
!*****!

ET,1,SHELL181
ET,2,CONTA173
ET,3,TARGE170
ET,4,BEAM188

!*****!
!***PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**!
!*****!

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e6*98.1
MPDATA,PRXY,1,,0.3

!*Material auxiliar
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,2e15
MPDATA,PRXY,3,,0.5

!*****!
!*****GEOMETRÍA*****!
!*****!

k,1,0-0.15,0-0.15,0
k,2,0.3-0.15,0-0.15,0
k,3,0.3-0.15,0.3-0.15,0
k,4,0-0.15,0.3-0.15,0

!Puntos de los concentradores de tensión
k,10,0.2646-0.15,0.0354-0.15
k,11,0.2469-0.15,0.0319-0.15
k,12,0.2504-0.15,0.0496-0.15
k,13,0.2681-0.15,0.0531-0.15

!Hacemos simetría
FLST,3,4,3,ORDE,2
FITEM,3,10
FITEM,3,-13
KSYMM,X,P51X, , , ,0,0
FLST,3,8,3,ORDE,4
FITEM,3,5
FITEM,3,-8
FITEM,3,10
FITEM,3,-13
KSYMM,Y,P51X, , , ,0,0

!Introducimos lineas y splines
LSTR,1,2
LSTR,2,3
LSTR,3,4
LSTR,4,1

FLST,2,5,3
FITEM,2,6
FITEM,2,5

```

FITEM,2,8
 FITEM,2,7
 FITEM,2,6
 SPLINE,P51X
 FLST,2,5,3
 FITEM,2,16
 FITEM,2,9
 FITEM,2,14
 FITEM,2,15
 FITEM,2,16
 SPLINE,P51X
 FLST,2,5,3
 FITEM,2,20
 FITEM,2,19
 FITEM,2,18
 FITEM,2,17
 FITEM,2,20
 SPLINE,P51X
 FLST,2,5,3
 FITEM,2,11
 FITEM,2,12
 FITEM,2,13
 FITEM,2,10
 FITEM,2,11
 SPLINE,P51X
 FLST,2,2,8
 FITEM,2,0,0,0
 FITEM,2,0.066,0,0
 CIRCLE,P51X

!Creamos el area de la placa base
 lsel,all
 AL,all
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,23
 FITEM,2,21
 FITEM,2,22

FITEM,2,24
 AL,P51X
 !Creamos el poste
 k,29,0,0,0
 k,30,0,0,0.1
 LSTR, 29, 30
 FLST,2,4,4,ORDE,2
 FITEM,2,21
 FITEM,2,-24
 ADRAG,P51X, , , , , 25

!*****!
 !*****MALLADO DEL POSTE*****!
 !*****!

sect,1,shell,,Poste
 secdata, 0.003,1,0,3
 secoffset, TOP
 seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
 !Mallamos el poste
 TYPE, 1
 MAT, 1
 REAL,
 ESYS, 0
 SECNUM, 1
 !*
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 !*
 FLST,2,4,5,ORDE,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,-6
 AESIZE,P51X,0.005,
 FLST,5,4,5,ORDE,2
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-6

```

CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

!Para ver mientras bien el modelo

```

GPLOT
!*
/SHRINK,0
/ESHAPE,1
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
/REPLOT
!*

```

```

!*****
!*****ECUACIONES DE LIGADURA *****
!*****

```

!Procedemos a hacer un CERIG en los puntos del poste

!para acoplar los esfuerzos al nodo central

```

NKPT,0, 30
FLST,5,85,1,ORDE,12
FITEM,5,23
FITEM,5,43
FITEM,5,-63
FITEM,5,484

```

```

FITEM,5,504
FITEM,5,-523
FITEM,5,925
FITEM,5,945
FITEM,5,-964
FITEM,5,1365
FITEM,5,-1384
FITEM,5,1765
/NOPR
CM,_NODECM,NODE
*SET,_z1, 1765
NSEL,S, , ,P51X
NSEL,A, , ,_Z1
CM,_CERGCM,NODE
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*
/NOPR
CMSEL,S,_CERGCM
/GO
CERIG,1765,ALL,ALL, , , ,
/NOPR
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*

```

```

!*****
!*****MALLADO DE LA PLACA *****
!*****

```

!Procedemos al mallado de la placa base como

```

!un shell181
sect,2,shell,,Placabase
secdata, 0.006,1,0,3
secoffset, TOP
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1

```

```

TYPE, 1

```

```

MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 2
!*

FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,21
FITEM,5,-24
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,0.005, , , , , ,1
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.005,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

*****ELEMENTO AUXILIAR*****
!Creamos un elemento BEAM auxiliar para que
inserte
!el nodo central en las matrices
SECTYPE, 3, BEAM, RECT, Aux, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.001,0.001,0,0,0,0,0,0,0,0,0
TYPE, 4
MAT, 3
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 3
TSHAP,LINE
!*
E,484,1765
E,43,1765

*****CONDICIONES DE CONTORNO*****
!Procedemos a establecer las CC
FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2006
FITEM,2,-2021
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,
FLST,2,16,1,ORDE,2

```

```

FITEM,2,2054
FITEM,2,-2069
!*
/GO
D,P51X,,,,,ALL,,,,,

FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2038
FITEM,2,-2053
!*
/GO
D,P51X,,,,,ALL,,,,,

FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2022
FITEM,2,-2037
!*
/GO
D,P51X,,,,,ALL,,,,,

*****!
**APLICACIÓN FUERZAS Y MOMENTOS**!
*****!

!Aplicamos el momento y la fuerza en el nodo
central

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1765
!*
/GO
F,P51X,MY,3.85 !mkN
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1765
!*
/GO
F,P51X,FZ,-30*9.81/1000 !kN

*****!
*****SOLUCIÓN*****!
*****!

!Solucionamos
FINISH
/SOL
SOLVE

*****!
*****EXTRACCIÓN DE RESULTADOS*****!
*****!

!Resultados
FINISH
/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
*ask,ENTER para ver tensiones,1
PLESOL, S,EQV, 0,1.0

```

7.3 Placa de anclaje con perfil tubular, elemento shell, material no lineal, con contacto

```

!*****LOGFILE TFG*****!
FINISH
/CLEAR
/PREP7

!*****!
!*****TIPO DE ELEMENTO*****!
!*****!
ET,1,SHELL181
ET,2,CONTA173
ET,3,TARGE170
ET,4,BEAM188

!*****!
!** PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**!
!*****!

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e6*100
MPDATA,PRXY,1,,0.3
!Introducimos la no linealidad del acero
TBDE,KINH,1,,,
TB,KINH,1,1,2,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.002*0.5595,2.35E+005
TBPT,,0.01*0.5595,3.6E+005

!*Material auxiliar
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,2e15
MPDATA,PRXY,3,,0.5

!*****!
!*****GEOMETRÍA*****!
!*****!
k,1,0-0.15,0-0.15,0
k,2,0.3-0.15,0-0.15,0
k,3,0.3-0.15,0.3-0.15,0
k,4,0-0.15,0.3-0.15,0
!Puntos de los concentradores de tensión
k,10,0.2646-0.15,0.0354-0.15
k,11,0.2469-0.15,0.0319-0.15
k,12,0.2504-0.15,0.0496-0.15
k,13,0.2681-0.15,0.0531-0.15
!Hacemos simetría
FLST,3,4,3,ORDE,2
FITEM,3,10
FITEM,3,-13
KSYMM,X,P51X, , , ,0,0
FLST,3,8,3,ORDE,4
FITEM,3,5
FITEM,3,-8
FITEM,3,10
FITEM,3,-13
KSYMM,Y,P51X, , , ,0,0
!Introducimos lineas y splines
LSTR,1,2
LSTR,2,3
LSTR,3,4
LSTR,4,1
FLST,2,5,3
FITEM,2,6
FITEM,2,5
FITEM,2,8

```

FITEM,2,7	AL,P51X
FITEM,2,6	
SPLINE,P51X	!Creamos el poste
FLST,2,5,3	k,29,0,0,0
FITEM,2,16	k,30,0,0,0.1
FITEM,2,9	LSTR, 29, 30
FITEM,2,14	FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,15	FITEM,2,21
FITEM,2,16	FITEM,2,-24
SPLINE,P51X	ADRAG,P51X, , , , , 25
FLST,2,5,3	
FITEM,2,20	!*****!
FITEM,2,19	!*****MALLADO DEL POSTE*****!
FITEM,2,18	!*****!
FITEM,2,17	
FITEM,2,20	sect,1,shell,,Poste
SPLINE,P51X	secdata, 0.003,1,0,3
FLST,2,5,3	secoffset, TOP
FITEM,2,11	seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
FITEM,2,12	!Mallamos el poste
FITEM,2,13	TYPE, 1
FITEM,2,10	MAT, 1
FITEM,2,11	REAL,
SPLINE,P51X	ESYS, 0
FLST,2,2,8	SECNUM, 1
FITEM,2,0,0,0	!*
FITEM,2,0.066,0,0	MSHAPE,0,2D
CIRCLE,P51X	MSHKEY,0
	!*
	FLST,2,4,5,ORDE,2
!Creamos el area de la placa base	FITEM,2,3
lsel,all	FITEM,2,-6
AL,all	AESIZE,P51X,0.005,
FLST,2,4,4	
FITEM,2,23	FLST,5,4,5,ORDE,2
FITEM,2,21	FITEM,5,3
FITEM,2,22	FITEM,5,-6
FITEM,2,24	CM,_Y,AREA

```

ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

```

!*****!
!*****ECUACIONES DE LIGADURA*****!
!*****!

```

!Procedemos a hacer un CERIG en los puntos del poste

!para acoplar los esfuerzos al nodo central

```

NKPT,0, 30
FLST,5,85,1,ORDE,12
FITEM,5,23
FITEM,5,43
FITEM,5,-63
FITEM,5,484
FITEM,5,504
FITEM,5,-523
FITEM,5,925
FITEM,5,945
FITEM,5,-964
FITEM,5,1365
FITEM,5,-1384
FITEM,5,1765
/NOPR
CM,_NODECM,NODE
*SET,_z1, 1765
NSEL,S, , ,P51X
NSEL,A, , ,_Z1

```

```

CM,_CERGCM,NODE
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*
/NOPR
CMSEL,S,_CERGCM
/GO
CERIG,1765,ALL,ALL, , , ,
/NOPR
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*

```

```

!*****!
!*****MALLADO DE LA PLACA*****!
!*****!

```

!Procedemos al mallado de la placa base como

!un shell181

```

sect,2,shell,,Placabase
secdata, 0.006,1,0,3
secoffset, TOP
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1

```

```

TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 2
!*

```

```

FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,21
FITEM,5,-24
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

```

```

!*
LESIZE,_Y1,0.005, , , , , 1
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.005,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!*****ELEMENTO AUXILIAR*****!
!*
!Creamos un elemento BEAM auxiliar para que
inserte
!el nodo central en las matrices
SECTYPE, 3, BEAM, RECT, Aux, 0

```

```

SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.001,0.001,0,0,0,0,0,0,0,0,0
TYPE, 4
MAT, 3
REAL,
ESYS, 0
SECNUM, 3
TSHAP,LINE
!*
E,484,1765
E,43,1765

!*****!
!*****CONDICIONES DE CONTORNO*****!
!*****!

!Procedemos a establecer las CC
FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2006
FITEM,2,-2021
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,

FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2054
FITEM,2,-2069
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,

FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2038
FITEM,2,-2053
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,

```

```

FLST,2,16,1,ORDE,2
FITEM,2,2022
FITEM,2,-2037
!*
/GO
D,P51X, , , , ,ALL, , , , ,

!*****!
!**APLICACIÓN FUERZAS Y MOMENTOS**!
!*****!

!Aplicamos el momento y la fuerza en el nodo
central

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1765
!*
/GO
F,P51X,MY,3.85 !mkN

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1765
!*
/GO
F,P51X,FZ,-30*9.81/1000 !kN

!*****!
!*****CONTACTO*****!
!*****!

!Primero definimos la superficie objetivo

R,2, , , 10, , , ,
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-2
AGEN,2,P51X, , , , , -0.000001, , 1
ALLSEL
FLST,5,2,5,ORDE,2

```

```

FITEM,5,7
FITEM,5,-8
ASEL,S, , ,P51X
TYPE, 3
MAT,
REAL, 2
ESYS, 0
AESIZE,ALL,0.005,
SECNUM, ,
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,54
FITEM,5,-57
CM, _Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM, _Y1,LINE
CMSEL, , _Y
!*
LESIZE, _Y1,0.005, , , , , , 1
!*
AMESH,ALL

ALLSEL
!Lo siguiente es definir la superficie contacto
TYPE, 2
MAT,
REAL, 2
ESYS, 0
FLST,5,3870,1,ORDE,10
FITEM,5,1
FITEM,5,-22
FITEM,5,463
FITEM,5,-483
FITEM,5,904
FITEM,5,-924
FITEM,5,1345
FITEM,5,-1364
FITEM,5,1766
FITEM,5,-5551

```

```

NSEL,S,,P51X
FLST,5,3870,1,ORDE,10
FITEM,5,1
FITEM,5,-22
FITEM,5,463
FITEM,5,-483
FITEM,5,904
FITEM,5,-924
FITEM,5,1345
FITEM,5,-1364
FITEM,5,1766
FITEM,5,-5551
CM,_Y,NODE
NSEL,,P51X
CM,_Y1,NODE
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,,_Y1
ESURF,,BOT,
CMSEL,,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
ALLSEL

```

```

SOLVE
FINISH

```

```

!*****!
!***EXTRACCIÓN DE RESULTADOS***!
!*****!

```

```

/POST1
/EFACET,1
PLNSOL,U,SUM,0,10.0
*ask,ENTER para ver tensiones,1
PLESOL,S,EQV,0,1.0

```

```

!*****!
!*****SOLUCIÓN*****!
!*****!

```

!Solucionamos el problema no lineal

```

FINISH
/SOL
NLGEOM,ON
NSUBST,20,1000
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
LNSRCH,ON

```