

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica

Proyecto Final de Carrera



Autor: Adrián Martín Rodríguez
Tutor: Alejandro Quesada González
Departamento: Ingeniería Mecánica
Titulación: Ingeniería Industrial
Universidad Carlos III de Madrid
Noviembre 2010

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Objetivos.....	9
1.2 Antecedentes.....	9
1.2.1 Proyecto en el que se basa.....	9
1.2.1.1 La solución adoptada para el diseño.....	10
1.2.2 Código técnico de la edificación.....	12
1.2.2.1 Ámbito de aplicación.....	12
1.2.2.2 Documentación.....	13
1.2.2.3 Estados limites.....	13
1.2.2.4 Verificaciones.....	14
1.2.2.5 Flecha relativa.....	16
1.2.2.6 Resistencia de cálculo.....	16
1.2.3 Materiales.....	18
2 SOLICITACIONES DE CÁLCULO.....	19
3 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	20
3.1 Formulación general.....	20
3.1.1 Elemento.....	21
3.1.2 Campo de desplazamiento del elemento.....	21
3.1.2.1 Campo de deformaciones del elemento.....	22
3.1.2.2 Campo de esfuerzos del elemento.....	22
3.1.2.3 Equilibrio del elemento.....	23
3.1.2.4 Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo.....	24
3.2 La herramienta de ANSYS.....	24
3.2.1 Métodos de resolución de ANSYS.....	25

4	METODOLOGÍA.....	28
4.1	Resultados del modelo originario.....	29
4.2	Elaboración del modelo con elementos tipo barra.....	30
4.2.1	Objetivos del modelo de barras.....	30
4.2.2	Las características principales del modelo de barras.....	30
4.2.2.1	Elementos utilizados.....	30
4.2.2.2	Geometría y construcción del modelo.....	31
4.2.2.3	Mallado.....	37
4.2.2.4	Solución del modelo.....	37
4.2.3	Conclusiones.....	40
4.3	Elaboración del modelo con elementos tipo placa.....	41
4.3.1	Objetivos del modelo de placas.....	41
4.3.2	Las características principales del modelo de placas.....	41
4.3.2.1	Elementos utilizados.....	41
4.3.2.2	Mallado.....	42
4.3.2.3	Geometría y construcción del modelo.....	43
4.3.2.4	Solución del modelo.....	48
4.3.2.5	Simulación de la placa de asiento.....	52
4.3.3	Conclusiones.....	54
4.4	Modelo con placa superior.....	55
4.4.1	Objetivos del modelo.....	55
4.4.2	Características principales del modelo de placas con suelo.....	55
4.4.2.1	Elementos utilizados.....	55
4.4.2.2	Geometría y construcción del modelo.....	55
4.4.2.3	Mallado.....	56

4.4.2.4 Solución del modelo.....	60
4.4.3 Conclusiones.....	62
4.5 Vibración de la estructura.....	63
4.6 Modelización de la soldadura con elementos sólidos.....	65
4.6.1 Objetivos del modelo.....	65
4.6.2 Características principales del modelo.....	65
4.6.2.1 Uniones soldadas.....	67
4.6.2.2 Elementos utilizados.....	68
4.6.2.3 Construcción y geometría del modelo.....	68
4.6.2.4 Mallado.....	69
4.6.2.5 Aplicación de las cargas.....	72
4.6.2.6 Resultados.....	62
4.6.3 Conclusiones.....	77
4.7 Solución de diseño.....	78
4.7.1 Objetivos de la simulación.....	78
4.7.2 Características principales del modelo.....	78
4.7.3 Resultados.....	79
4.7.4 Conclusiones.....	81
5 PRESUPUESTO.....	82
6 CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	84
7 TRABAJOS FUTUROS.....	86
8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cotas de la estructura metálica (Parte superior) y cotas de la estructura de hormigón (Parte inferior).....	10
Figura 1.2. Secciones y tipos de perfiles en la estructura metálica.....	11
Figura 1.3. Introducción de los parámetros del material en ANSYS.....	18
Figura 3.1. Vectores de desplazamientos del elemento.....	21
Figura 3.2. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento.....	23
Figura 3.3. Elección para nuestras simulaciones de análisis estructural y método de resolución h.....	26
Figura 4.1. Elemento usado para el modelo de barras.....	30
Figura 4.2. Planta de la estructura con las diferentes chapas de refuerzo.....	32
Figura 4.3. Introducción de las constantes reales en una de las vigas.....	33
Figura 4.4. Modelo creado solamente con puntos y líneas.....	34
Figura 4.5. Estructura completada, cada color corresponde a un grupo de constantes reales.....	35
Figura 4.6. Cruz central de la estructura.....	35
Figura 4.7. Ménsula de la estructura.....	36
Figura 4.8. Pilar de la estructura.....	36
Figura 4.9. Desplazamientos de la estructura.....	37
Figura 4.10. Tensiones en las barras.....	38
Figura 4.11. Selección del tipo de elemento utilizado para el modelo realizado con placas.....	41
Figura 4.12. Constantes reales utilizadas en el modelo de placas.....	42
Figura 4.13. Geometría del modelo de placas.....	43
Figura 4.14. Aplicación de las constantes reales a la estructura.....	43
Figura 4.15. Cruz central modelada con elementos tipo placa.....	44

Figura 4.16. Ménsula de la estructura.....	44
Figura 4.17. Pilar de apoyo.....	45
Figura 4.18. Pilar HEB con geometría completa.....	46
Figura 4.19. Pilar HEB con geometría simplificada.....	47
Figura 4.20. Placa de refuerzo superior e inferior modelada como parte de la viga IPN.....	48
Figura 4.21. Deformaciones del modelo de placas.....	48
Figura 4.22. Tensiones de Von Mises del modelo de placas.....	49
Figura 4.23. Tensión máxima en la estructura formada con barras.....	50
Figura 4.24. Tensiones en el apoyo sin tener en cuenta el efecto del suelo.....	53
Figura 4.25. Restricciones al movimiento en la placa de apoyo.....	53
Figura 4.26. Constantes reales usadas en el modelo de placas con suelo.....	56
Figura 4.27. Modelo con las constantes reales.....	57
Figura 4.28. Cruz central (vista superior).....	57
Figura 4.29. Ménsula (vista superior).....	58
Figura 4.30. Pilar (vista exterior).....	58
Figura 4.31. Cruz central (vista inferior).....	59
Figura 4.32. Ménsula (vista inferior).....	59
Figura 4.33. Pilar (vista interior).....	60
Figura 4.34. Desplazamientos de la estructura con la placa superior.....	60
Figura 4.35. Distribución de tensiones.....	61
Figura 4.36. Planos de las soldaduras de la viga en voladizo.....	66
Figura 4.37. Soldadura en ángulo espesor de la garganta.....	66
Figura 4.38. Tipos de uniones.....	67
Figura 4.39. Soldadura a tope y forma de preparación.....	67
Figura 4.40. Elemento solido utilizado en el modelo.....	68

Figura 4.41. Soldadura de la placa superior simplificada.....	69
Figura 4.42. Diferentes tamaños de elementos usados para el modelo.....	71
Figura 4.43. Desplazamientos del modelo de sólidos.....	73
Figura 4.44. Tensiones del modelo de sólidos.....	74
Figura 4.45. Punto de máxima tensión debido a error del mallado.....	75
Figura 4.46. Punto de máxima tensión.....	76
Figura 4.47. Tensiones sin tener en cuenta el defecto del mallado ni el punto máximo de tensiones.....	76
Figura 4.48. Selección de los volúmenes que conforman las soldaduras.....	77
Figura 4.49. Desplazamientos en la solución de diseño.....	79
Figura 4.50. Tensiones en la unión de la ménsula con el resto de la estructura.....	80
Figura 4.51. Tensiones del resto de soldaduras con chapas de refuerzo.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno.....	15
Tabla 1.2. Resistencia de los aceros según código técnico de edificación, seguridad estructural de aceros.....	16
Tabla 4.1. Tensiones y desplazamientos de la estructura en el moldeo original.....	29
Tabla 4.2. Reacciones obtenidas del modelo en METAL 3D.....	29
Tabla 4.3. Área, momentos de inercia de los ejes débiles y fuertes de las distintas secciones que tiene el modelo.....	33
Tabla 4.4. Resultados entre el modelo original y el modelo de barras.....	38
Tabla 4.5. Reacciones del modelo original y del modelo de barras.....	39
Tabla 4.6. Comparación entre el modelo original y el modelo de barras.....	39
Tabla 4.7. Resultado de todos los modelos.....	49
Tabla 4.8. Reacciones en los apoyos del modelo de placas.....	51
Tabla 4.9. Reacciones en el resto de modelos.....	51
Tabla 4.10. Comparación entre los distintos modelos.....	52
Tabla 4.11. Desplazamientos y tensiones de todos los modelos.....	61
Tabla 4.12. Reacciones del modelo de placas.....	61
Tabla 4.13. Comparación entre el modelo de placas con suelo y sin suelo.....	62
Tabla 4.14. Reacciones del modelo con elementos tipo solido.....	72
Tabla 4.15. Comparación entre el modelo realizado con sólidos y el modelo realizado con placas.....	73
Tabla 4.16. Desplazamientos y tensiones del modelo de placas y el modelo de sólidos.....	74
Tabla 4.17. Desglose del coste de la estructura.....	82
Tabla 4.18. Desglose del coste de las zapatas.....	83

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

El objetivo de este proyecto es el análisis de una estructura real mediante el método de los elementos finitos. El programa de elementos finitos que se ha usado para este análisis es el programa de simulación ANSYS. En este análisis de la estructura, se va a comprobar si se cumplen los distintos parámetros de diseño que se establecen en la normativa (Código Técnico de la Edificación), como por ejemplo la resistencia de las secciones y soldaduras. El cálculo de la estructura según el modelo de los elementos finitos permite un análisis más riguroso que el realizado en un principio por los proyectistas del diseño de la estructura y más parecido al comportamiento real que tendrá.

La estructura que en este proyecto se va a analizar, es el de un emparrillado metálico de vigas cuyo objetivo era soportar las cargas de un quiosco de música y transmitir esas cargas a los pilares de un aparcamiento. El proyecto originario se realizó con el programa de diseño de estructura metálica METAL 3D que no ofrece un nivel de detalle de las tensiones tan riguroso como lo puede ofrecer ANSYS.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Proyecto en el que se basa

En esta parte del proyecto se explica de dónde se obtuvo la información sobre cotas, fuerzas, desplazamientos y reacciones, además de porque tiene la estructura a analizar esa geometría determinada y el tipo de vigas utilizadas.

Este proyecto se basa en un proyecto constructivo cuyo objetivo era determinar la forma y manera de instalar el quiosco de música elegido por el Excmo. Ayto. de Majadahonda (Madrid) en la Plaza de los Jardinillos de la misma localidad. Para ello, debido a que dicho quiosco descansará sobre el forjado superior de un aparcamiento, se dimensionarán las sollicitaciones que éste transmite. En ese proyecto se indicaba la estructura portante del mismo quiosco y los refuerzos a disponer, tanto en la cimentación del aparcamiento como en la estructura del mismo. El cálculo de los refuerzos en la cimentación no se va a analizar en este proyecto, solamente el de la estructura metálica. [1]

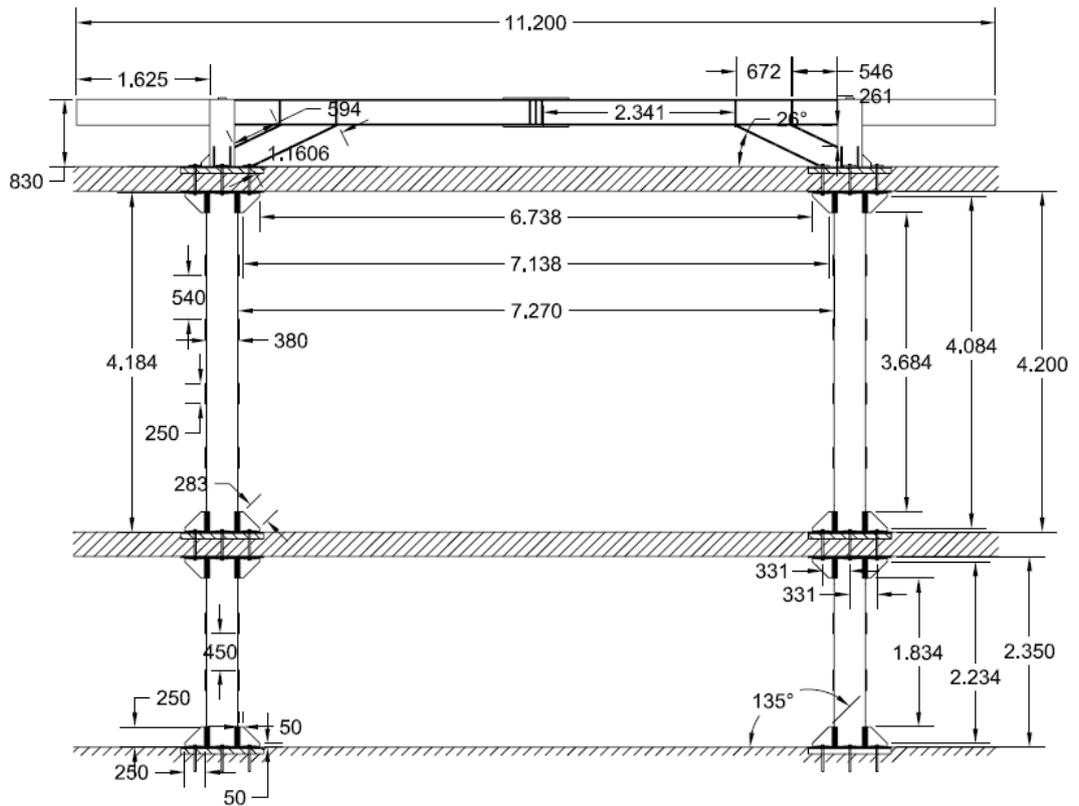


Figura 1.1. Cotas de la estructura metálica (Parte superior) y cotas de la estructura de hormigón (Parte inferior)

En estos documentos se establecía que:

- La geometría de la planta del quiosco proyectado es un octógono inscrito en una circunferencia de radio 5.04m.
- El forjado superior y la estructura del aparcamiento son insuficientes para soportar la carga del Quiosco proyectado.
- El Quiosco se apoyará sobre cuatro (4) de los pilares del aparcamiento

1.2.1.1 La solución adoptada para el diseño:

En este apartado se explican las opciones que en el diseño se utilizaron:

- Los pilares soporte del Quiosco, tenían su eje coincidente con el eje de los pilares del aparcamiento.
- Los pilares del Quiosco transmitirían los esfuerzos de cálculo mediante el empotramiento que producen las placas de asiento.

- La viga perimetral contribuye positivamente a disminuir la flecha en el extremo de la superficie del quiosco, pero su instalación en el apoyo vertical del Quiosco, junto con las vigas que deben soportar la carga central es extremadamente compleja.
- Las riostras desde el pie del pilar, descargan al mismo de gran parte de la carga. Deben considerarse dos extremos en este punto, primero, cuanto más tendidas son, más se disminuye la flecha en las vigas del emparrillado superior, pero mayor es el esfuerzo cortante transmitido a la placa de anclaje, y segundo, debido a los perfiles mínimos admisibles, si el ángulo de inclinación es muy tendido las dimensiones del apoyo son inviables. Tras el estudio de estas variables la estructura adoptada para soportar el quiosco consiste en:[1]
 - Cuatro (4) pilares HEB-300 centrados en los pilares del aparcamiento, con el alma en la dirección de su cara mayor.
 - Cuatro (4) vigas IPN-320 formando un rectángulo de pilar a pilar, arriostrados a un cuarto de su longitud al pie del pilar mediante un perfil IPN-320.
 - Cuatro (4) vigas IPN-320 formando una cruz desde los puntos medios de las caras del rectángulo anterior.
 - Cuatro (4) vigas IPN-320 en ménsula rigidizadas con platabandas.
 - Cuatro (4) placas de anclaje que transmiten los esfuerzos del Quiosco a los pilares del aparcamiento.

1.2.2 Código técnico de la edificación

La siguiente parte del proyecto es una introducción teórica al Código Técnico de la Edificación. Esta normativa constructiva ha sido fundamental para la creación del proyecto ya que es la que se ha usado para calcular, la estructura original del proyecto y para obtener las secciones de los diferentes tipos de perfiles y el reparto de carga de la estructura.

1.2.2.1 Ámbito de aplicación

Este documento se destina a verificar la seguridad estructural de los elementos metálicos realizados con acero en edificación. No se contemplan, por tanto, aspectos propios de otros campos de la construcción (puentes, silos, chimeneas, antenas, tanques, etc.). Tampoco se tratan aspectos relativos a elementos que, por su carácter específico, requieren consideraciones especiales. [10]

Este documento básico se refiere únicamente a la seguridad en condiciones adecuadas de utilización. La satisfacción de otros requisitos (aislamiento térmico, acústico, resistencia al fuego) queda fuera de su alcance. Los aspectos relativos a la fabricación, montaje, control de calidad, conservación y mantenimiento se tratan, exclusivamente, en la medida necesaria para indicar las exigencias que se deben cumplir en concordancia con las hipótesis establecidas en el proyecto de edificación. Por lo que se le pueden atribuir una serie de puntos: [7] y [9]

- Bases de proyecto con carácter general, independientemente del tipo de material o tipología estructural.
- Aplicable a todo tipo de edificios, incluso los de carácter provisional.
- A falta de indicaciones específicas, se adoptará como periodo de servicio 50 años.
- Criterio para la evaluación estructural de edificios existentes.
- Servirá de base para la verificación de las exigencias de Seguridad estructural para otros materiales no contemplados actualmente.

1.2.2.2 Documentación

Se establece la información específica que debe contener el proyecto, relacionada con la seguridad estructural. Reconoce la existencia de dos fases diferenciadas en el proyecto (Proyecto básico y de ejecución). Además del plan de mantenimiento. [7] y [9]

Las instrucciones de uso son:

- Las acciones permanentes, sobrecargas de uso y deformaciones admitidas.
- las condiciones particulares de utilización.
- las medidas adoptadas para reducir riesgos.

En la documentación que se consiguió del proyecto original solo se obtuvo la información referente a las acciones permanentes y a las deformaciones de las diferentes partes de la estructura.

1.2.2.3 Estados límites

Se pueden definir como situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguno de los requisitos estructurales para los que ha sido concebido. [7] y [9]

Estados límites últimos:

- Pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente.
- Fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales o de sus uniones, o inestabilidad de elementos.

Estados límites de servicio:

- Deformaciones (integridad de los elementos constructivos, confort de los usuarios y apariencia de la obra)
- Vibraciones

1.2.2.4 Verificaciones

Estas verificaciones están basadas en el formato de los coeficientes parciales, métodos experimentales y aplicación directa de los métodos de análisis de fiabilidad: [7]

Se requieren dos tipos de verificaciones de acuerdo al código técnico de edificación, las relativas a:

- La estabilidad y la resistencia (estados límite últimos). Es decir la verificación de la capacidad portante, la estabilidad y la resistencia de los elementos implicados; es la que se consideran en los estados límite últimos (condiciones de seguridad).

- o Estabilidad: del conjunto del edificio o de una parte independiente.

$$E_{d,dst} \leq R_{d,stab}$$

- $E_{d,dst}$ valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras.
- $E_{d,stab}$ valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

- o Resistencia: de la estructura, elemento estructural, sección, punto o de una unión entre elementos.

$$E_d \leq R_d$$

- E_d valor de cálculo del efecto de las acciones
- R_d valor de cálculo de la resistencia correspondiente

- La aptitud para el servicio (estados límite de servicio). Es decir que hay un comportamiento adecuado, en relación con las deformaciones, las vibraciones o el deterioro, si se cumple, para las situaciones de dimensionado pertinentes, que el efecto de las acciones no alcanza el valor límite admisible establecido para el mismo de acuerdo (Condiciones de uso). En el proyecto original no se consiguieron los cálculos referentes a las verificaciones a los estados límites de servicio pero si a los estados límites últimos. [7]

No es necesario comprobar la seguridad frente a fatiga en estructuras normales de edificación que no estén sometidas a cargas variables repetidas de carácter dinámico, que no es nuestro caso. [10]

La mayoración de las acciones para situaciones persistentes o transitorias (Que es nuestro caso) viene dada por la fórmula:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Siendo:

a) Todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_K$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$).

b) Una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_K$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;

c) El resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$).

Los coeficientes parciales de seguridad son:

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

Tabla 1.1. Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno.

1.2.2.5 Flecha relativa

- Descenso máximo de vano respecto al extremo de la pieza que lo tenga menor, dividida por la luz del tramo. [9]
- Entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. [9]

1.2.2.6 Resistencia de cálculo

La resistencia de cálculo según el código técnico de edificación, seguridad estructural de aceros. [9]

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

Tabla 1.2. Resistencia de los aceros según código técnico de edificación, seguridad estructural de aceros

En nuestro caso el acero utilizado es el de límite elástico 255Mpa

Se define resistencia de cálculo, f_{yd} , al cociente de la tensión de límite elástico y el coeficiente de seguridad del material:

$$f_{yd} = f_y / \gamma_M$$

siendo:

- f_y tensión del límite elástico del material base (tabla 1.2). No se considerará el efecto de endurecimiento derivado del conformado en frío o de cualquier otra operación.
- γ_M coeficiente parcial de seguridad del material.

En las comprobaciones de resistencia última del material o la sección, se adopta como resistencia de cálculo el valor:

$$f_{ud} = f_u / \gamma_{M2}$$

siendo:

- γ_{M2} coeficiente de seguridad para resistencia última.

Para los coeficientes parciales para la resistencia se adoptarán, normalmente, los siguientes valores:

- a) $\gamma_{M0} = 1,05$ coeficiente parcial de seguridad relativo a la plastificación del material
- b) $\gamma_{M1} = 1,05$ coeficiente parcial de seguridad relativo a los fenómenos de inestabilidad
- c) $\gamma_{M2} = 1,25$ coeficiente parcial de seguridad relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión
- d) $\gamma_{M3} = 1,1$ coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en Estado Límite de Servicio.
- e) $\gamma_{M3} = 1,25$ coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en Estado Límite de Último.
- f) $\gamma_{M3} = 1,4$ coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados y agujeros rasgados o con sobremedida.

Con esto lo que se quiere decir es que la resistencia de los elementos estructurales se minimiza para tener mayor seguridad en las estructuras. Para dar mayor seguridad a las estructuras.

1.2.3 Materiales

Aunque muchos de los métodos de comprobación indicados en el código técnico de la edificación pueden aplicarse a materiales de cualesquiera características, en este proyecto se va a considerar como único material de uso el acero cuyas características son: [7]

- módulo de Elasticidad: E 210.000 N/mm²
- coeficiente de Poisson: ν 0,3
- coeficiente de dilatación térmica: α $1,2 \cdot 10^{-5}$ (°C)
- densidad: ρ 7.850 kg/m³

En el simulador de ANSYS, la introducción de estos valores se realizó mediante las ventanas de la sección de materiales. Al no tener que hacer ningún tipo de análisis térmico no hizo falta introducir el coeficiente de dilatación térmica. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son fundamentales para el cálculo de los desplazamientos en la estructura y de cómo se deforma en función de las cargas aplicadas. La densidad es innecesaria para el cálculo de la resistencia de la estructura. Pero en el caso de hacer análisis modales, como en el análisis de vibraciones, para obtener los modos de vibración del sistema. Es obligatorio introducir la densidad.

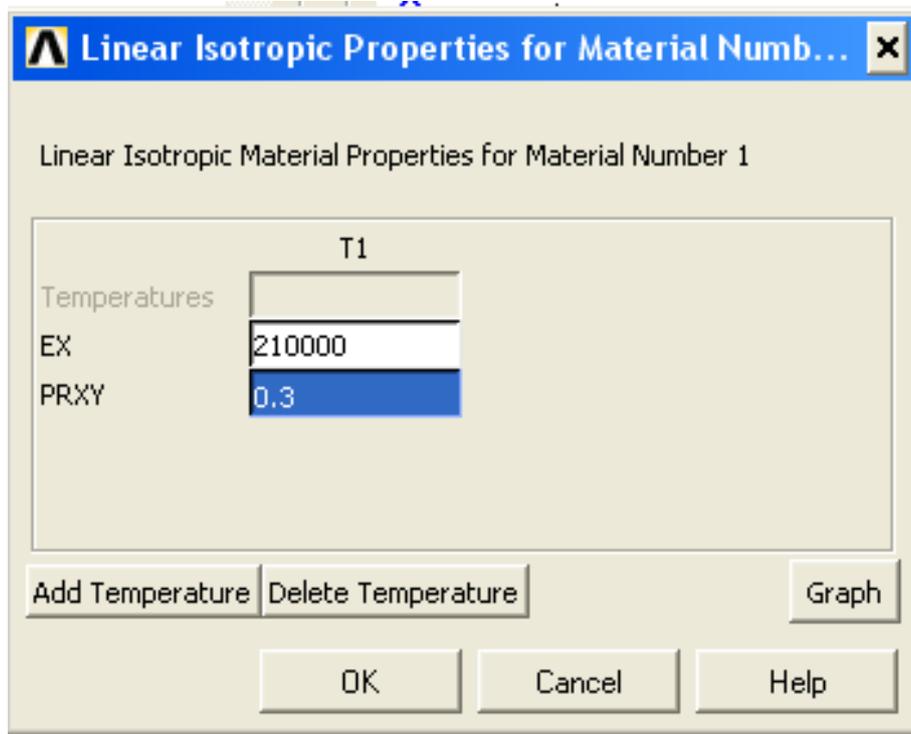


Figura 1.3. Introducción de los parámetros del material en ANSYS.

2 SOLICITACIONES DE CÁLCULO

Las siguientes solicitaciones de cálculo son las que se han considerado para dimensionar la estructura portante del proyecto básico de ejecución del Quiosco de Música, estas acciones ya mayoradas según el código técnico de la edificación son: [1]

- Solado: $0,80 \text{ KN/m}^2$
- Revestimiento: $0,50 \text{ KN/m}^2$
- Uso: 5 KN/m^2
- Cubierta (110m^2): $184,7 \text{ KN}$ (a repartir entre 8 pilares)
- Pilares: $6,4 \text{ KN}$

Con estas solicitaciones de cálculo se obtienen 8 fuerzas puntuales en los extremos del octógono de un valor $29487,5 \text{ N}$ es decir en los extremos de las ménsulas y en los pilares de sustentación y una carga a repartir entre toda la superficie de 604000 N/n° de nodos de la simulación.

3 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En esta parte del proyecto se va a explicar a continuación la base matemática de resolución de los modelos de elementos finitos.

El Método de los Elementos Finitos es el método numérico más potente aplicable al análisis de estructuras de cualquier tipo, sometidas a solicitaciones mecánicas y térmicas tanto estacionarias como transitorias.

La Teoría de la Elasticidad establece para un problema dado las relaciones matemáticas exactas en forma diferencial, y plantea su integración cerrando el problema con condiciones iniciales y de contorno para obtener las funciones que definen las variables representativas del comportamiento de la estructura. [4]

El Método de los Elemento Finitos se trata de una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno para su posterior resolución. En función del número de estas ecuaciones será necesario –como en el presente caso- o no implementar el problema para su resolución computerizada. [6]

3.1 Formulación general

La discretización del problema en el caso de un medio continuo se lleva a cabo mediante un proceso de modelización para convertirlo en un número finito de elementos ensamblados entre sí en puntos llamados nodos, el planteamiento de las ecuaciones de desplazamientos para dichos nodos y la imposición de las condiciones de contorno apropiadas en términos de compatibilidad de desplazamiento nodal. [5]

De la resolución del mismo como un todo, se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nodos y, a partir de él y si fuera necesario, el campo de tensiones. [6]

El comportamiento en el interior del elemento se interpolará a partir de los desplazamientos nodales mediante las llamadas funciones de forma.

Según este planteamiento, los errores se deberán principalmente a la aproximación del dominio, la aproximación del comportamiento en el interior de cada elemento y la precisión aritmética usada en la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos. [5]

3.1.1 Elemento

El subsiguiente desarrollo matemático considerará un elemento genérico e de nodos i, j, \dots de superficie S^e y volumen V^e . [6]

3.1.2. Campo de desplazamientos del elemento

$$\{a^e\} = \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

donde $\{a_i\}$ i a es el vector columna de desplazamientos de cada nodo en coordenadas locales, que será de la forma:

$$\{a_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$$

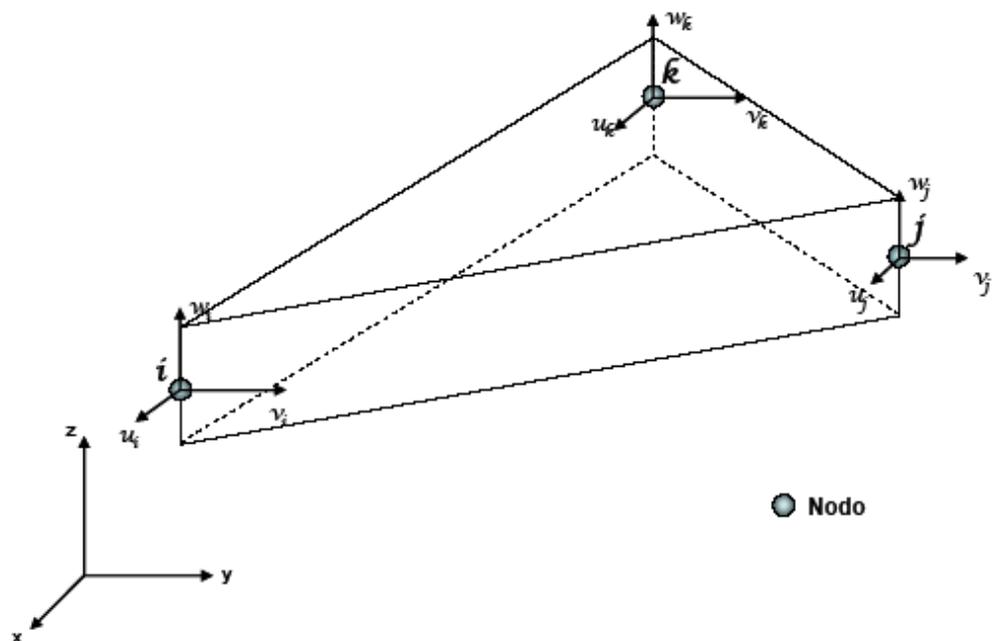


Figura 3.1. Vectores de desplazamientos del elemento

El campo de desplazamientos del elemento quedará definido por tanto por la relación:

$$\{u(x \ y \ z)\} = [N(x \ y \ z)] \cdot \{a^e\} = \left[[N_i(x \ y \ z)], [N_j(x \ y \ z)], \dots \right] \cdot \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

Donde $[N_i(x \ y \ z)], [N_j(x \ y \ z)], \dots$ son las denominadas matrices de forma, que se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Son cuadradas, ya que el número de componentes del vector columna $\{u(x \ y \ z)\}$ es igual al número de componentes en $\{a_i\}, \{a_j\}, \dots$
- Cumplen $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = [I]$ $[N_i(x_j \ y_j \ z_j)] = [0]$ si $i \neq j$ puesto que las funciones de interpolación toman los valores de los desplazamientos nodales en los mismos.
- Por lo tanto, si se considerasen las mismas funciones de forma en todas las componentes de $\{u(x \ y \ z)\}$ se deduce que $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = N_i(x \ y \ z) \cdot [I]$ en donde $N_i(x \ y \ z)$ función escalar de forma.

3.1.2.1. Campo de deformaciones del elemento

Las deformaciones se obtienen mediante derivadas parciales de las componentes del corrimiento y en general se escriben de la forma:

$\{\gamma\} = [S] \cdot \{u\} = [S] \cdot [N] \cdot \{a^e\} = [B] \cdot \{a^e\}$ con $[B] = [S] \cdot [N]$ donde $[S]$ es una matriz operacional que incluye las derivaciones parciales adecuadas, como se verá más abajo.

Teniendo en cuenta que $[N] = [[N_i], [N_j], \dots]$ se tendrá:

$$[B] = [S] \cdot [N] = [[S] \cdot [N_i], [S] \cdot [N_j], \dots] = [[B_i], [B_j], \dots] \text{ en donde } [B_i] = [S] \cdot [N_i]$$

3.1.2.2. Campo de esfuerzos del elemento

El campo de esfuerzos $\{\sigma\}$, que contendrá el mismo número de elementos que el campo de deformaciones $\{\gamma\}$, vendrá dado por:

$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D] \cdot \{\eta\}$ donde $[D]$ es la matriz de rigidez del material y $\{\eta\}$ son las deformaciones térmicas.

3.1.2.3. Equilibrio del elemento

Suponiendo que existe una distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen $\{F_V\}$ y que en sus bordes libres –si los tuviese- pueden actuar además fuerzas superficiales por unidad de superficie $\{\phi\}$, se trata de calcular el conjunto de fuerzas nodales $\{s\}$ que permite el equilibrio del elemento (ver Figura 3.2). [3]

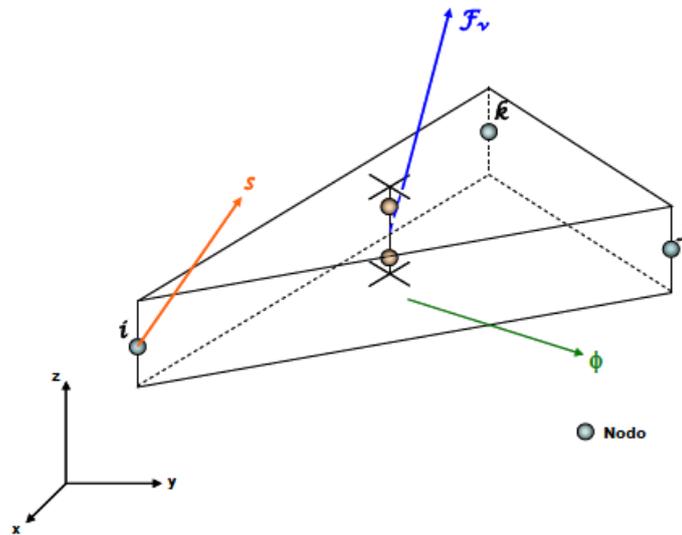


Figura 3.2. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento

Aplicando el principio de los desplazamientos virtuales en correspondencia a un desplazamiento virtual del elemento arbitrario $\{\delta a^e\}$, el campo de desplazamientos de dicho elemento vendrá dado por:

$$\{\delta u\} = [N] \cdot \{\delta a^e\}$$

Mientras que el campo de deformaciones virtuales cinemáticamente consistente con $\{\delta a^e\}$ será:

$$\{\delta \gamma\} = [B] \cdot \{\delta a^e\}$$

De acuerdo con el principio de los desplazamientos virtuales resultará:

$$\{\delta a^e\} \cdot \{s\} + \int_V \{\delta u\}^T \cdot \{F_V\} \cdot dV + \int_S \{\delta u\}^T \cdot \{\phi\} \cdot dS = \int_V \{\delta \gamma\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV$$

Sustituyendo los valores de $\{\delta u\}$, $\{\delta \gamma\}$ y $\{\sigma\}$ quedará:

$$\{\delta a^e\} \cdot \left[\{s\} + \int_V [N]^T \cdot \{F_V\} \cdot dV + \int_S [N]^T \cdot \{\phi\} \cdot dS - \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dV \cdot \{a^e\} + \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\eta\} \cdot dV \right] = 0$$

Como la expresión anterior debe verificarse para cualquiera que sea el valor del desplazamiento virtual $\{ \delta a^e \}$ que se considere, deberá ser:

$$\begin{aligned} \{s\} &= \left[\int_{V^e} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dV^e \right] \cdot \{a^e\} - \int_{V^e} [B]^T \cdot [D] \cdot \{\eta\} \cdot dV^e - \int_{V^e} [N]^T \cdot \{W\} \cdot dV^e - \int_{S^e} [N]^T \cdot \{\phi\} \cdot dS^e = \\ &= [k^e] \cdot \{a^e\} + \{s_0\} - \{p^e\} \end{aligned}$$

Donde $[k^e]$ es la matriz de rigidez del elemento, $\{s_0\}$ son las fuerzas térmicas y $\{p^e\}$ la resultante de fuerzas volumétricas y superficiales en el elemento.

3.1.2.4. Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo

Una vez calculadas las matrices de rigidez de cada uno de los elementos y las resultantes de fuerzas equivalentes en los mismos, es necesario generar las matrices de transformación de coordenadas locales del elemento a coordenadas globales del medio continuo.

Se obtienen así las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas equivalentes en ejes globales. Mediante un proceso de ensamblado, se constituirá el sistema completo de ecuaciones con los desplazamiento en los nodos como incógnitas, que se resolverá eliminando los grados de libertad dependientes como consecuencia de las diferentes ligaduras (i.e. los nodos comunes a uno y otro elemento tendrán los mismos desplazamientos).

A partir de sus soluciones y mediante la ecuación $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D] \cdot \{\eta\}$ se recuperará el campo de esfuerzos en cada elemento.

3.2 La herramienta ANSYS

En esta parte del proyecto se explicará brevemente la herramienta de simulación de ANSYS y sus distintas opciones de cálculo.

ANSYS Inc. fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.), desarrolla y presta soporte a la ingeniería introduciendo nuevos métodos para conseguir productos y procesos de fabricación más innovadores – logrando una reducción tanto de los costes como del tiempo invertido hasta la comercialización del producto – con programas de elementos finitos destinados a la simulación, que predicen cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. [2]

ANSYS es un programa de elementos finitos que originalmente ofrece soluciones para resolver análisis estáticos lineales. Sucesivamente se han ido introduciendo módulos con los que este programa es capaz de resolver además problemas dinámicos no lineales. Los principales módulos de ANSYS son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas), LSDYNA y Educational. [15] y [16]

Es un programa de elementos finitos que da solución a procesos implícitos, es decir, resuelve sistemas estáticos/cuasi-estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal. Se resuelve en una sola iteración, definida a partir de intervalos grandes de tiempo, ya que las soluciones convergen fácilmente mostrando una gran estabilidad. De manera que utiliza pocos recursos computacionales. [1], [16] y [18]

3.2.1. Métodos de resolución de ANSYS

En este apartado se pretende explicar las opciones del programa que se van a utilizar posteriormente en las simulaciones (tratando de mantener el mismo orden que en la programación de éstas). Se va a utilizar tanto el preprocesador como el post-procesador de ANSYS para poder introducir tanto la geometría con sus características como las condiciones de contorno, analizando posteriormente los resultados obtenidos.

En primer lugar hay que elegir en el Menú Principal de ANSYS el tipo de Análisis que se quiere realizar junto con el método de resolución. De entre la gran cantidad de procesos que puede resolver este programa se va a elegir el análisis estructural explícito. [15], [13] y [14]

ANSYS trabaja principalmente con dos métodos de resolución: método-p, método-h descritos a continuación:

- Método-p: El método-p obtiene resultados como desplazamientos, tensiones, o deformaciones con un grado de precisión determinado. Para calcular estos resultados, el método-p utiliza un polinomio de grado-p (ecuación constitutiva definida en función de las variables de estado del sistema) con el que se llega a una solución aproximada. Funciona definiendo una malla para un elemento, resolviéndolo para un grado-p determinado y aumentando el grado en cada iteración. Los resultados se obtienen siguiendo un criterio de convergencia. Cuanto mayor es el grado del polinomio mayor es la aproximación a la solución real. Las principales ventajas de este método son: Utiliza una malla constante (normalmente más gruesa que la que se emplearía en el método-h), su flexibilidad (resuelve el sistema

independientemente del mallado), su precisión en las soluciones y su velocidad.

- Método-h: Este método, a diferencia del anterior, no utiliza una malla constante si no una adaptativa, siendo necesario afinar el tamaño de la misma para conseguir una mayor precisión en los resultados. Esto hace que la velocidad de resolución del análisis sea menor, ya que cuantos más nodos se definen más se va tardar en resolverlo. Se puede emplear en análisis dinámicos, de fluidos, campos electromagnéticos, etc.

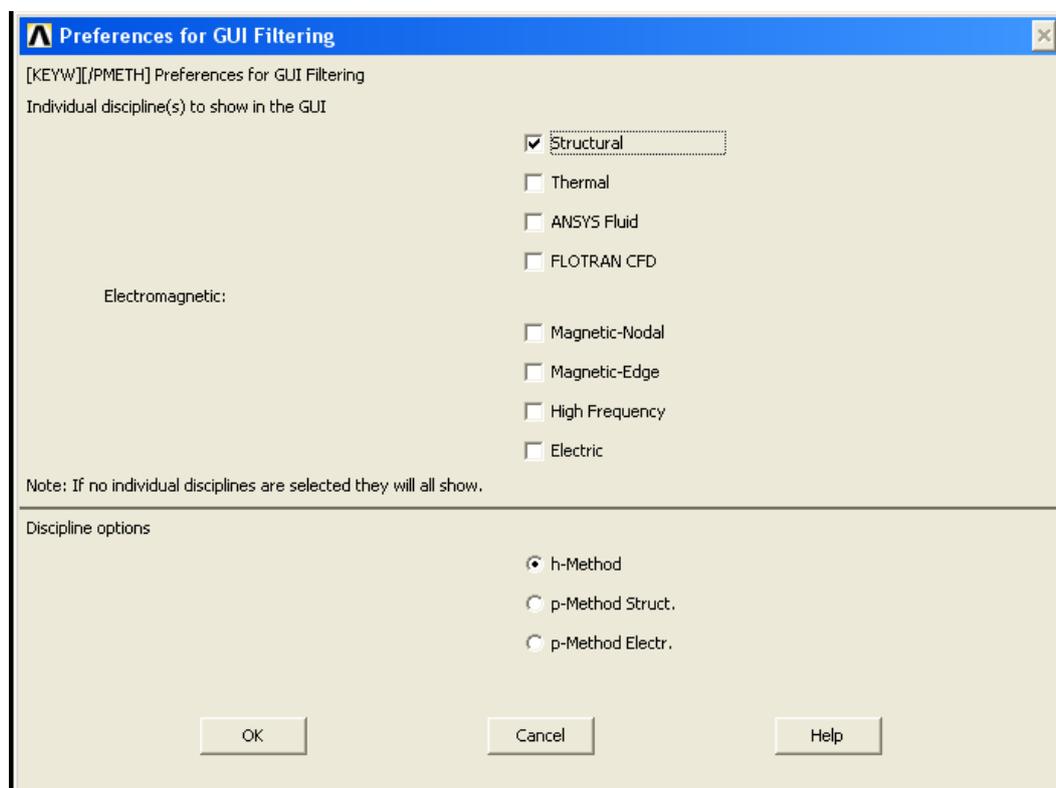


Figura 3.3. Elección para nuestras simulaciones de análisis estructural y método de resolución h.

Existen siete tipos de análisis estructurales presentes en la familia de productos de ANSYS que se explican a continuación. Las primeras incógnitas (grados de libertad nodales), que son calculadas en un análisis estructural son los desplazamientos. Otras magnitudes, tales como, tensiones, y las fuerzas de reacción, se derivan de los desplazamientos nodales.

- **Análisis estático:** se utiliza para determinar los desplazamientos, tensiones, etc bajo condiciones de carga estática. Ambos análisis, estático lineal y no lineal, pueden incluir no linealidades como plasticidad, rigidez estrés, grandes deformación, grandes tensiones, hiperelasticidad, superficies de contacto, y fluencia.
- **Análisis Modal:** se utiliza para calcular las frecuencias naturales y formas modales de una estructura.
- **Análisis Armónico:** se utiliza para determinar la respuesta de una estructura variando las cargas con el tiempo.
- **Análisis Dinámico Transitorios:** se utiliza para determinar la respuesta de una estructura de forma que en el tiempo se produce una variación de las cargas. Todas las no linealidades comentadas en el análisis estático se pueden introducir.
- **Análisis de espectro:** Una extensión del análisis modal, que se utiliza para el cálculo de tensiones y deformaciones debido a la un espectro de respuesta o una entrada PSD (vibraciones al azar).
- **Análisis del pandeo:** Se usa para calcular las cargas de pandeo y determinar las formas del modo de pandeo.
- **Análisis explícito dinámico:** este tipo de análisis estructural sólo está disponible en el LS-DYNA ANSYS del programa. ANSYS LS-DYNA proporciona una interfaz para el LS-DYNA de elementos finitos explícito para el análisis dinámico, que se utiliza para calcular soluciones rápidas para la dinámica de grandes deformaciones y los problemas complejos de contacto.

En nuestro caso solo se van a usar el modelo estático para la resolución de la estructura y el análisis modal para las vibraciones de la estructura.

Los siguientes datos a introducir dentro del simulador como son los tipos de elementos y el mallado se irán abordando en cada caso. Como la construcción del modelo y las simplificaciones realizadas.

4 METODOLOGÍA

A continuación presentamos una lista de las acciones en el proceso de análisis de la estructura que se han realizado en el proyecto para su elaboración.

- Obtención de resultados del modelo originario
- Elaboración de un modelo con elementos tipo barra
- Elaboración de un modelo con elementos tipo placa
- Comparación de resultados con el modelo del proyecto originario con los otros dos modelos realizados
- Elaboración de un modelo tipo placa con un placa superior soldada
- Pruebas de vibraciones en los modelos con placas uno con la presencia de plancha superior y otro sin ella.
- Análisis de la soldadura con la ayuda de elementos sólidos.
- Resolución de los posibles problemas que puedan surgir en el modelo de sólidos, mediante una solución de diseño.
- Elaboración de un presupuesto de la estructura.

Este proceso se ha seguido creando modelos cada vez con más detalle, es decir con un mayor número de nodos para obtener una solución con más precisión. Con estos modelos, cada vez más precisos, lo que se quiere obtener es un campo tensional más concreto y saber con más detalle que las comprobaciones que se deberían realizar en el Código Técnico de la Edificación, ya sea para la resistencia de las soldaduras como para el de las secciones se cumplen.

Si tenemos, como ya hemos comentado un acero de 255 MPa de resistencia y debemos minimizarla según el coeficiente $\gamma_{M2} = 1,25$ (coeficiente parcial de seguridad relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión) eso da como tensión máxima posible, a alcanzar dentro de todos los modelos constituidos, un valor máximo de 204MPa, para que se iguale a la resistencia máxima posible. Es decir [7]:

$$E_d \leq R_d$$

4.1 Resultados del modelo originario

Este modelo se realizó con el programa de cálculo estructural Metal 3D. Este programa se usa para el análisis de estructuras de barras, de metal, madera y hormigón. En este programa ya viene implementada la norma correspondiente al tipo de material, en nuestro caso, el Código Técnico de Edificación Seguridad Estructural Aceros. De este programa se han obtenido las tensiones a las que está sometida la estructura, sus desplazamientos y sus reacciones. [1]

Nudos de la estructura	Modelo original	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)
Ménsula 1,85	14,3	210,9
Ménsula 1,75	11,2	198,6
Nudo central	6,7	76,7
Pilar	0,03	91
Riostra	0,21	109

Tabla 4.1. Tensiones y desplazamientos de la estructura en el modelo original

Modelo original	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
	152000	-148000	210193	-65075	-74000
	-152000	-148000	210193	-65075	74000
	152000	148000	210193	65075	-74000
	-152000	148000	210193	65075	74000

Tabla 4.2. Reacciones obtenidas del modelo en METAL 3D

En la Tabla 4.1 aparecen como “nudos de la estructura” las ménsulas de 1.85m y 1.75m, los nudos o las zonas en las que se selecciona las tensiones en estos puntos son en el empotramiento de la ménsula con el resto de la estructura. Mientras que las flechas de las ménsulas se miden en su extremo.

Explicar que el sistema de referencia a lo largo de la ejecución del proyecto no cambia de un modelo a otro, y que siempre se va a tomar para poner las fuerzas en las tablas, que la reacción en Z es la contraria a la oposición de las fuerzas aplicadas y que las fuerzas en X y en Y son las fuerzas de reacción que impiden el movimiento de la estructura en esas direcciones. Los momentos en X y en Y son los momentos de reacción correspondientes al impedimento al giro de la estructura en esas direcciones. El momento en Z no se ha considerado en ninguno de los estudios al ser muy pequeño comparado con los otros valores.

4.2 Elaboración del modelo con elementos tipo barra

4.2.1 Objetivos del modelo de barras

Con este modelo lo que se quiere conseguir es:

- Realizar un primer modelo de elementos finitos que indique las diferencias con el modelo creado en Metal 3D. Aunque los dos modelos eran modelos de barras y en ambos se usaba la técnica de los elementos finitos para su resolución, siempre puede haber diferencias entre los resultados.
- Tener un modelo que se pueda comparar al modelo originario ya que el resto de los modelos van a ser más complejos, no solo en realización, sino en el número y tipo de elementos; además de las cargas a aplicar y del modelado de los tipos de empotramientos.
- Obtener una primera aproximación de los resultados, para conseguir tener una idea de las magnitudes a tratar en el modelo.

4.2.2 Las características principales del modelo de barras

4.2.2.1 Elementos utilizados

Este modelo se compone de elementos del tipo barra 3D “finite strain”, estos elementos están diseñados para trabajar en todo tipo de condiciones de cargas, en modelos tridimensionales. Se escogió por ser el elemento más sencillo que se puede seleccionar en análisis con barras, que no hacen que la resolución por parte del ordenador sea laboriosa. [13] y [14]

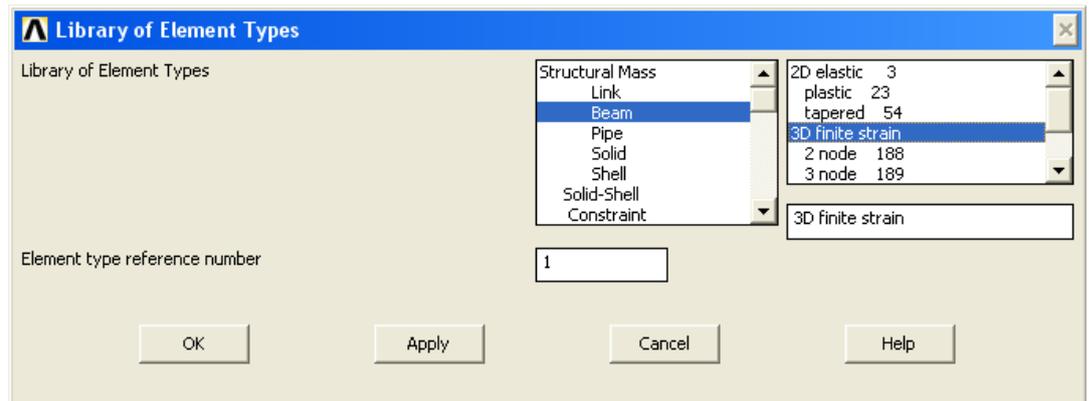


Figura 4.1. Elemento usado para el modelo de barras

Al ser un elemento tipo barra es necesaria la incorporación de varias constantes reales al modelo. Entre estas constantes están: la sección de la barra y los momentos de inercia en ambos sentidos de flexión.

4.2.2.2 Geometría y construcción del modelo

En el proyecto de origen aunque solo se trabaja con perfiles de tipo HEB300 e IPN320 los momentos de inercia van cambiando a lo largo de las vigas ya que se van soldando placas para reforzar la estructura. Por lo que se tendrá que calcular los momentos de inercia y las secciones para introducirlos como constantes reales. En el caso de los perfiles normalizados ya se sabía el valor de las secciones y los momentos de inercia pero en el caso de los perfiles con refuerzo se tuvieron que calcular con el teorema de Steiner. [10] y [11]

A continuación se presentan los cálculos para obtener los momentos de inercia y las áreas de los perfiles:

Calculo de la sección y momentos de inercia del IPN 320 con chapas de refuerzo a los lados de 320x17mm:

- Sección = $2 \cdot (\text{Área de la chapa}) + \text{Sección del perfil} = 2 \cdot 320 \cdot 17 + 7710 = 18590 \text{ mm}^2$
- Momento de inercia según el eje débil = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{distancia de la línea media de la chapa})^2 \cdot (\text{Área de la chapa}) + 2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa según al eje de referencia}) = 555 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0.0825^2 \cdot 5.44 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (1/12) \cdot 0.017^3 \cdot 0.320 = 7.9864 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
- Momento de inercia según el eje fuerte = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa según el eje de referencia}) = 12510 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot (1/12) \cdot (0.320)^3 \cdot 0.017 = 1.7152 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

Calculo de la sección y momentos de inercia del IPN 320 con chapas de refuerzo a los lados de 320x17mm y chapas de refuerzo tanto superior como inferior de 100x17mm:

- Sección = $2 \cdot (\text{Área de la chapa lateral}) + 2 \cdot (\text{Área de la chapa superior}) + \text{Sección del perfil} = 2 \cdot 320 \cdot 17 + 2 \cdot 100 \cdot 17 + 7710 = 21990 \text{ mm}^2$
- Momento de inercia según el eje débil = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{distancia de la línea media de la chapa})^2 \cdot (\text{Área de la chapa}) + 2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa lateral según al eje de referencia}) + 2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa superior según al eje de referencia}) = 555 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0.0825^2 \cdot 5.44 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (1/12) \cdot 0.017^3 \cdot 0.320 + 2 \cdot (1/12) \cdot (0.1)^3 \cdot 0.017 = 8.2694 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$

- Momento de inercia según el eje fuerte = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa lateral según el eje de referencia}) + 2 \cdot (\text{distancia de la línea media de la chapa superior})^2 \cdot (\text{Área de la chapa superior}) + 2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa superior según al eje de referencia}) = 12510 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot (1/12) \cdot (0.320)^3 \cdot 0.017 + 2 \cdot (0.1685)^2 \cdot (0.017) + (1/12) \cdot (0.017)^3 \cdot (0.1) = 1.804 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

Calculo de la sección y momentos de inercia del IPN 320 con chapas de refuerzo tanto superiores como inferiores de 100x17mm:

- Sección = $2 \cdot (\text{Área de la chapa}) + \text{Sección del perfil} = 2 \cdot 100 \cdot 17 + 7710 = 14910 \text{ mm}^2$
- Momento de inercia según el eje débil = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa según el eje de referencia}) = 555 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot (1/12) \cdot (0.1)^3 \cdot 0.017 = 8.38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
- Momento de inercia según el eje fuerte = Inercia del perfil según ese eje + $2 \cdot (\text{distancia de la línea media de la chapa})^2 \cdot (\text{Área de la chapa}) + 2 \cdot (\text{momento de inercia de cada chapa según al eje de referencia}) = 12510 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 0.1685^2 \cdot 0.017 + 2 \cdot (1/12) \cdot 0.017^3 \cdot 0.100 = 1.3398 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

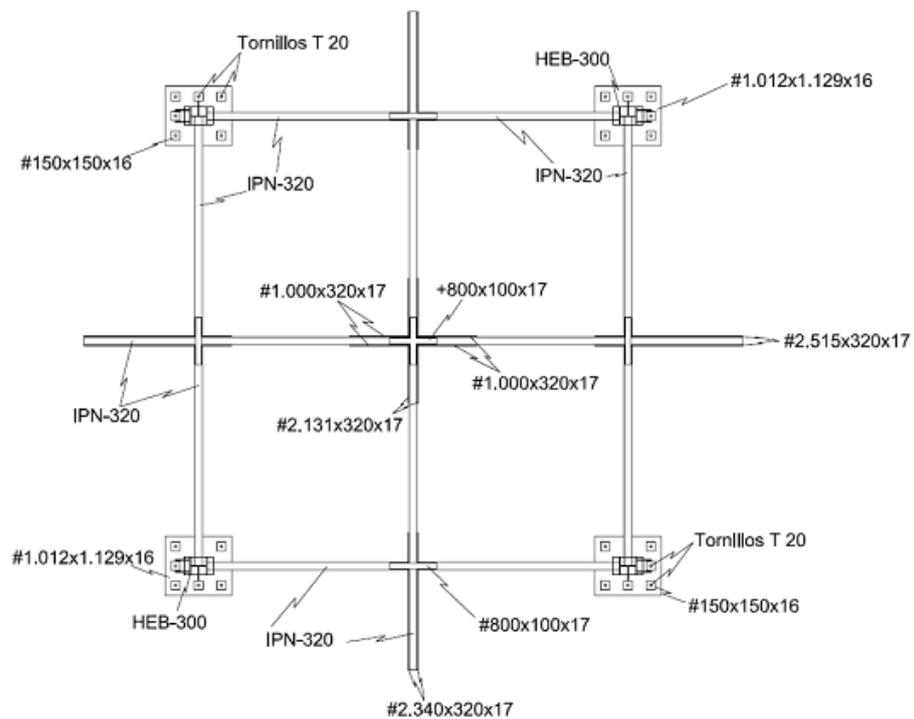


Figura 4.2. Planta de la estructura con las diferentes chapas de refuerzo.

Al final se obtuvieron hasta cinco momentos de inercia diferentes con cinco secciones diferentes para la modelización de la estructura:

Tipo de sección	Área (m ²)	Momento de inercia eje débil (m ⁴)	Momento de inercia eje fuerte (m ⁴)
IPN 320 con placas a los lados	0,01859	7,9864·10 ⁻⁵	1,7152·10 ⁻⁴
IPN 320 con placas a los lados y refuerzos superiores	0,02199	8,2694·10 ⁻⁵	1,804·10 ⁻⁴
IPN 320	0,00771	555·10 ⁻⁸	12510·10 ⁻⁸
HEB 300	0,01491	8563·10 ⁻⁸	25170·10 ⁻⁸
IPN 320 con refuerzos superiores	0,01111	8,38·10 ⁻⁶	1,3398·10 ⁻⁴

Tabla 4.3. Área, momentos de inercia de los ejes débiles y fuertes de las distintas secciones que tiene el modelo

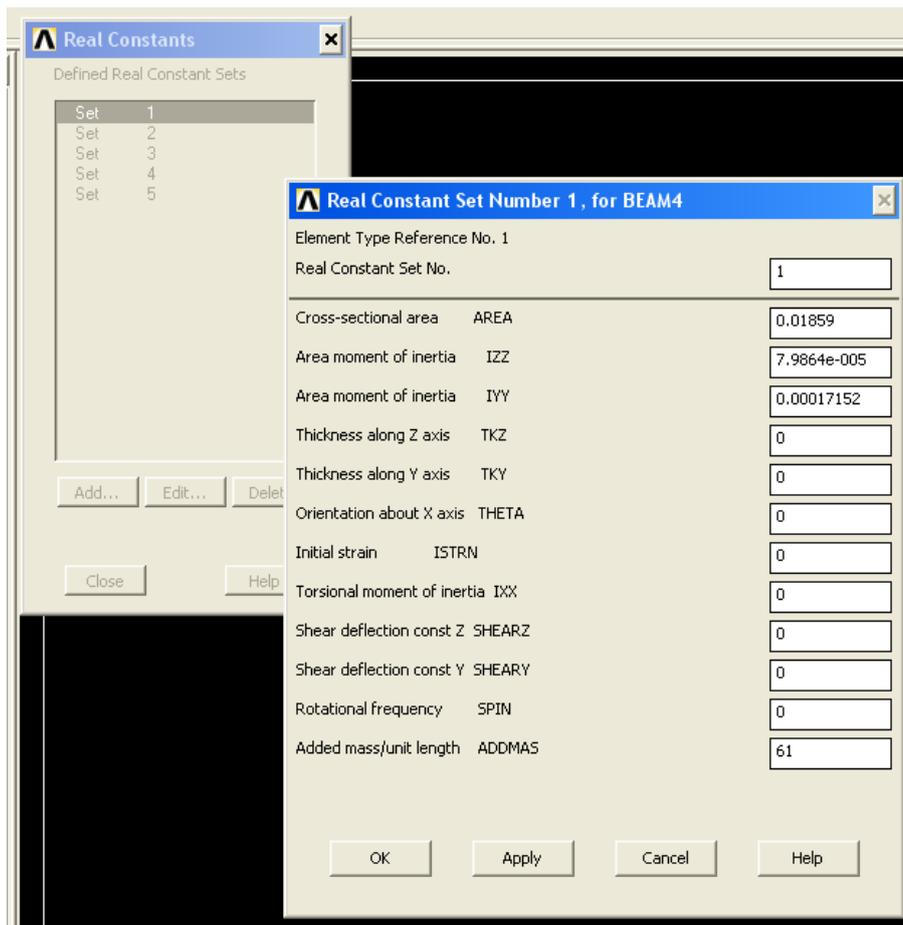


Figura 4.3 Introducción de las constantes reales en una de las vigas

Como se observa en la figura 4.3, se están introduciendo los valores de las constantes reales para cada uno de los tipos de secciones encontradas en la estructura. Los dos momentos de inercia y la sección; se introdujo el peso por unidad de área para intentar obtener las tensiones de la estructura, pero en los modelos tipo barra las tensiones se obtienen de otra manera a los modelos posteriores (usando el postprocesador) y ese dato en este caso no servía para nada.



Figura 4.4. Modelo creado solamente con puntos y líneas

Para la realización de la estructura del modelo se siguieron los siguientes pasos: la creación de puntos en función de la geometría a la que seguían y a continuación la creación de líneas para formar las vigas. Para este modelo no hizo falta la ayuda de la herramienta “reflect” para avanzar en la generación de la estructura de forma más rápida, pues no era necesaria por la simplicidad de la estructura.

Algo a tener en cuenta cuando se realiza un moldeo en ANSYS es la unión entre distintos elementos. En el caso de modelos creados con barras, para que distintas líneas compongan un mismo sólido, los puntos que pertenecen a líneas diferentes deben ser comunes. Así cuando se apliquen cargas se comportará como un mismo sólido, y no existirán fallos en los desplazamientos y en las cargas.

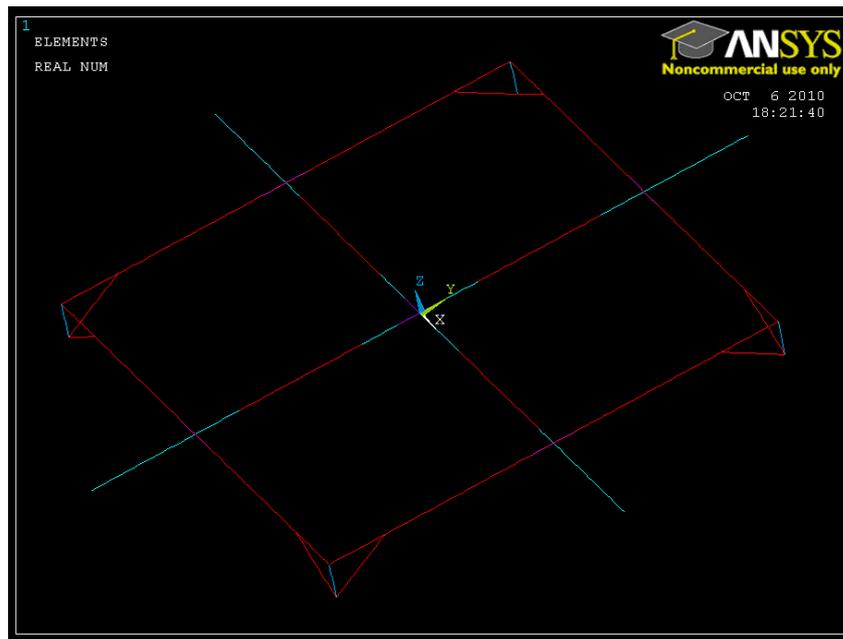


Figura 4.5. Estructura completada, cada color corresponde a un grupo de constantes reales.

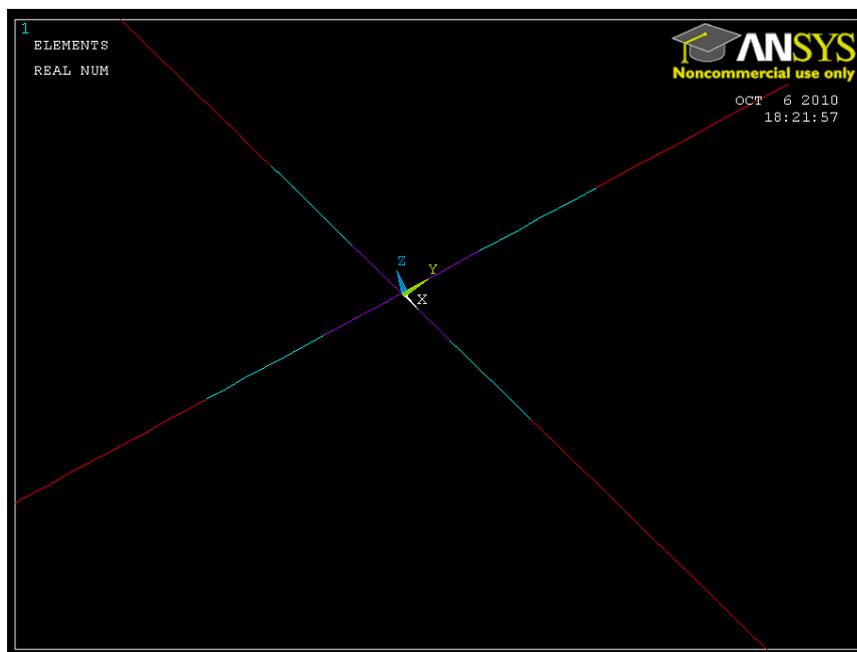


Figura 4.6. Cruz central de la estructura

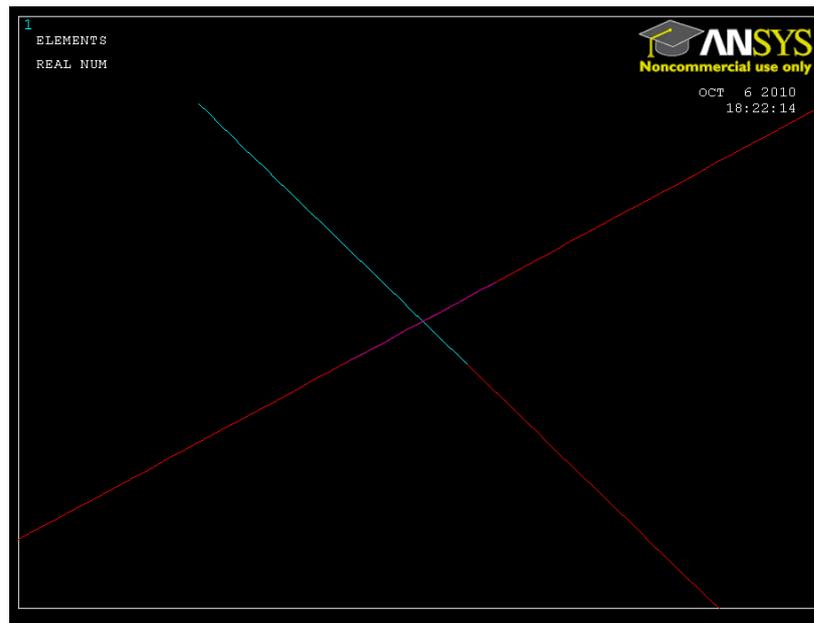


Figura 4.7. Ménsula de la estructura

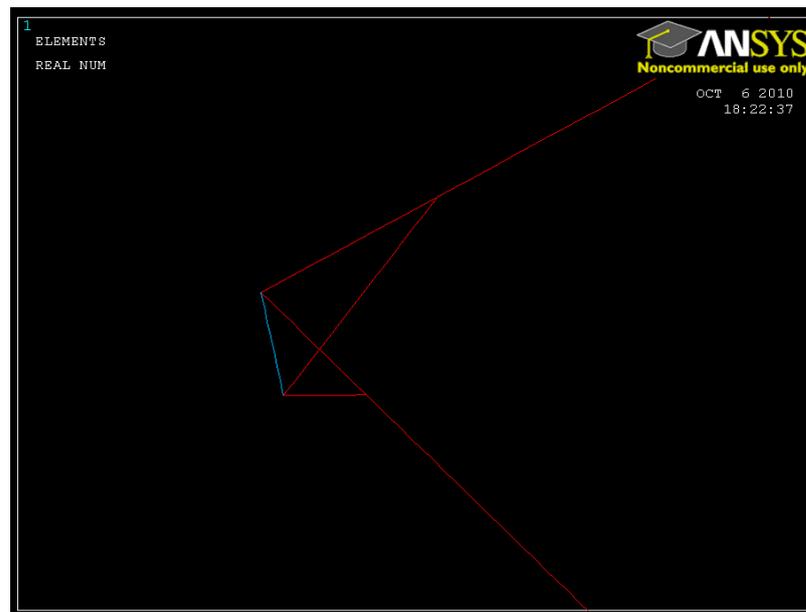


Figura 4.8. Pilar de la estructura

En este modelo se van a empotrar los cuatro pilares, esta simulación va a ser la única que va a tener esa característica en común con el modelo original.

4.2.2.3. Mallado

Una vez creada la estructura se realizó el mallado con un tamaño de malla de 10 mm, aprovechándonos que los elementos tipo barra, al mallar solamente en una dirección se pueden mallar con elementos de tamaño muy pequeño, sin obtener un gran número de nodos. Obteniendo una gran precisión de los resultados. Generando solamente 649 nodos, el menor número de nodos creados de todos los modelos realizados en el proyecto.

4.2.2.4. Solución del modelo

En primer lugar decir que la aplicación de las cargas en todos los modelos va a ser siempre la misma, por lo que no se la dará una especial atención a esta parte de la creación del modelo.

Las soluciones que se pueden obtener de ANSYS son los desplazamientos, las tensiones de las barras y las reacciones; a continuación se dan imágenes y tablas de los resultados obtenidos. Estos resultados se compararan con el modelo original, para saber el grado de exactitud entre ambos modelos. Para poder decir que ambos modelos se parecen va a tener que haber un error relativo que no va a poder sobrepasar ciertos valores. Al ser una estructura de varios metros de longitud los errores de las flechas podrán presentar varios milímetros de diferencia.

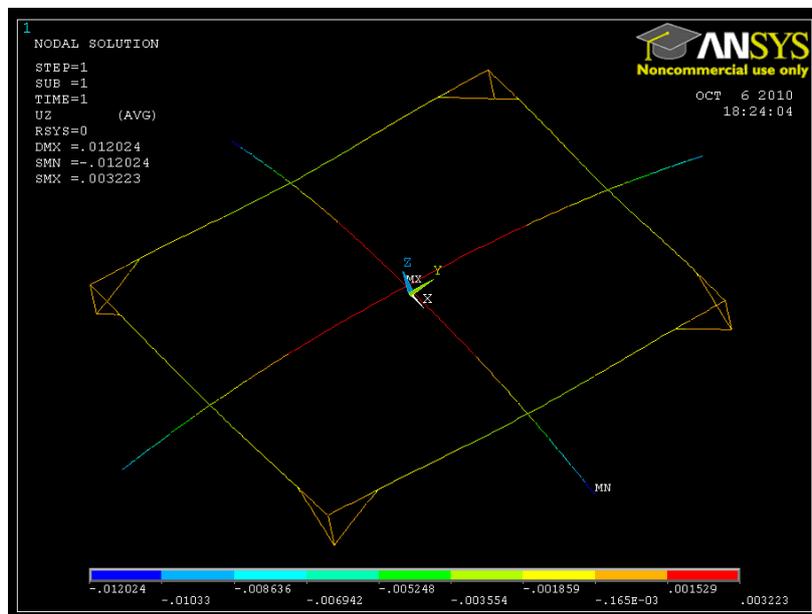


Figura 4.9. Desplazamientos de la estructura



Figura 4.10. Tensiones en las barras

Nudos de la estructura	Modelo original		Modelo de barras	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)
Ménsula 1,85m	14,3	203	12	210
Ménsula 1,75m	11,2	198,6	10	180
Nudo central	6,7	76,7	9	70
Pilar	0,03	91	0,03	70
Riostra	0,21	109	0,21	114

Tabla 4.4. Resultados entre el modelo original y el modelo de barras

Como se puede observar en la tabla 4.4, en el modelo realizado con METAL 3D ninguna de las tensiones supera los 204MPa debido a lo ya comentado en la parte de resistencia del apartado “Código técnico de edificación”, en donde el límite elástico del acero se minimizaba según el factor γ_{M2} que era en realidad el valor de la resistencia que se debe comparar.

La siguiente tabla corresponde a las reacciones del modelo según la aplicación de las cargas.

Modelo original	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
	152000	-148000	210193	-65075	-74000
	-152000	-148000	210193	-65075	74000
	152000	148000	210193	65075	-74000
	-152000	148000	210193	65075	74000
Modelo de barras	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
	117960	-158000	210187	-59275	-70906
	-117960	-158000	210187	-60105	70906
	117960	158000	210187	59275	-70906
	-117960	158000	210187	60105	70906

Tabla 4.5. Reacciones del modelo original y del modelo de barras

Para saber si los modelos se han realizado bien o dan problemas se van a comparar las reacciones con la fuerza aplicada, en este caso se aplican 840.772N en dirección Z, y la suma de las reacciones en Z del modelo de barras es de 840.748N eso da una diferencia de 24N. Este error se puede deber al número de nodos creados y al tamaño de la estructura. Además de esta comprobación se realizará otra la de sumar las reacciones en los ejes X e Y ya que deben de anularse al no introducir ninguna fuerza en este sentido. En este caso se anulan perfectamente.

La siguiente tabla muestra los errores relativos de las reacciones entre el Modelo de barras/Modelo original para tener una idea del grado de similitud entre ambos modelos.

Modelo original/modelo de barras	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	128,9	93,7	100,0	109,8	104,4
	128,9	93,7	100,0	108,3	104,4
	128,9	93,7	100,0	109,8	104,4
	128,9	93,7	100,0	108,3	104,4

Tabla 4.6. Comparación entre el modelo original y el modelo de barras.

4.2.3 Conclusiones

En la tabla 4.6 se muestran los errores que existen entre ambos modelos, se puede destacar que:

- Las fuerzas de la reacción en Z (que es la dirección donde se han aplicado las cargas) son prácticamente iguales, lo que es un indicativo de que el modelo está bien hecho y responde a como debería de actuar.
- Los momentos de las reacciones son superiores, esto es debido a que la estructura es más rígida en ciertas secciones, que la estructura que se planteo en el METAL 3D. Sin embargo las fuerzas que aparecen en las reacciones, unas tiene un valor muy superior y otras tiene un valor más bajo. Esta situación es singular ya que si uno de los momentos de inercia estuviera mal puesto en el modelo, aparecería un valor erróneo tanto en la fuerza como en el momento al tratarse de un problema lineal. Y si supusiéramos que ha sido un error en la introducción de los datos de los momentos de inercia los desplazamientos variarían, sin embargo salen muy parecidos. Se podría explicar como una introducción errónea de algún valor en el modelo de Metal 3D o en el modelo de ANSYS, o que en las simulaciones que vamos a hacer el grado de error del que podemos estar hablando es de hasta un 30%, como se verá en simulaciones posteriores.
- En la tabla 4.4 aparecen los valores de los desplazamientos y de las tensiones, estos valores a diferencia de las reacciones no se han comparado con tablas de errores, ya que no era necesario. Se han visualizado más como una forma de ver si el modelo se comportaba de forma parecida al modelo realizado en el METAL 3D.
- Se puede obtener como conclusión de este primer modelo que los datos obtenidos con METAL 3D y ANSYS son similares en el comportamiento de los desplazamientos y de las tensiones, pero que en las reacciones generadas existen ciertas contradicciones y por tanto se necesitara de un modelo más exacto para saber de forma más correcta el comportamiento de la estructura. Eso nos lleva a realizar un modelo de mayor complejidad. Creado con elementos más precisos y construido con mayor detalle, el modelo de placas.

4.3 Elaboración del modelo con elementos tipo placa

4.3.1 Objetivos del modelo de placas

Con este modelo lo que se quería conseguir era:

- Obtener unas soluciones de mayor detalle que las anteriores usando elementos tipo placa. Sabiendo que las cargas a aplicar son las correctas y que el comportamiento y reacciones de la estructura son parecidos a los del molde originario. Con estas condiciones se puede realizar el modelo con elementos tipo placa, es decir un modelo más parecido a la estructura real y cuyo comportamiento será mucho más similar al que tendría en servicio.
- Modelar el comportamiento de los apoyos, dado que la simulación de estos elementos en el proyecto originario se realiza mediante un empotramiento completo mientras que en esta simulación se tratara de completar el modelo según los planos del proyecto originario.

4.3.2 Las características principales del modelo de barras

4.3.2.1 Elementos utilizados

El elemento que se usó para la realización del modelo es el “elastic 4 node 63” tipo placa. Este elemento es el más adecuado para el diseño que se quiere hacer ya que el elemento tiene capacidad de admitir cargas tanto normales como de flexión en el plano y en la superficie del elemento. El elemento tiene seis grados de libertad en cada nodo lo que nos permite una libertad de movimientos en todas las direcciones. Pero su principal ventaja es su sencillez de calculo que hace que la resolución del modelo sea muy rápida.

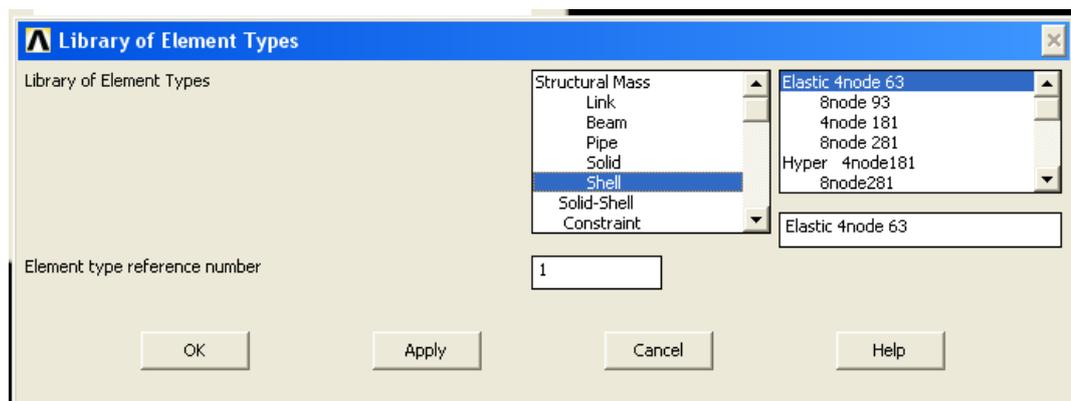


Figura 4.11. Selección del tipo de elemento utilizado para el modelo realizado con placas

4.3.2.2 Mallado

El tamaño de malla es de 50 mm, este tamaño de malla se corresponde con el acuerdo entre tener una malla lo suficientemente pequeña como para obtener un resultado lo suficientemente riguroso, y no está tan definida como para que la capacidad de procesamiento del ordenador sea limitada y tarde en resolver el modelo.

El número de constantes reales que se usaron para el modelo fue de siete para modelar todos los distintos espesores de las vigas:

1. Placa de anclaje y escuadra: 16mm
2. Alas de HEB 300: 19mm
3. Alma de HEB 300: 11mm
4. Alas de IPN 320: 17.3mm
5. Alma de IPN 320: 11.5mm
6. Chapas de refuerzo laterales: 17mm
7. Chapas de refuerzo superior e inferior: 17.3mm + 17mm = 34.3mm

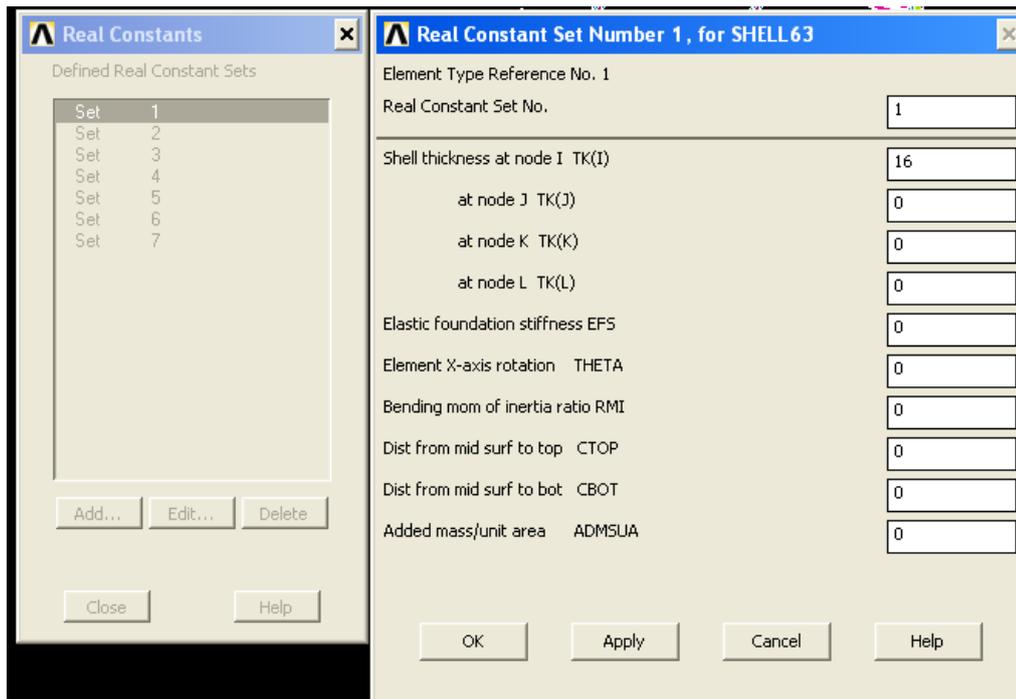


Figura 4.12. Constantes reales utilizadas en el modelo de placas

El número de nodos que se obtuvo fue de 27.151 nodos este número de nodos no debería de suponer ningún problema en la resolución de la matriz de rigidez por parte del ordenador. El tiempo de procesamiento fue de unos pocos segundos.

4.3.2.3 Geometría y construcción del modelo

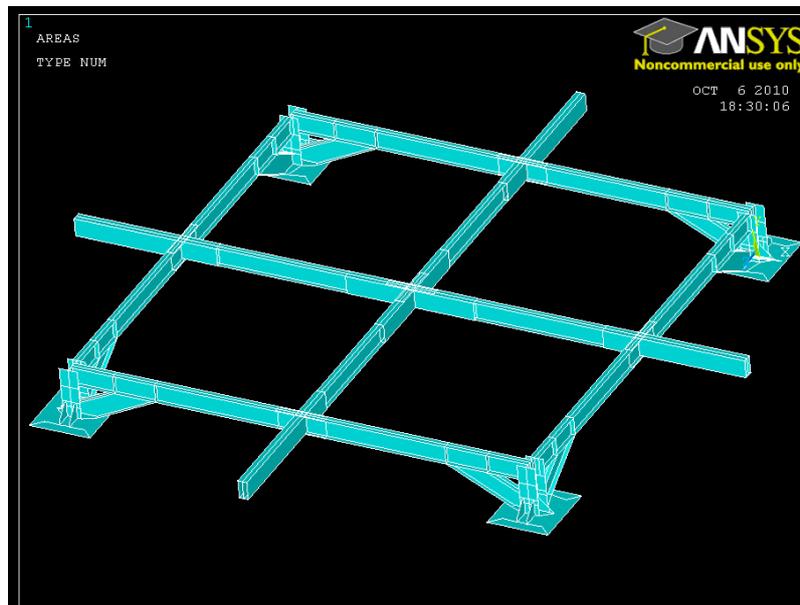


Figura 4.13. Geometría del modelo de placas

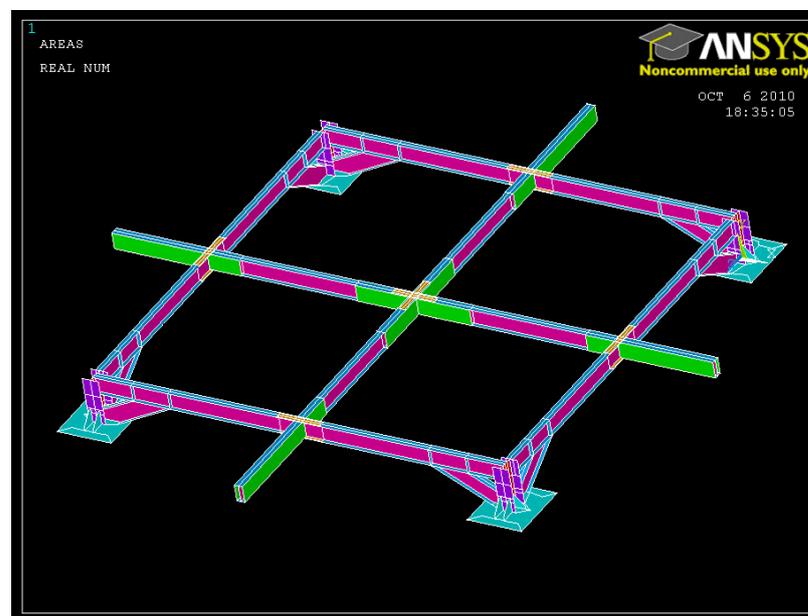


Figura 4.14. Aplicación de las constantes reales a la estructura

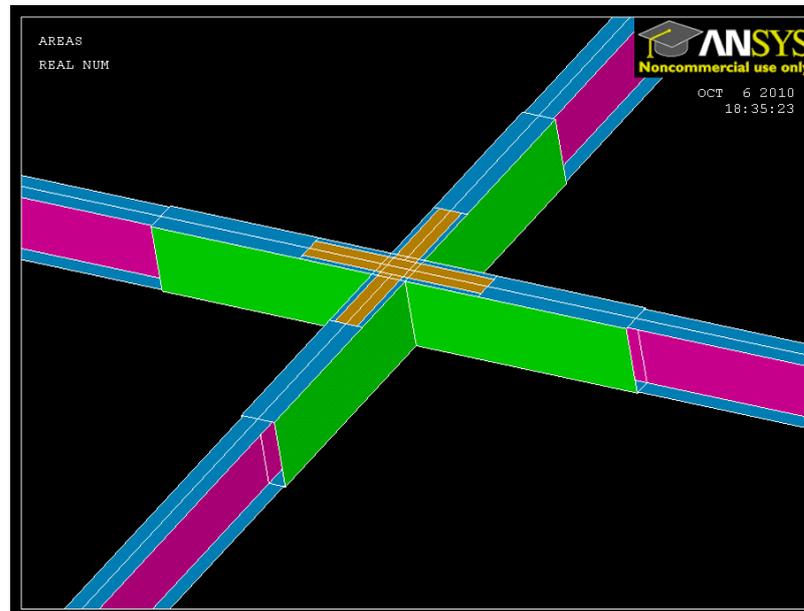


Figura 4.15. Cruz central modelada con elementos tipo placa

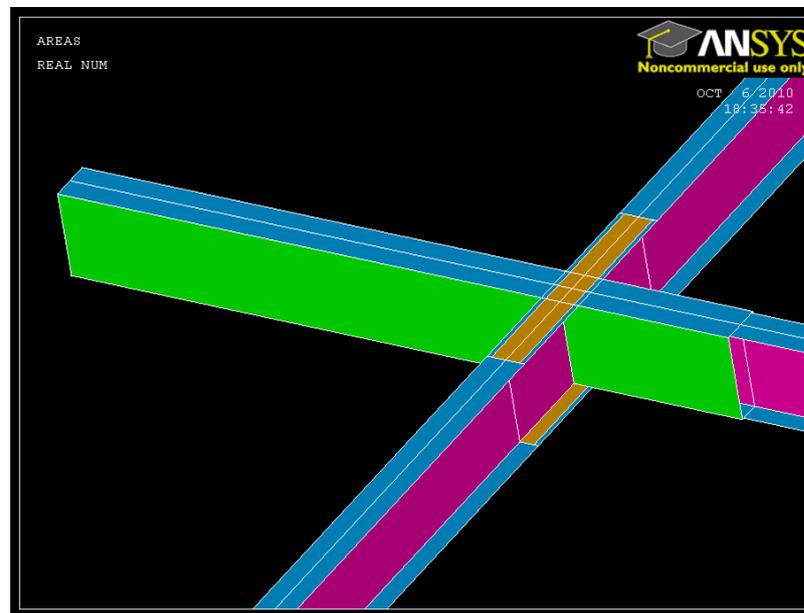


Figura 4.16. Ménsula de la estructura

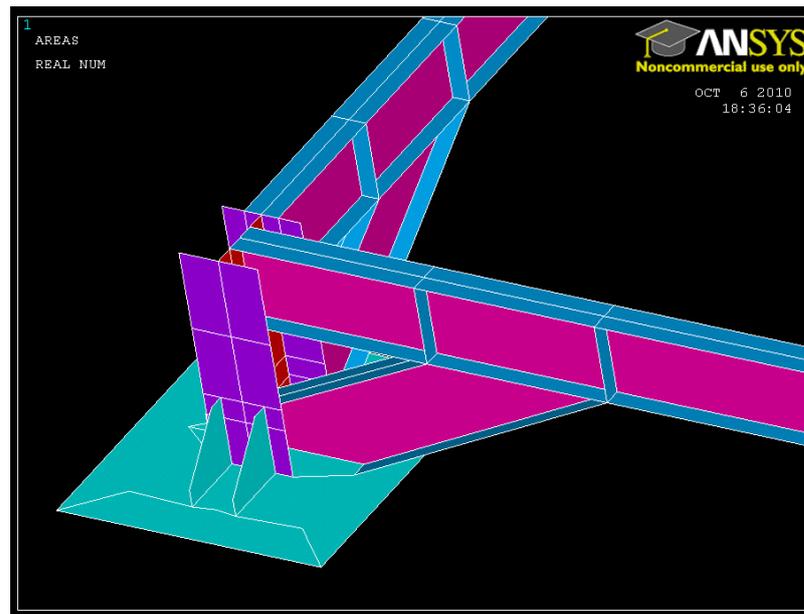


Figura 4.17. Pilar de apoyo

Las cargas aplicadas se repartieron como en el anterior modelo, las cargas de los pilares en los puntos medios de las vigas y de las ménsulas; y las fuerzas a repartir en la superficie, entre el número de nodos de la superficie superior de la estructura.

Para la construcción de un modelo compuesto por placas se tendrá que tener especial atención en la generación de líneas y áreas. En el anterior modelo creado solamente con puntos y líneas era muy sencilla su construcción y saber cuándo se estaba construyendo mal la geometría, por el número pequeño de elementos geométricos a tener en cuenta, y por la facilidad de ver estos elementos repetidos. Esto supone que para soldar distintas partes de un modelo hecho con barras los puntos son los que tienen que coincidir, mientras que para la construcción de un modelo hecho con placas, las distintas áreas que forman el modelo que hacen que se comporte como un único sólido deben de ser las mismas líneas de ambas áreas.

La construcción de la geometría para este modelo, fue mucho más complicada que para el modelo anterior. Porque implicó una mayor generación de puntos, líneas y áreas para la construcción del modelo. Para optimizar el proceso de construcción del modelo se aprovechó la forma que tenía rectangular, para hacer solamente una esquina y luego reflejarla (mediante el comando “Reflect” de ANSYS) dos veces, una para construir la mitad de la estructura y otra para construirla de forma completa. Aunque el comando “Reflect” pudo eliminar una gran parte del trabajo no está exento de cuidado en la formación de la geometría; ya que al “reflejar” la estructura sobre un plano se reflejan también los puntos de ese plano por lo que se superpondrían puntos, líneas y áreas en un mismo espacio geométrico, generando problemas de cohesión en la ejecución del modelo. Este problema se solucionó reflejando la estructura a cierta distancia y luego generando la sección que unía ambas partes.

Aunque se optó en la formación de la geometría por reflejar una cuarta parte de la estructura; se podría haber realizado generando la estructura de línea media hacia arriba y luego reflejando, generando automáticamente todo el emparrillado. Pero al final no se optó por esta solución ya que se podrían tener problemas de unión de elementos al duplicar todos los puntos y líneas que componían los planos medios y habría que construir las riostras de manera independiente. Por lo que era una forma de generar la geometría puede que más rápida, pero había una gran probabilidad de cometer errores del tipo: baja cohesión entre los elementos y que hubiera costado mucho su resolución. Estos errores se refieren a que los elementos construidos, al haber varias líneas en el mismo lugar geométrico, puede que las áreas no se compongan de las mismas líneas y no estén los elementos soldados y cuando se ejecute el programa se despeguen las áreas, produciendo errores en el modelo.

En la construcción de geometrías de los modelos de elementos finitos es típico tener que simplificar partes de la simulación para, que la resolución del modelo por parte del ordenador sea más sencilla. Lo que implica tener que eliminar o cambiar elementos poco útiles o cuyo grado de detalle no es necesario. En este modelo se eliminaron y se cambiaron ciertas partes para hacer que la resolución fuese más sencilla.

Las simplificaciones correspondientes al modelo son:

- Los modelos elaborados con elementos tipo placa se deben realizar teniendo en cuenta que lo que se representa es el plano medio de la placa.
- Como en el modelo se estaban representando los planos medios, la altura de los perfiles HEB se tuvo que acortar en la parte superior, que correspondía con el espesor superior al plano medio de los perfiles IPN.



Figura 4.18. Pilar HEB con geometría completa

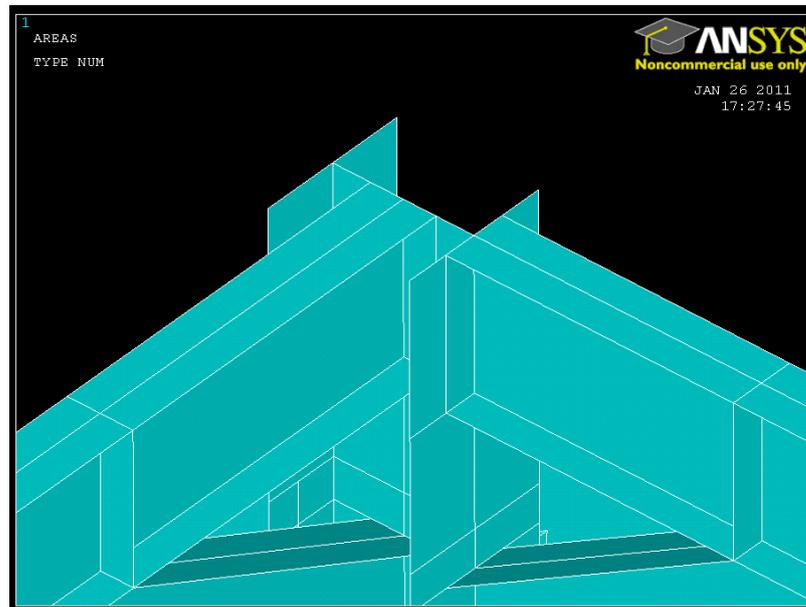


Figura 4.19. Pilar HEB con geometría simplificada

- No se modelizaron los en las placas de asiento los agujeros de los tornillos, sino que se pusieron directamente puntos a los que luego se aplicaron las restricciones de movimiento.
- No se pudieron modelizar las soldaduras; en esta etapa del proyecto se supusieron todas las uniones perfectas.
- Las placas de refuerzo superior e inferior se modelaron como parte de las vigas que tenían un espesor mayor y no como una placa que se encontraba encima de la viga.



Figura 4.20. Placa de refuerzo superior e inferior modelada como parte de la viga IPN.

4.3.2.4 Solución del modelo

Las deformaciones y tensiones que se generan en la estructura son las que se muestran en las siguientes tablas e imágenes:

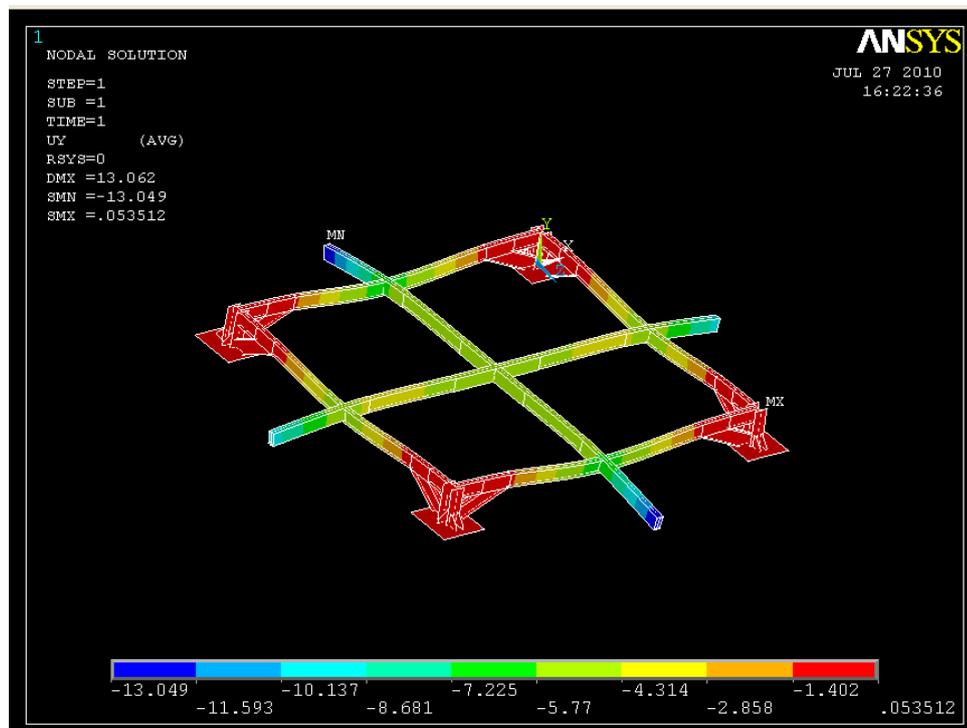


Figura 4.21. Deformaciones del modelo de placas

Nudos de la estructura	Modelo original		Modelo de barras		Modelo de placas	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensiones (MPa)
Ménsula 1,85	14,3	210,9	13,5	235	13,1	162
Ménsula 1,75	11,2	198,6	10	180	10,1	142
Nudo central	6,7	76,7	9	70	5,7	142
Pilar	0,03	91	0,03	70	1,4	61
Riostra	0,21	109	0,21	114	1,4	81

Tabla 4.7. Resultado de todos los modelos

Como ya se ha comentado antes, las deformaciones de las ménsulas se están midiendo en el extremo del voladizo y las tensiones de las ménsulas se están midiendo junto a la estructura es decir donde son mayores.

Para obtener la mayor de la tensión en la sección que se quería estudiar se seleccionaron únicamente los nodos que se querían señalar mediante la herramienta de selección. Esta herramienta de selección se uso también, para obtener los datos de las reacciones de la estructura.

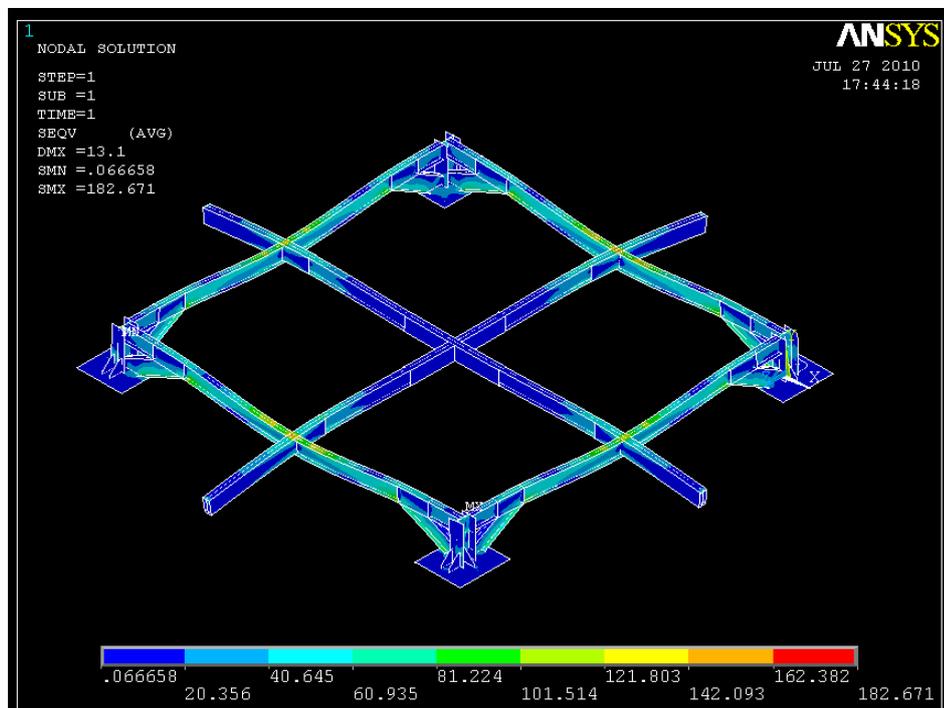


Figura 4.22. Tensiones de Von Mises del modelo de placas

Como se puede ver en la figura 4.22, las tensiones existentes en la estructura no superan en ningún momento el valor de 204MPa, por lo que podemos asegurar que la normativa del código técnico de la edificación se cumple perfectamente en este modelo más parecido a la construcción real.

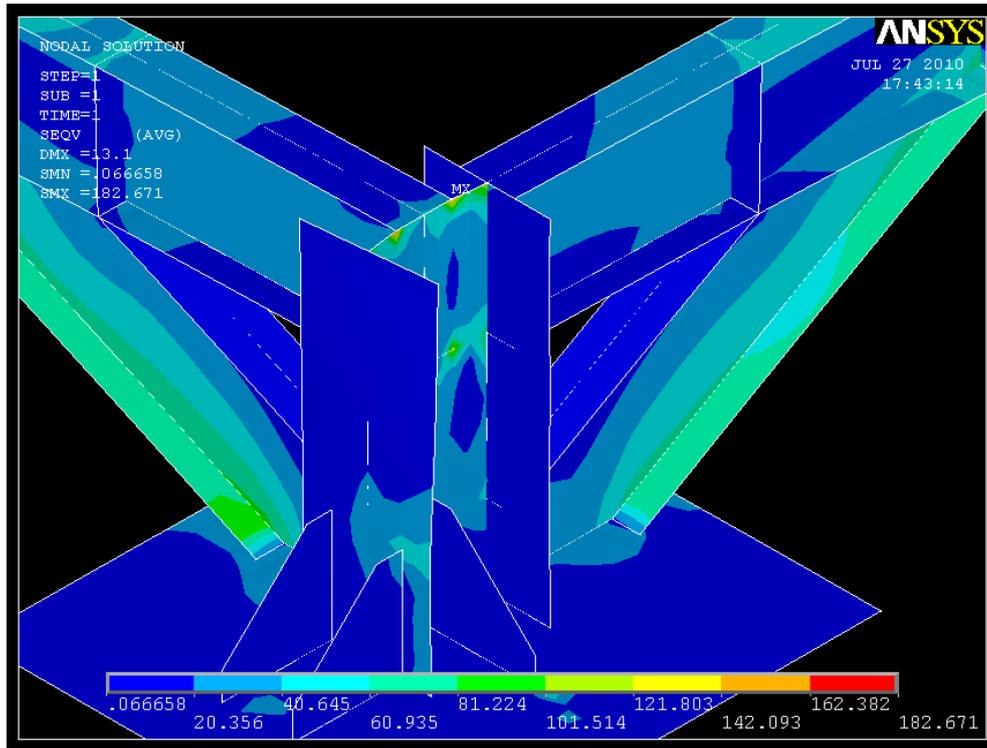


Figura 4.23. Tensión máxima en la estructura formada con barras

En la figura 4.23 se ve como el máximo de la tensión de la estructura está en una de las uniones entre un perfil HEB y un perfil IPN pero eso se debe a una irregularidad en el proceso de mallado. Porque en el proceso de construcción de la estructura se decidió diseñar esa parte del modelo, de tal manera que se eliminara el extremo que parecía sobrar del perfil HEB, pero que en realidad al dibujarse solamente la línea media debería estar en contacto con la viga, creando una especie de concentrador de tensiones en el contacto de las aristas de los perfiles que unido al error del mallado provoca una tensión más alta.

En este caso también se comprobarán las reacciones en la estructura para comprobar que en el modelo no hay ningún error, como en el anterior caso se comprobarán las fuerzas de reacción en el eje Z con la carga aplicada en esa misma dirección de 840.772N y se compara con 840.752N dando una diferencia de 20N, un error despreciable. Además de esta comprobación se sumarán las otras reacciones de las otras direcciones entre sí, ya que deben anularse. Esta comprobación también se cumple.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
Modelo de placas	141650	-157080	210188	-8687,2	-9440,4
	-141650	-159330	210188	-8041,2	9481,7
	142380	159330	210188	8590,5	-9544,2
	-142380	157080	210188	8155,6	9101,8

Tabla 4.8. Reacciones en los apoyos del modelo de placas.

Si estos valores los comparamos con los de las otras reacciones para ver el grado de similitud:

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
Modelo original	152000	-148000	210193	-65075	-74000
	-152000	-148000	210193	-65075	74000
	152000	148000	210193	65075	-74000
	-152000	148000	210193	65075	74000
Modelo de barras	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
	117960	-158000	210187	-59275	-70906
	-117960	-158000	210187	-60105	70988
	117960	158000	210187	59275	-70906
	-117960	158000	210187	60105	70988
Modelo de placas	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
	141650	-157080	210188	-8687,2	-9440,4
	-141650	-159330	210188	-8041,2	9481,7
	142380	159330	210188	8590,5	-9544,2
	-142380	157080	210188	8155,6	9101,8

Tabla 4.9. Reacciones en el resto de modelos

Modelo original/Modelo de barras	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	128,86	93,67	100,00	109,78	104,36
	128,86	93,67	100,00	108,27	104,24
	128,86	93,67	100,00	109,78	104,36
	128,86	93,67	100,00	108,27	104,24
Modelo original/Modelo de placas	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	107,31	94,22	100,00	749,09	783,87
	107,31	92,89	100,00	809,27	780,45
	106,76	92,89	100,00	757,52	775,34
	106,76	94,22	100,00	797,92	813,03
Modelo de barras/Modelo de placas	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	83,28	100,59	100,00	682,33	751,09
	83,28	99,17	100,00	747,46	748,68
	82,85	99,17	100,00	690,01	742,92
	82,85	100,59	100,00	736,98	779,93

Tabla 4.10. Comparación entre los distintos modelos

4.3.2.5 Simulación de la placa de asiento

Las restricciones al movimiento que se ponen en este modelo, como en los demás modelos que se van a realizar, tiene ciertas características comunes.

- En los tornillos de la placa las restricciones al movimiento son totales. Para simular la unión de los tornillos al cemento.
- En las líneas que conformaban el perfil HEB y las soldaduras de las riostras que se apoyan en la placa, las restricciones al movimiento solo son en la dirección normal de la placa. Esto se hizo para que las placas de refuerzo no se clavaran en la placa base y no formasen un punto de máxima tensión y para modelar el efecto del suelo de cemento.

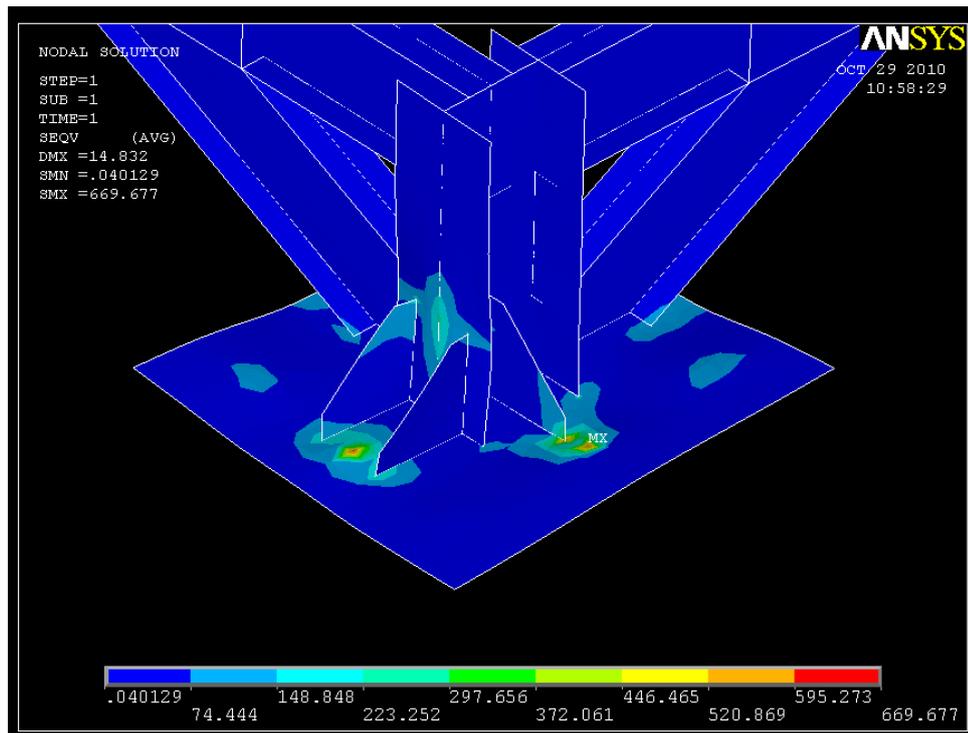


Figura 4.24. Tensiones en el apoyo sin tener en cuenta el efecto del suelo

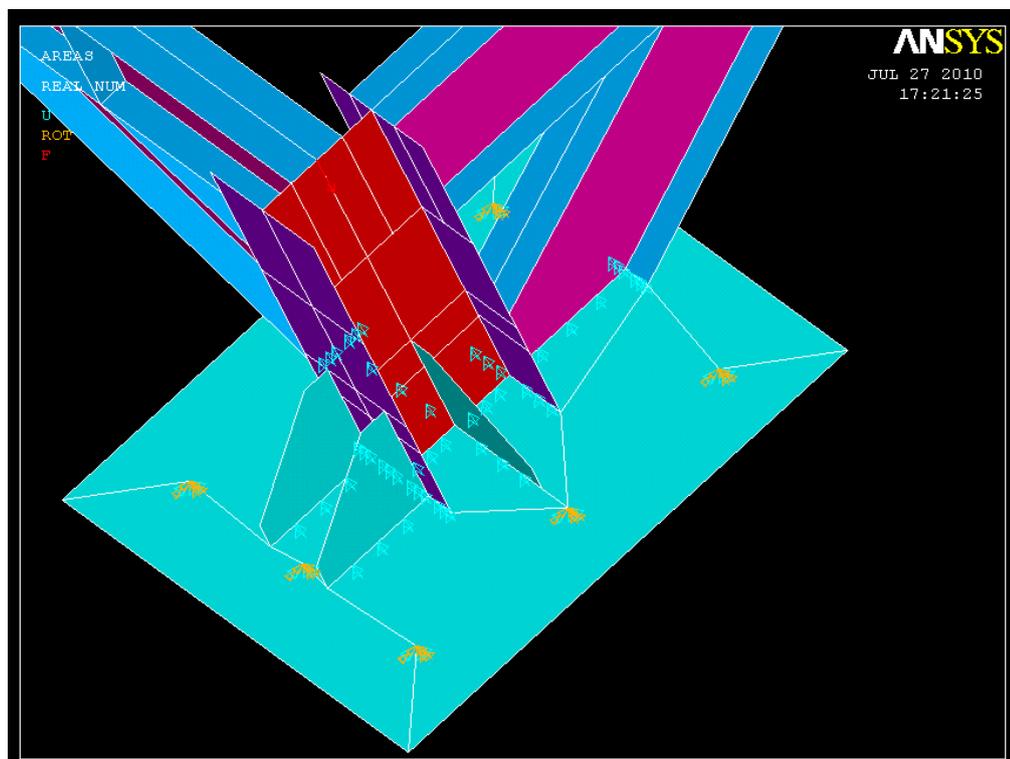


Figura 4.25. Restricciones al movimiento en la placa de apoyo

4.3.3 Conclusiones

- Los desplazamientos son en todos los modelos muy parecidos, pero las tensiones a las que están sometidos son más bajas. Esto se debe a que es posible que el grado de error entre los modelos sea de hasta un 30%.
- Las fuerzas del eje Z son exactamente iguales, eso es un indicativo de que el modelo funciona correctamente. Las reacciones de las otras direcciones tienen cierto grado de error que es mucho más asumible que el error anterior de hasta un 28% en la dirección X. Por tanto podemos suponer que este modelo tiene en cuenta ciertas características que en el modelo de barras por su simplicidad no se introdujeron como una mejor simulación de las uniones soldadas y de los empotramientos.
- La razón por la que los momentos de las reacciones son menores en el modelo tipo placa que en el modelo tipo barra y en el original; es la forma en la que se ha modelado la placa de asiento de la estructura ya que al empotrar solamente los puntos pertenecientes de los tornillos, e impedir el movimiento de hundimiento en el terreno de ciertas zonas, genera que parte de la placa tenga una pequeña libertad de movimientos que hace que los momentos de las reacciones sean más pequeños de los que deberían ser con la placa completamente empotrada.
- La conclusión que se puede sacar de los valores de la modelización de las placas de asiento es algo a tener muy en cuenta ya que las tensiones que va a soportar el terreno van a cambiar. Para una correcta modelización de estos elementos se sugiere un empotramiento total en los tornillos, un impedimento al movimiento en la dirección de las fuerzas aplicadas, solamente de bajada en toda la placa y por último la introducción una fuerza de rozamiento entre la placa y el hormigón. Estas dos últimas restricciones simularían el contacto entre el hormigón y el acero de la placa.
- Por tanto el modelo de barras, es un modelo que por su similitud en valores al modelo original, aunque con cierto grado de error, es un modelo más riguroso que el modelo anterior al tener en cuenta las distintas uniones entre vigas y haberlo construido con más exactitud que el modelo de barras. Estas uniones entre vigas pueden ser tenidas en cuenta en el código técnico y por tanto haber sido mejor modeladas en esta simulación.
- Por último comentar que este modelo no va ser el modelo final ya que la estructura modelada tendrá ciertas características como la de la unión al suelo del edificio, que cambiara su comportamiento desde el punto de vista de las tensiones y de los desplazamientos. Por tanto lo que se va a pretender es simular

a continuación, un modelo con ciertas características reales como la del suelo soldado a la estructura.

4.4 Modelo con placa superior

4.4.1 Objetivos del modelo

- El objetivo de este modelo es poner una placa superior que simulará el comportamiento del suelo, ya que la estructura real que se iba a construir tendría un suelo unido que podría cambiar su estado de tensiones, por lo que se estudiará el efecto de este suelo en la estructura.

4.4.2 Características principales del proyecto

- Aunque en la memoria del proyecto no se indica en ningún momento el tipo de suelo que se pondría ni como se uniría al resto de la estructura, se supuso un suelo de acero que se extendía por toda la estructura.
- La placa que se puso encima de la estructura era de 22mm de espesor. Este espesor de la placa se puso en función de la flecha que se obtenía tras sucesivas simulaciones, ya que al final se obtiene una flecha máxima parecida a la del anterior modelo (12mm).

4.4.2.1 Elementos utilizados

El tipo de elemento es el mismo que en el anterior modelo “elastic 4 node 63” tipo placa. Este elemento se vuelve a usar por las mismas razones que en el anterior caso, por su sencillez a la hora de ejecutar los cálculos de resolución del modelo.

4.4.2.2. Geometría y construcción del modelo

La creación de la chapa no cumplió ningún criterio específico, solamente se unieron las esquinas de la estructura, para formar la planta del edificio (que se ha dicho que debería de ser octogonal).

El empotramiento se simuló como en el anterior modelo con los tornillos con restricciones totales al movimiento y a los giros, introduciendo otra restricción al movimiento en la dirección a la fuerzas aplicadas para simular el efecto del suelo del hormigón y para evitar que se clavasen las chapas de refuerzo, en la placa de anclaje.

4.4.2.3 Mallado

Para este modelo se usaron 10 constantes reales, intentando simular el espesor de la chapa cuando se ponía encima del ala de una viga con lo que se cambiaba el espesor de la constante real del elemento.

1. Placa de anclaje y escuadra: 16mm
2. Alas de HEB 300: 19mm
3. Alma de HEB 300: 11mm
4. Alas de IPN 320: 17.3mm
5. Alma de IPN 320: 11.5mm
6. Chapas de refuerzo laterales: 17mm
7. Chapas de refuerzo superior e inferior: $17.3\text{mm} + 17\text{mm} = 34.3\text{mm}$
8. Chapa que simula el suelo: 22mm
9. Alas de IPN 320 con chapa simulando el suelo: $19\text{mm} + 22\text{mm} = 39.3\text{mm}$
10. Chapas de refuerzo superior e inferior con chapa simulando el suelo: $17.3\text{mm} + 17\text{mm} + 22\text{mm} = 56.3\text{mm}$

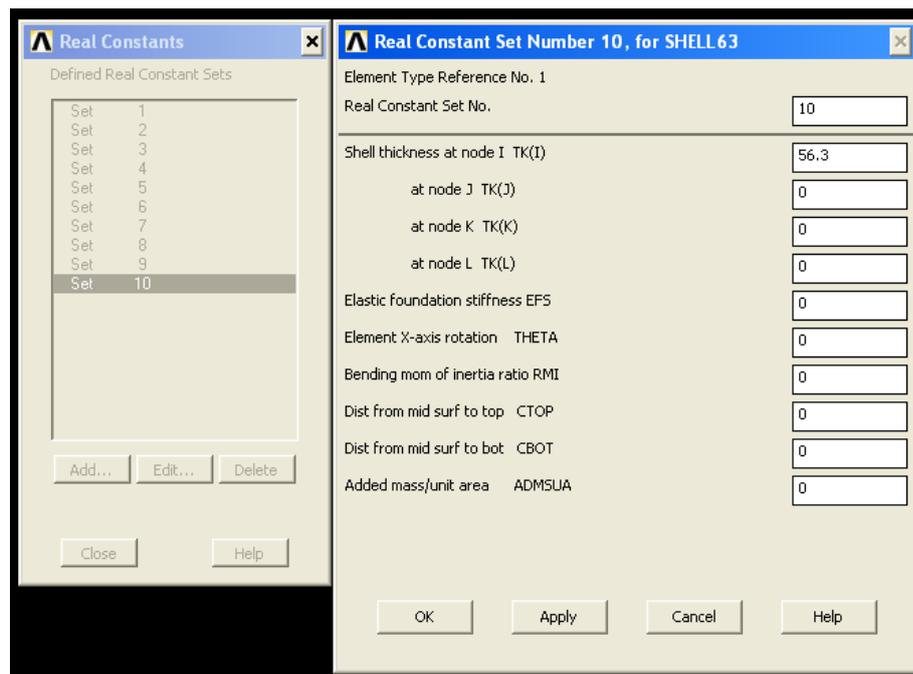


Figura 4.26. Constantes reales usadas en el modelo de placas con suelo

El mallado que se realizó fue el mismo para las partes de la estructura ya construidas (50mm) y para la chapa superior fue de 200mm. El único cuidado que se tuvo que tener es que se mallase primero los elementos más pequeños (es decir lo que no eran parte de la chapa superior y componían el resto de la estructura) para que así los

elementos más grandes que componen la chapa se adaptasen, ya que la estructura que se tienen que mallar es mucho más sencilla.

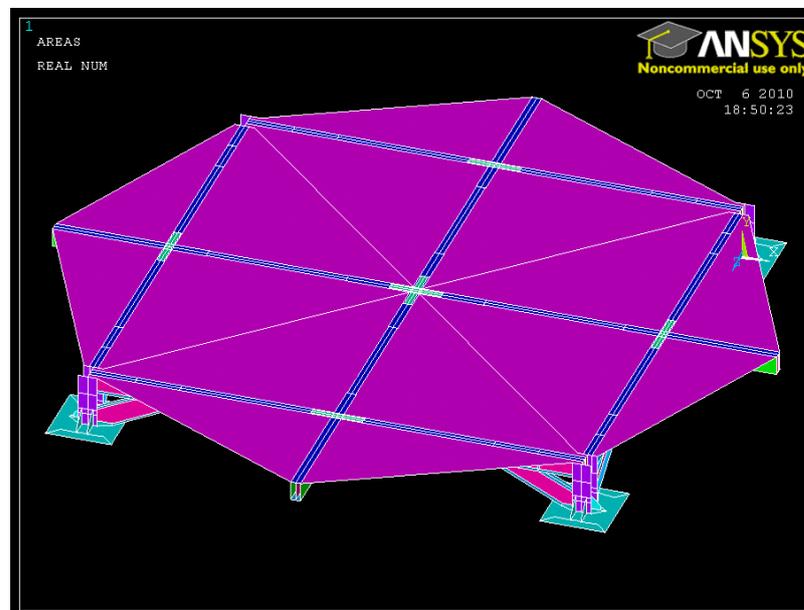


Figura 4.27. Modelo con las constantes reales



Figura 4.28. Cruz central (vista superior)

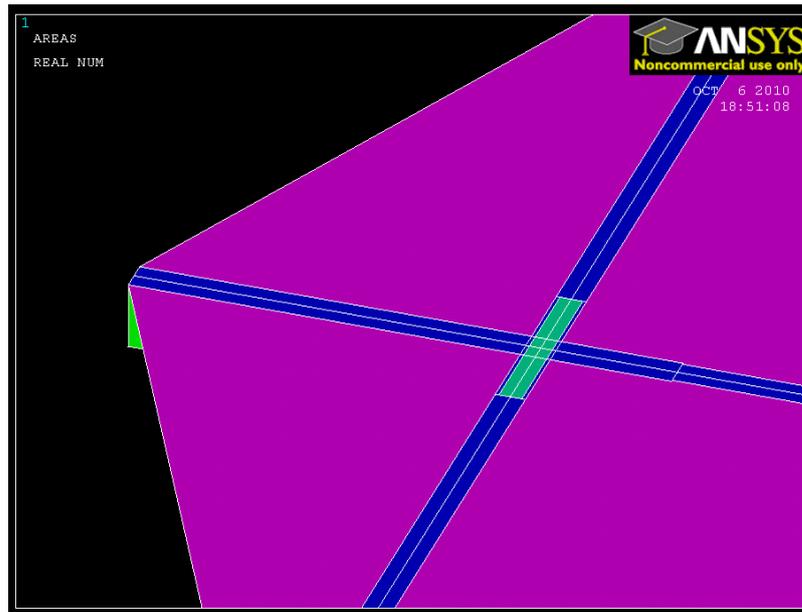


Figura 4.29. Ménsula (vista superior)

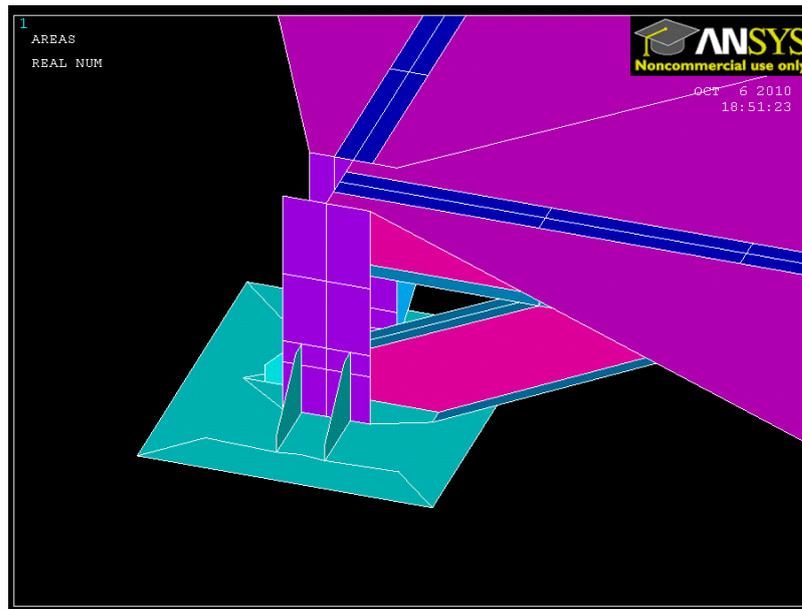


Figura 4.30. Pilar (vista exterior)

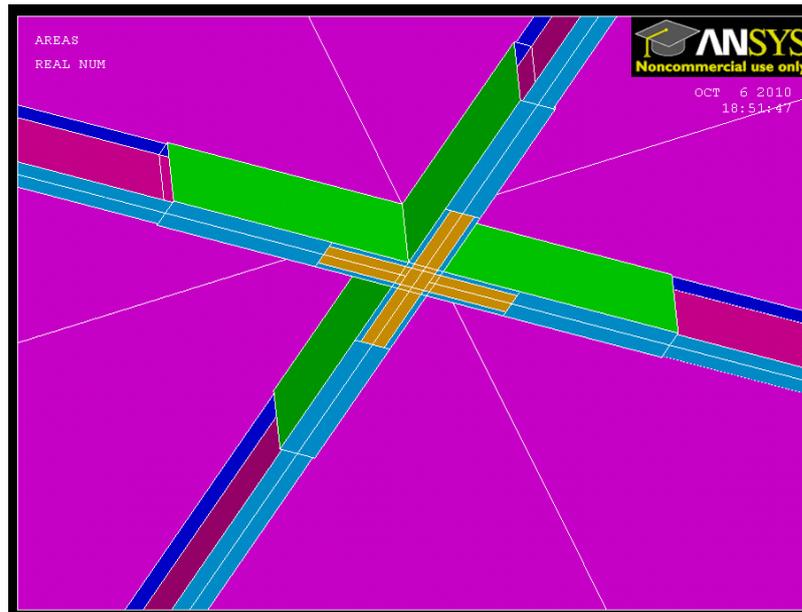


Figura 4.31. Cruz central (vista inferior)

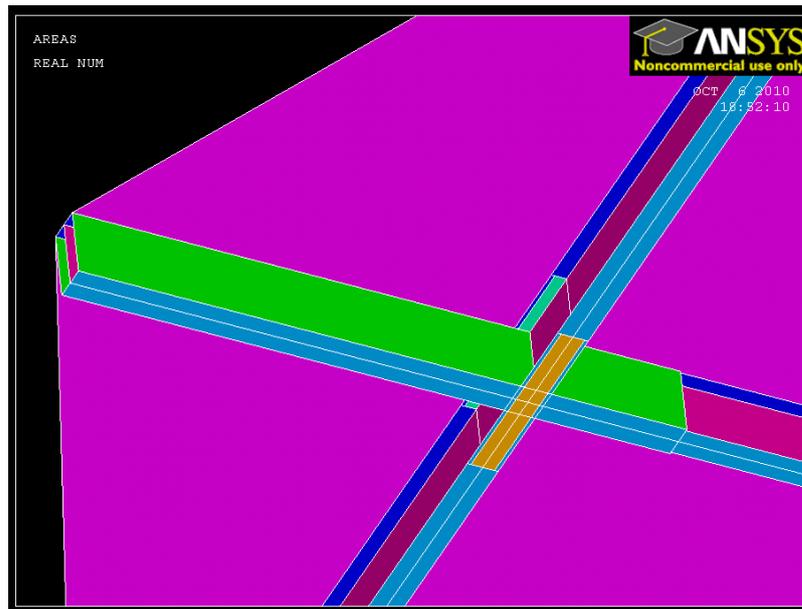


Figura 4.32. Ménsula (vista inferior)

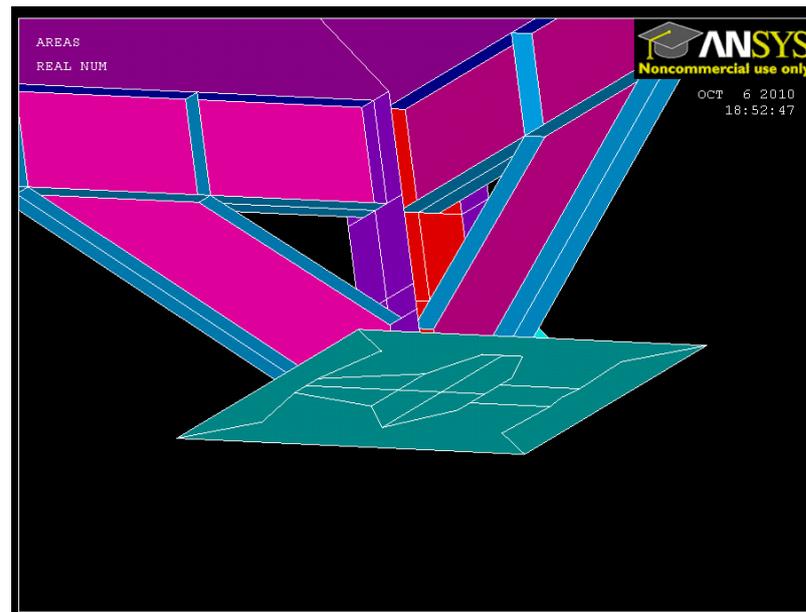


Figura 4.33. Pilar (vista interior)

4.4.2.4 Solución del modelo

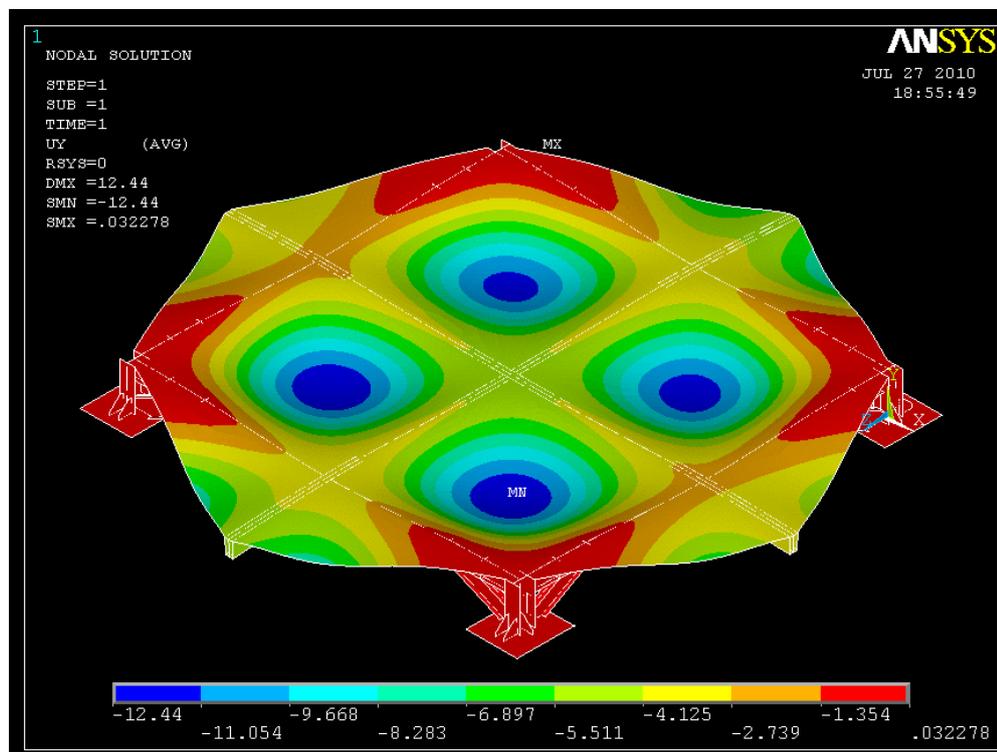


Figura 4.34. Desplazamientos de la estructura con la placa superior

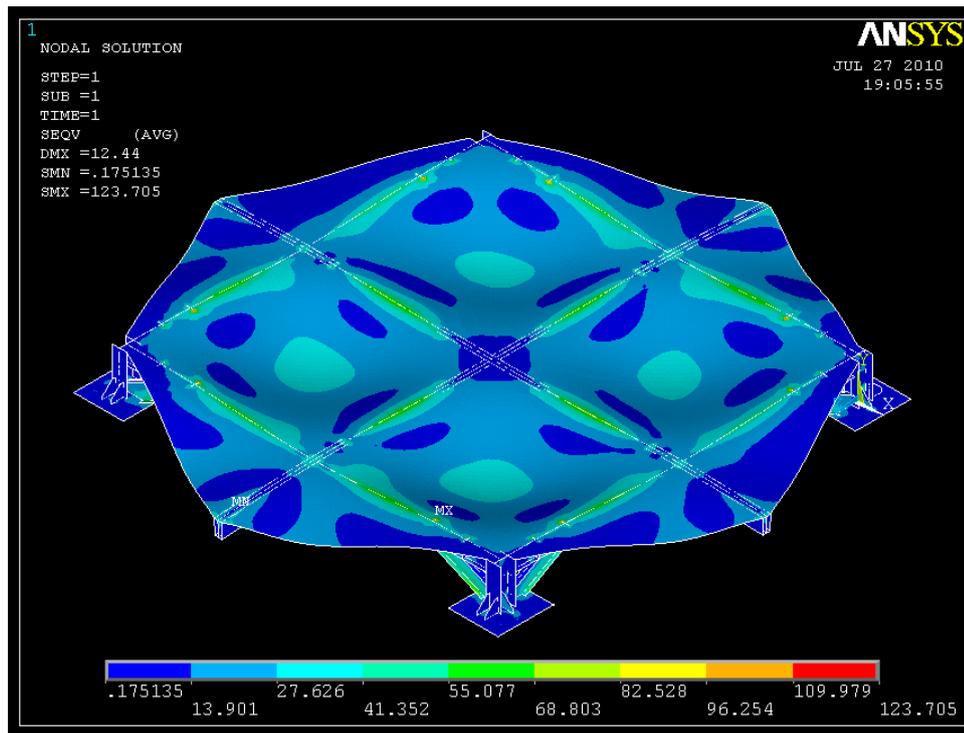


Figura 4.35. Distribución de tensiones

El punto de máxima tensión corresponde con un punto en el que la chapa se dobla y se clava con una de las pletinas de una viga.

Nudos de la estructura	Modelo original		Modelo de barras	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)
Ménsula 1,85	14,3	210,9	13,5	235
Ménsula 1,75	11,2	198,6	10	180
Nudo central	6,7	76,7	9	70
Pilar	0,03	91	0,03	70
Riostra	0,21	109	0,21	114
Nudos de la estructura	Modelo de placas		Modelo placas con suelo	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)
Ménsula 1,85	13,1	162	6,8	109,9
Ménsula 1,75	10,1	142	4,1	96,3
Nudo central	5,7	142	5,5	41,4
Pilar	1,4	61	1,3	55,1
Riostra	1,4	81	1,3	96,3

Tabla 4.11. Desplazamientos y tensiones de todos los modelos

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
Reacciones del modelo de placas con suelo	-174310	211090	212290	-1347,8	-2308,8
	-178050	-211090	212290	-1418,2	2308,8
	178050	210140	212290	1347,8	-2499,3
	174310	-210140	212290	1418,2	2499,3

Tabla 4.12. Reacciones del modelo de placas

Las reacciones que obtenemos se comprueban, para saber si el modelo actúa correctamente. Como en los otros casos, se restan las reacciones obtenidas en Z con la carga aplicada anulándose estos dos valores. A continuación se suman los valores positivos y negativos de las otras reacciones para que se anulen entre sí, esta condición también se cumple.

Si comparamos el modelo de la placa en el suelo con el modelo sin placa en el suelo, obtenemos los siguientes valores.

Reacciones del modelo de placas con suelo/Reacciones modelo de placas sin suelo	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	111,0	149,0	101,0	15,5	24,5
	111,7	149,0	101,0	17,6	24,4
	111,7	147,6	101,0	15,7	26,2
	111,0	147,6	101,0	17,4	27,5

Tabla 4.13. Comparación entre el modelo de placas con suelo y sin suelo

4.4.3. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden sacar de este modelo son:

- Los desplazamientos que se producen en este modelo en las ménsulas, reducen su flecha prácticamente la mitad. Por lo tanto la conclusión que se puede sacar es que la chapa superior que intenta simular el comportamiento del suelo que iría soldado al emparrillado de la estructura, rigidizaría la estructura.
- Las tensiones en este modelo también se ven afectadas ya que la chapa también cambia su distribución tensional. Esta reducción de las tensiones se produce ya que las cargas que deberían distribuirse por el área que componía las vigas ahora se distribuye por un área mayor, haciendo que cambien todas las tensiones.

- Las reacciones obtenidas en X y en Y, en este modelo son mucho mayores que en el modelo realizado con placas, ese comportamiento se contrapone a lo que se pensaba obtener en un principio. Al saber que la estructura tenía menos capacidad de movimiento las reacciones que se oponen a ese movimiento deberían haber sido más pequeñas, sin embargo son mucho más grandes. Esto se puede explicar, a que la placa impide que la flecha de las ménsulas sea mayor, pero a su vez hace que el comportamiento de toda la estructura sea más homogéneo y que la fuerza por unidad de área que se está aplicando afecte a toda la estructura de una forma que los pilares aumenten sus reacciones.
- Los momentos flectores que obtenemos son mucho más pequeños que los obtenidos en el modelo de placas anterior y por tanto más pequeños que en el modelo original. Estos datos de los momentos flectores nos hacen pensar que el efecto de los giros se ve reducido con la introducción de la placa.
- La conclusión final de este modelo es que al introducir una placa como suelo las tensiones de la estructura van a ser más pequeñas, que el comportamiento que va a tener en la realidad no va a ser el del modelo de vigas y tampoco el del modelo de placa con suelo, sino que será una mezcla de ambos modelos ya que el suelo que se pondrá no estará perfectamente soldado a la placa. El siguiente paso a estudiar será el análisis específico de una zona concreta del modelo para detectar algún fallo en la idea original del proyecto.

4.5 Vibración de la estructura.

Se realizó un análisis de los modos de vibración de la estructura con los modelos realizados con elementos tipo placa con chapa superior y sin ella. Teniendo en cuenta:

1. Un edificio se comporta adecuadamente ante vibraciones debidas a acciones dinámicas, si la frecuencia de la acción dinámica (frecuencia de excitación) se aparta suficientemente de sus frecuencias propias. [8]

2. En el cálculo de la frecuencia propia se tendrán en cuenta las posibles contribuciones de los cerramientos, separaciones, tabiquerías, revestimientos, solados y otros elementos constructivos, así como la influencia de la variación del módulo de elasticidad y, en el caso de los elementos de hormigón, la de la fisuración. Para nuestro caso el cálculo se realizó mediante un análisis modal de la estructura y no se tuvieron en cuenta este tipo de elementos, ya que no existían.

3. Las vibraciones pueden producir el colapso de la estructura portante (por ejemplo debido a fenómenos de resonancia, o a la pérdida de la resistencia por fatiga).

4. Se admite que una planta de piso susceptible de sufrir vibraciones por efecto rítmico de las personas, es suficientemente rígida, si la frecuencia propia es mayor de:

- a) 8 Hz, en gimnasios y polideportivos.
- b) 7Hz en salas de fiesta y locales de pública concurrencia sin asientos fijos.
- c) 3,4 Hz en locales de espectáculos con asientos fijos.

En nuestro caso solamente se tendrán en cuenta los modos de vibración de la estructura en la dirección según la aplicación de cargas es decir donde se producen las pisadas de las personas. Como se ve en la norma, nuestro caso es el caso b) al tratarse de un quiosco de música.

Los resultados fueron:

- La primera frecuencia de vibración con la chapa superior es de 34.28Hz. En este caso sería imposible que la estructura a causa de las vibraciones, sufriera algún tipo de daño. Esta frecuencia de oscilación tan alta se debe a que la estructura no es un conjunto de elementos esbeltos, de gran longitud, sino más bien un gran macizo de acero que gracias a la chapa superior le confiere propiedades rigidizantes a la estructura.
- La frecuencia de vibración sin la chapa superior es de 14,87Hz. En este caso el daño posible que podría ocasionar la vibración de la estructura por el tránsito de las personas, no sería posible al estar muy lejos del valor dado en la normativa. Este valor más bajo que el anterior se debe a la gran separación de las vigas en el emparrillado.

De todos modos la verdadera frecuencia de oscilación no será ni la una ni la otra ya que la estructura tendrá un suelo soldado, pero ese suelo no estará soldado por todos los puntos. Por lo que la frecuencia del primer modo de vibración referente al tránsito de las personas es un valor intermedio al de los dos valores conseguidos, que estará por encima del valor de 7Hz que da la norma.

4.6 Modelización de la soldadura con elementos sólidos

4.6.1 Objetivos del modelo

- EL siguiente modelo se realizó para poner a prueba la resistencia de las soldaduras, para ser exacto, la unión entre la ménsula de 1885mm (la ménsula más larga y en donde se producía el punto de máxima tensión en todos los modelos) con el resto del emparrillado.

4.6.2 Características principales del modelo

- El modelo se basa en el modelo de placas realizado anteriormente, pero modelando con sólidos, las partes interesadas.
- Las placas de asiento se modelaron como en las anteriores simulaciones.
- Este modelo se compone de cierto número de vigas, placas y uniones que hace que pueda resultar difícil la comprensión a las referencias a las distintas partes de lo que se quiere modelar. Este modelo se va a componer de:
 - Una viga (la que en la figura 4.36 es la de mayor longitud), que es la extensión de la viga central del emparrillado que llega hasta el centro de la estructura.
 - Dos chapas de refuerzo laterales, cuya función es rigidizar la ménsula que se unen a la viga central por las alas.
 - A las chapas de refuerzo se les sueldan las dos vigas laterales a cada lado que pertenecen a las vigas del perímetro de la estructura. Las soldaduras que unen las chapas de refuerzo lateral con las vigas, son soldaduras en las alas y en las almas.
 - Por último dos chapas de refuerzo, tanto en la parte superior e inferior, que une las vigas laterales, a la viga de mayor longitud.

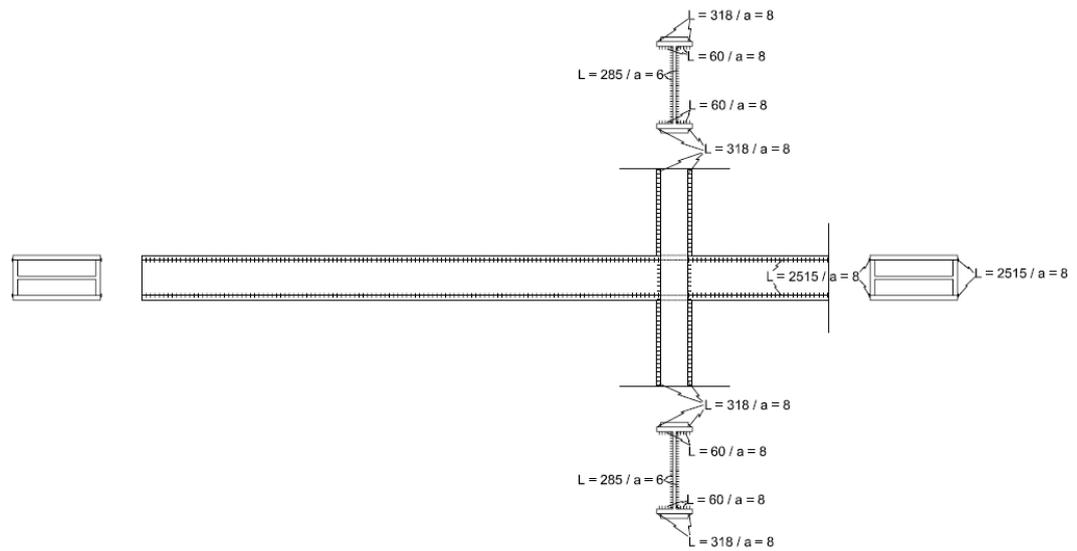


Figura 4.36. Planos de las soldaduras de la viga en voladizo

- El valor de “a” que se ve en la figura 4.36 se dio directamente sin ningún cálculo en la memoria del proyecto constructivo original, su definición corresponde a: espesor de garganta del cordón en ángulo, que será la altura, medida perpendicularmente a la cara exterior, del triángulo que la tenga mayor, de entre los que se pueden inscribir entre las superficies de las piezas que hayan alcanzado la fusión y la superficie exterior de la soldadura (Figura 4.37). [7]

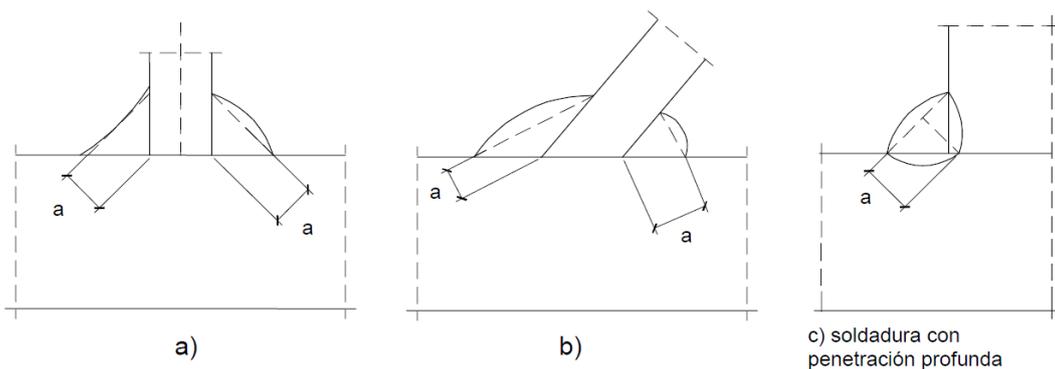


Figura 4.37. Soldadura en ángulo espesor de la garganta

4.6.2.1 Uniones soldadas.

Soldadura en ángulo. Se utiliza para unir elementos cuyas caras de fusión forman un ángulo (α) comprendido entre 60° y 120° . [7]

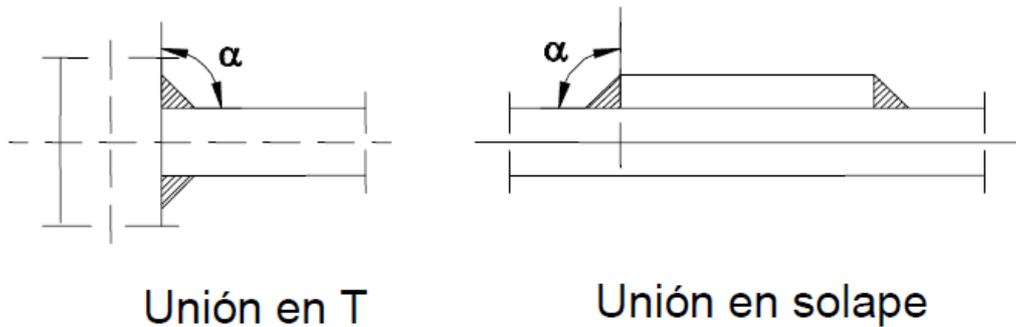


Figura 4.38. Tipos de uniones

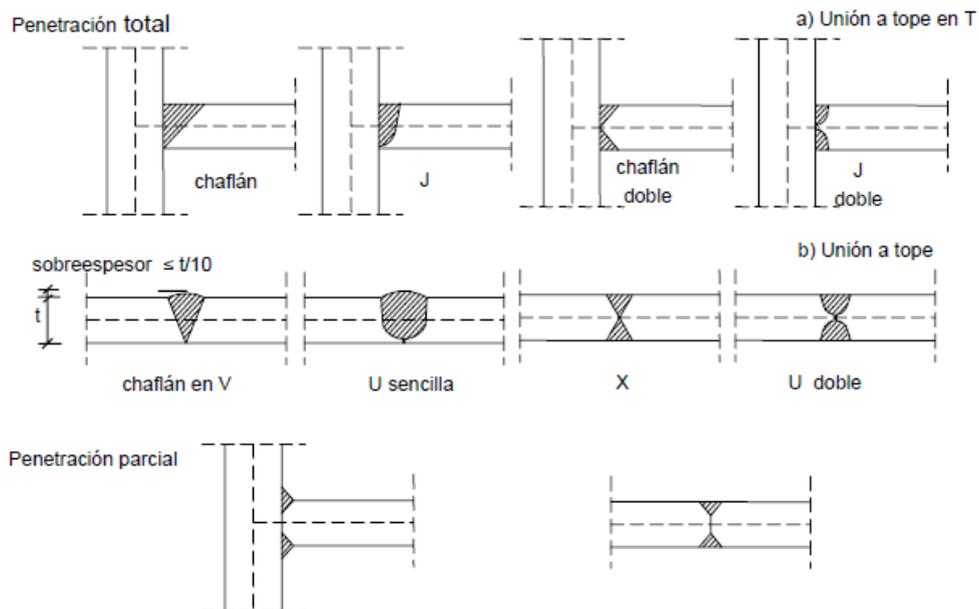


Figura 4.39. Soldadura a tope y forma de preparación

Las soldaduras de este proyecto son:

- Unión en T entre las chapas de refuerzo lateral y las vigas del perímetro.
- Unión en solape entre la chapa de refuerzo superior e inferior y las vigas del perímetro y la viga central.

- Unión con un chaflán en V entre las placas de refuerzo laterales y la viga central.

4.6.2.2 Elementos utilizados

Para la realización de este modelo se usaron dos tipos de elementos brick de 8 nodos 45 para los volúmenes y elastic 4 node 63 para las placas.

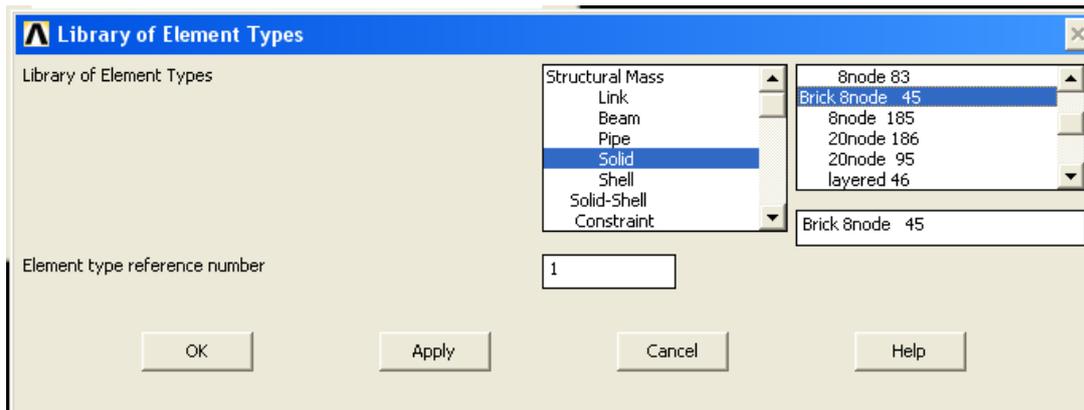


Figura 4.40. Elemento solido utilizado en el modelo

El elemento brick de 8 nodos 45 se escogió por su gran versatilidad, a las distintas situaciones a las que se le puede someter. Es un elemento valido para todo tipo de estudios, desde las simulaciones estáticas, hasta análisis térmico. Y su resolución por parte del ordenador es muy sencilla.

4.6.2.3 Construcción y geometría del modelo

Para la construcción de este modelo se tuvo que tener en cuenta; que al igual que, para que una placa se una a otra, deben contener ambas en la geometría una línea que componga a las dos áreas. En los modelos de sólidos, los volúmenes deben tener áreas, que formen parte de ambos sólidos a unir y que a su vez sean parte de estos sólidos. Bajo esta premisa se construyó todo el modelo. Se destruyó la parte del modelo que estaba hecho con placas y se reconstruyó con elementos sólido.

Como en todos los modelos construidos, se simplificaron ciertas partes para facilitar su cálculo y manejo de datos:

- No se introdujeron fuerzas de rozamiento, ni ningún tipo de característica al modelo que implicase contacto entre superficies. En el modelo cuando los sólidos se ponían en contacto, podían introducirse un sólido dentro de otro, sin que hubiera ningún tipo de reacción o restricción al movimiento. Estas restricciones se podrían haber realizado, pero complicaban mucho el modelo y las zonas de contacto entre sólidos eran muy pequeñas por lo que no hubieran cambiado mucho la solución a la que se llegó. Por tanto no se introdujeron en el proyecto
- La soldadura que une la chapa de refuerzo superior e inferior con las vigas laterales y la viga central se aumentó su ancho de lo que estaba marcado en un principio en los planos, ya que no acababa en el borde la viga sino unos pocos milímetros más atrás. Se decidió ponerlo hasta el final, ya que eso hubiera complicado el proceso de mallado y hubiese podido generar elementos distorsionados. Como se puede ver en la imagen de la figura 4.41.

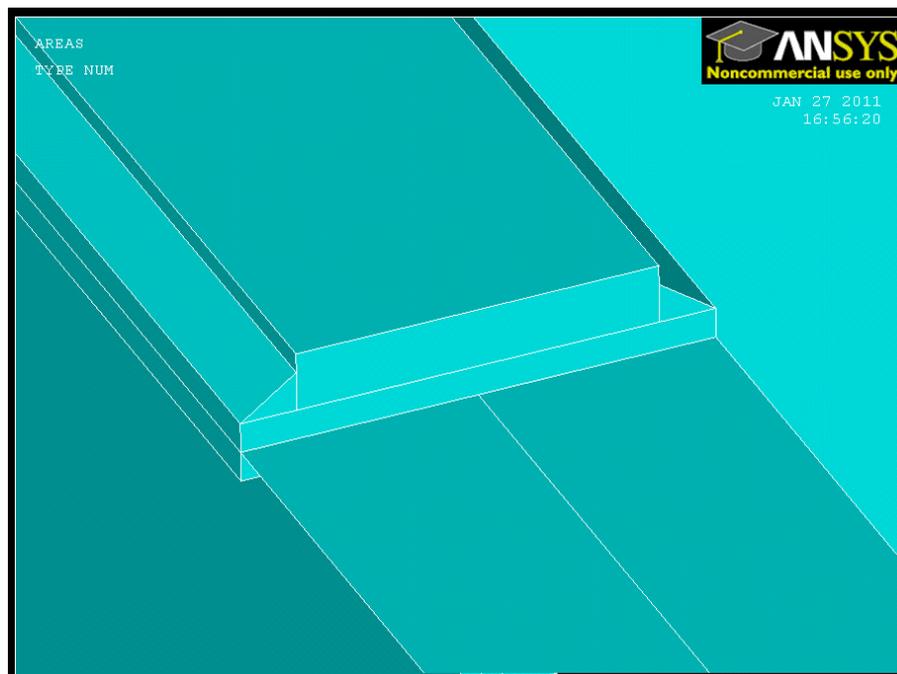


Figura 4.41. Soldadura de la placa superior simplificada

El ancho de las soldaduras a modelar se obtuvo de la memoria del proyecto original, en el que no se explicaba el método de cálculo de la profundidad de las soldaduras.

4.6.2.4 Mallado

El tamaño que se escogió para los elementos fue: de 150 mm para los elementos tipo placa, 50mm para los elementos tipo sólido para las chapas de refuerzo lateral y las vigas, y por último 5mm para las soldaduras y las chapa de refuerzo superior. Esta selección del tamaño de nodos se corresponde con el grado de precisión que se le quiere dar a la estructura. El tamaño de 150 mm para los elementos tipo placa se corresponde a que estos elementos ya habían sido probados con anterioridad y el grado de precisión que se les quiere dar no es importante, solamente los queremos usar para el funcionamiento correcto del modelo. Los elementos tipo sólido se modelizaron con un menor tamaño que los elementos tipo placa, para tener mayor precisión en los resultados y para que no se formaran elementos con formas extrañas. Ya que el sólido se componía de muchas esquinas y chaflanes, y las secciones de unión entre los distintos sólidos podían tener geometrías anómalas que afectasen al proceso de mallado. Las soldaduras se modelizaron con elementos lo más pequeño posibles, atendiendo al criterio de no generar elementos demasiado pequeños para su tratamiento ya que si no la matriz de rigidez sería demasiado grande (y costaría mucho tiempo resolverla). Por como se hizo el modelo también se tuvo que mallar las placas superior e inferior de refuerzo con elementos de tamaño 5 mm ya que en esas zonas eran donde los mayores esfuerzos se encontraban en los anteriores modelos.

- Tamaño de malla de 150mm: modelo realizado con placas, es decir el resto de la estructura. El objetivo de esta parte de la estructura era complementar al modelo.
- Tamaño de malla 50mm: modelo realizado con volúmenes, salvo las soldaduras y las placas superiores e inferiores. El objetivo de este mallado era tener una serie de datos lo suficientemente específicos como para que se transmitiesen las cargas sin errores a lo largo del sólido, la formación de una malla con elementos con formas regulares y que los elementos fuesen lo suficientemente grandes como para que el modelo se resolviera en un tiempo adecuado.
- Tamaño de malla de 5mm: soldaduras y placas inferior y superior. El objetivo de este mallado era tener unos datos muy precisos en las soldaduras y en los puntos de máxima tensión. En el caso de las soldaduras era fundamental mallar con elementos tan pequeños, ya que eran las zonas donde los sólidos iban a transmitir sus tensiones a través de esas áreas, y se necesitaba de la máxima precisión.

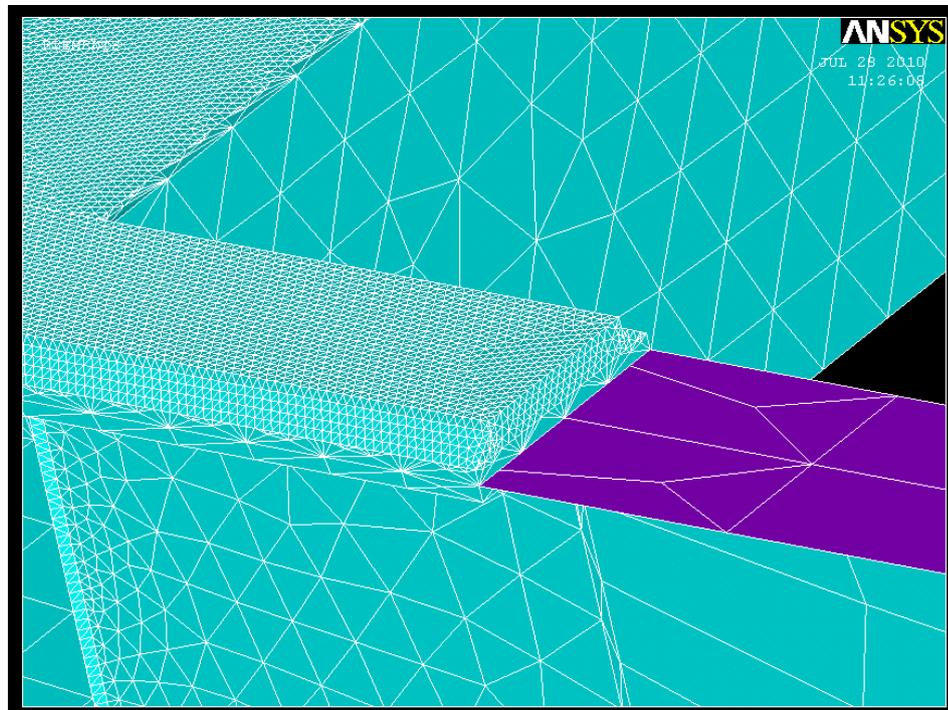


Figura 4.42. Diferentes tamaños de elementos usados para el modelo

En la figura anterior se ven los distintos tamaños de elementos, los elementos tipos placa de tamaño mayor que componen el resto de la estructura, los elementos sólidos de la viga de tamaño 50 mm y los elementos de tamaño 5 mm que componen las soldaduras y la placas de refuerzo superiores. También comentar el grado de variación de tamaño del mallado, ya que la malla se debe ir adaptando al tamaño del elemento con el que se está mallando el sólido en cuestión. Con eso se asegura la continuidad del mallado, sin la generación de elementos con forma problemática. Se puede ver en la imagen como la chapa de refuerzo lateral se une directamente a la soldadura sin que el tamaño de nodo no tenga un decrecimiento, y por tanto que parezca que no estén unidas ambas secciones. Eso no es cierto ya que la variación de tamaño de los elementos se produce por el interior de la chapa.

El número de nodos final en la estructura es de 154.194. Este número de nodos fue considerable ya que el tiempo de procesamiento del ordenador para mallar la estructura y luego resolverla fue de unos diez minutos.

4.6.2.5 Aplicación de las cargas

La aplicación de las cargas repartidas sobre el área en este modelo fue diferente que la de los modelos anteriores:

- Se calculó el área que tenían todos los perfiles que estaban en contacto con el suelo de lo que iba a ser el edificio, es decir los que asumían la carga por unidad de área. Con esto llegamos a que 6.3 m^2 correspondían a la estructura modelada con elementos tipo placa y 0.42 m^2 para la parte de la estructura modelada con elementos sólidos.
- Una vez que el área se había calculado se dividía estas dos aéreas entre el área total es decir que el área formada por elementos tipo placa era el 93.75% y el área con elementos sólidos era 6.25%.
- Se multiplica estos porcentajes por la fuerza de 604000N (fuerza aplicada sobre al área) y se tienen dos fuerzas $566250/n^\circ$ de nodos de la estructura formada por aéreas y $37750/n^\circ$ de nodos de la estructura formada por sólidos.

Así se distribuyen y se consigue una distribución de las fuerzas por todo el área de la estructura.

4.6.2.6 Resultados

Para saber que se ha realizado bien la distribución de las cargas a través de la estructura y que el modelo funciona de forma correcta se estudiaran las reacciones como en los anteriores modelos. Se debe comprobar que las cargas en la dirección Z con las reacciones se anulan, en este caso el valor es prácticamente cero. La otra comprobación es que las reacciones se anulen entre sí, que también se cumple.

Modelo	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N·m)	MY (N·m)
con ménsula realizada con sólidos	141750	-159500	210185	-8587,2	-9540,4
	-141750	-158500	210185	-8141,2	9581,7
	142850	159500	210185	8690,5	-9644,2
	-142850	158500	210185	8255,6	9201,8

Tabla 4.14. Reacciones del modelo con elementos tipo solido

Si actuamos como en los anteriores casos y los comparamos con otros modelos ya realizados, en este caso con el modelo de placas sin placa soldada, obtenemos como resultado.

Modelo de sólidos/Modelo de placas	FX (%)	FY (%)	FZ (%)	MX (%)	MY (%)
	100,07	101,54	100,00	98,85	101,06
	100,07	99,48	100,00	101,24	101,05
	100,33	100,11	100,00	101,16	101,05
	100,33	100,90	100,00	101,23	101,10

Tabla 4.15. Comparación entre el modelo realizado con sólidos y el modelo realizado con placas.

Las reacciones que se obtienen, si se comparan con las del modelo de placas son muy semejantes. Con esta comparación sobre las reacciones, se quería comprobar que se habían distribuido bien las cargas y por los resultados obtenidos es correcta la distribución.

Los desplazamientos y tensiones se estudian a continuación.

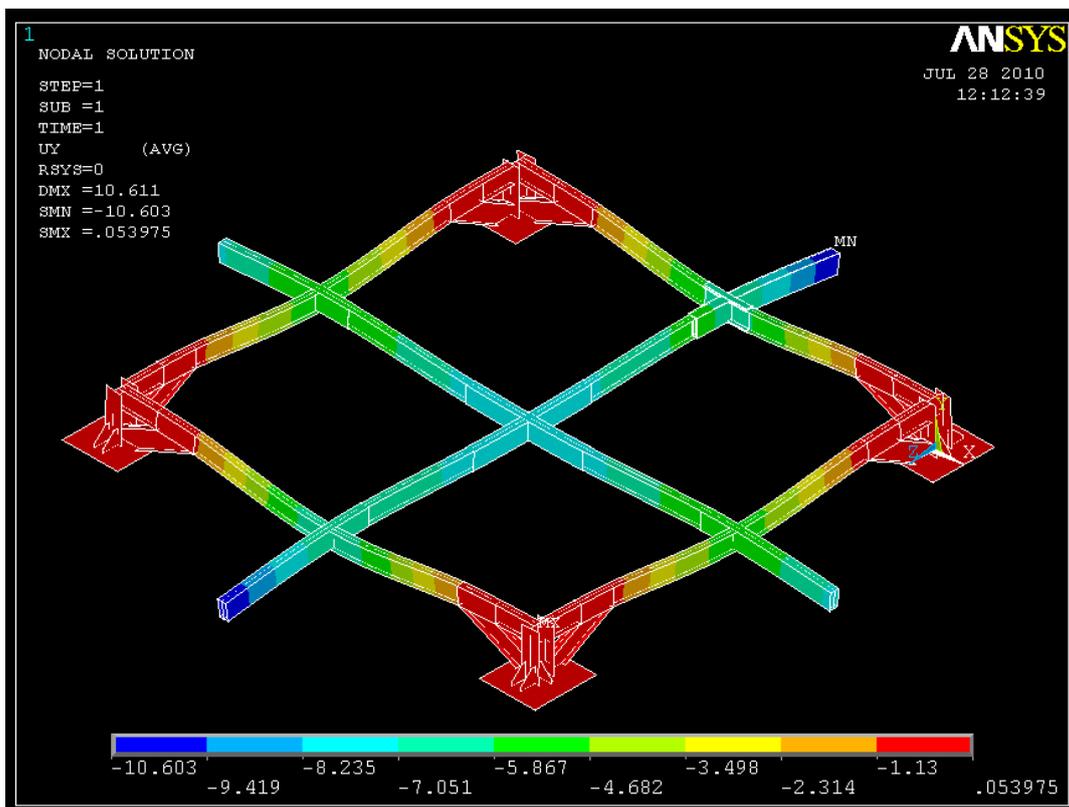


Figura 4.43. Desplazamientos del modelo de sólidos

Como se ve en la imagen los desplazamientos de la estructura son simétricos lo que quiere decir que el modelo de la ménsula formada por elementos sólidos se comporta igual que el modelo generado por placas de la ménsula opuesta. Las flechas

obtenidas en este modelo son semejantes en valor a las obtenidas en otros modelos anteriores.

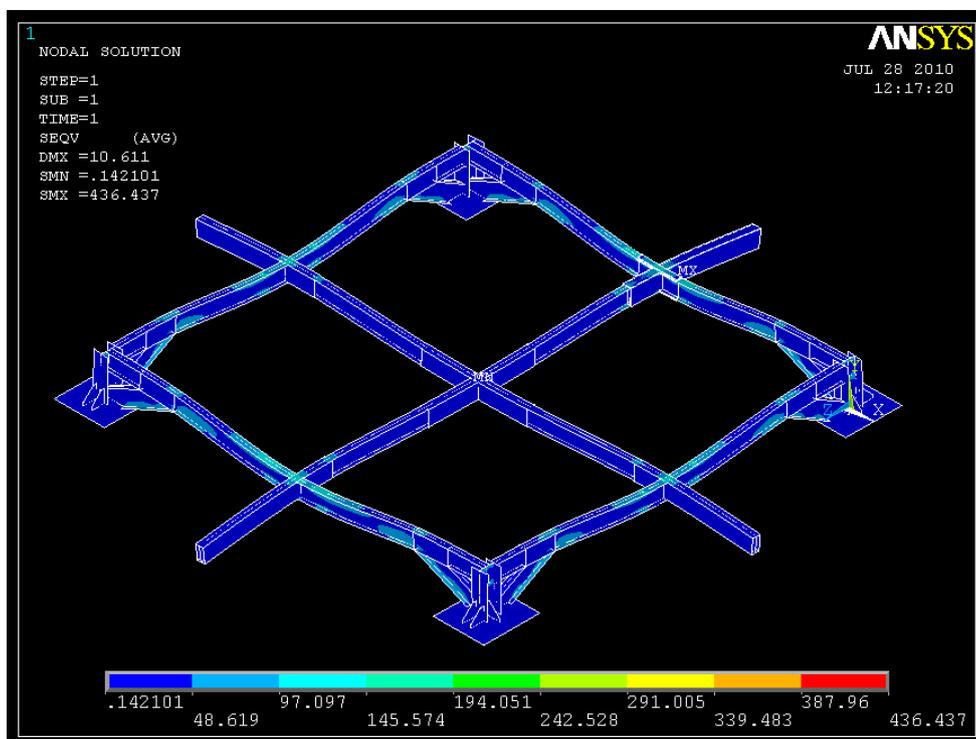


Figura 4.44. Tensiones del modelo de sólidos

La siguiente tabla muestra un cuadro resumen de las flechas y las tensiones de la estructura comparada con el modelo de placas.

Nudos de la estructura	Modelo placas		Modelo de sólidos	
	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)
Ménsula 1,85	13,1	162	10,6	194,05
Ménsula 1,75	10,1	142	8,3	145,5
Nudo central	5,7	142	5,8	145,5
Pilar	1,4	61	1,1	97,1
Riostra	1,4	81	1,1	97,1
Ménsula modelada con sólidos	#	#	10,6	387,9

Tabla 4.16. Desplazamientos y tensiones del modelo de placas y el modelo de sólidos.

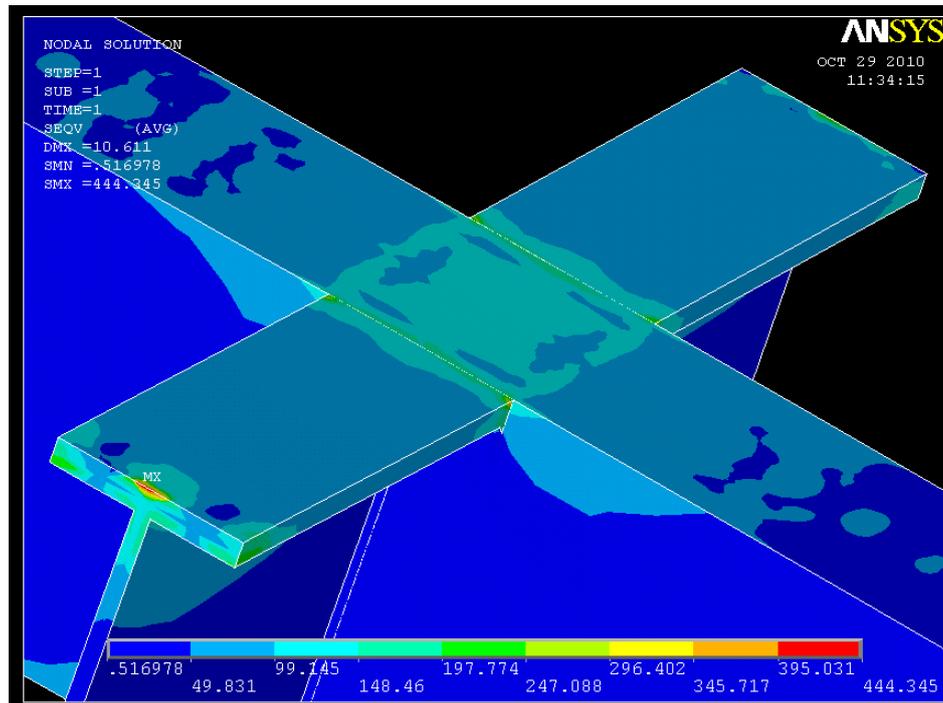


Figura 4.45. Punto de máxima tensión debido a error del mallado

El máximo de la tensión del modelo es de 436.437MPa (Figura 4.45) ese valor se debe a un error en la malla, que podría haberse originado por algún defecto en el proceso de mallado. Este punto tiene que ser un fallo debido a que no se está cargando ninguna fuerza en él (provoca un error por un punto singular) y que el punto simétrico a él no tiene ese comportamiento, por tanto es un fallo. Aunque el punto de máxima tensión encontrado es de 410.56MPa (Figura 4.46), este punto se halla en la soldadura de la placa superior y aguanta la máxima tensión de tracción.

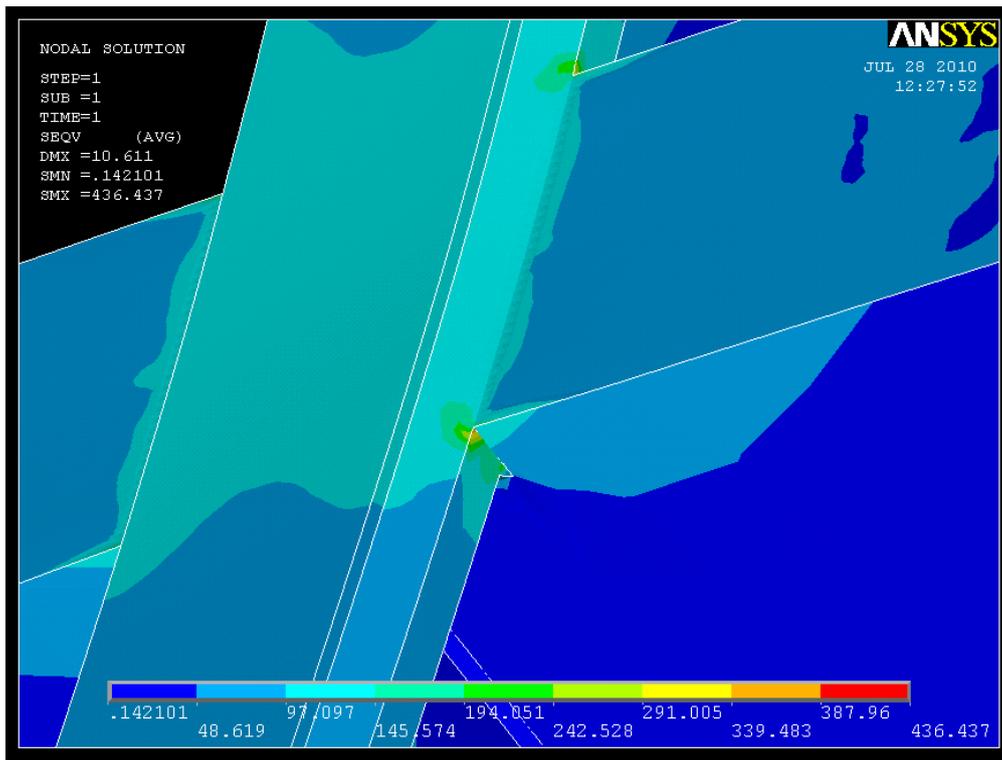


Figura 4.46. Punto de máxima tensión.

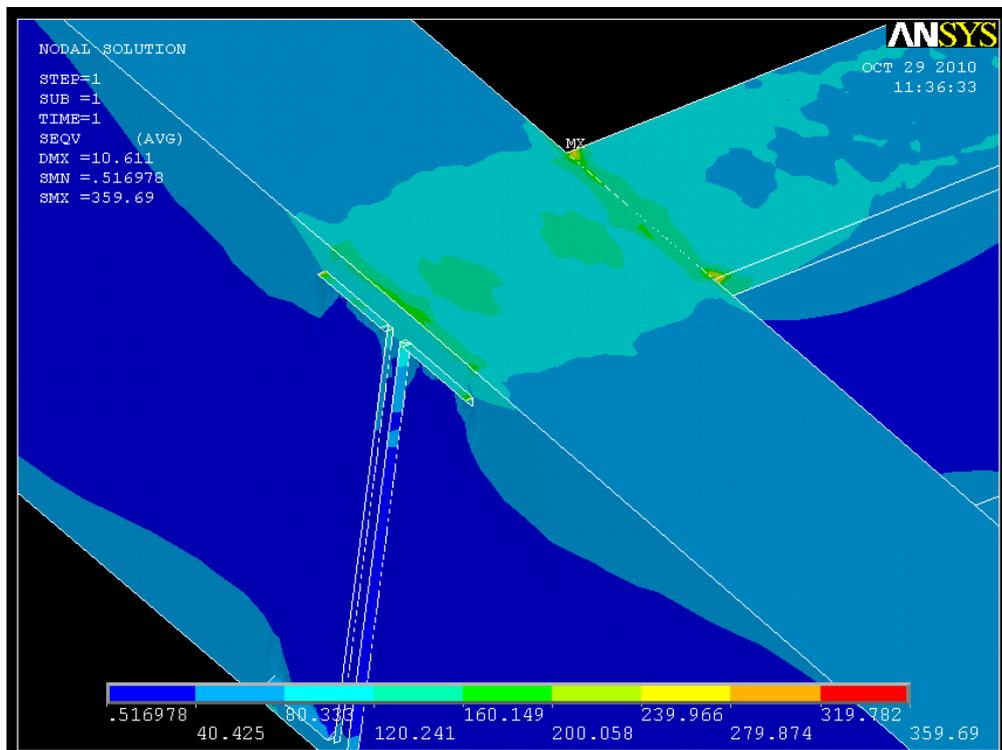


Figura 4.47. Tensiones sin tener en cuenta el defecto del mallado ni el punto máximo de tensiones

Obtendremos el valor de las tensiones en el resto de las soldaduras del modelo, seleccionando en ANSYS solo los volúmenes que conforman las soldaduras.

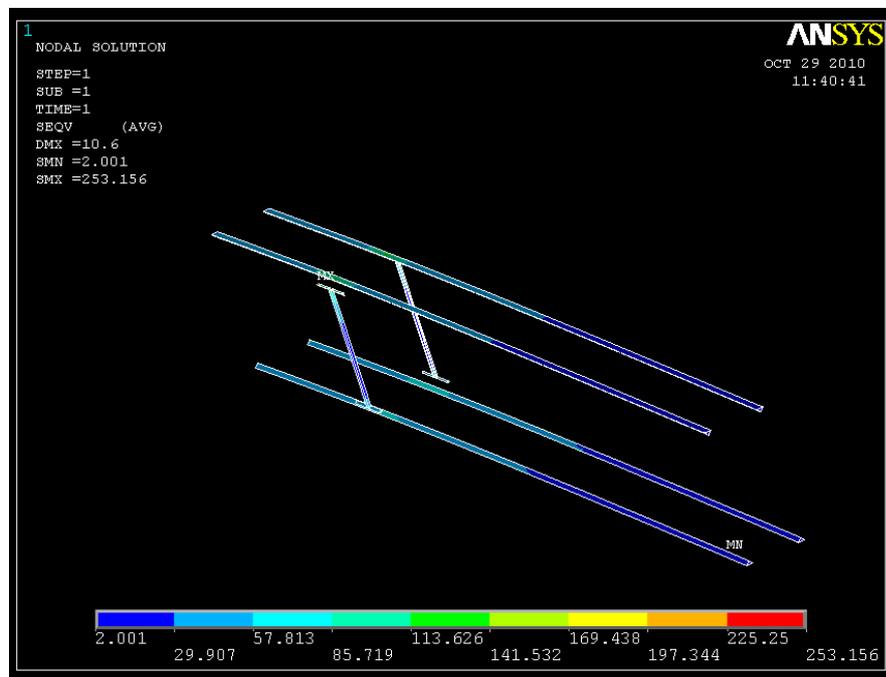


Figura 4.48. Selección de los volúmenes que conforman las soldaduras

Como se puede ver en la Figura 4.48 la tensión máxima que están aguantando la mayoría de las soldaduras es de 253,156MPa un valor muy bajo comparado con el valor de 410MPa que está aguantando la soldadura de la placa superior.

4.6.3 Conclusiones

- Las reacciones en este modelo son muy parecidas al modelo tipo placa, es de esperar ya que es una simulación exactamente igual, pero con una parte modelada en sólidos.
- Los desplazamientos que se obtiene en este modelo son menores debido al error producido entre los modelos que es de hasta un 30%.
- Otro punto a tener en cuenta es el valor de tensión elevada de la estructura (410,56MPa), en la base del voladizo mallado con sólidos. Este valor se debe a que el voladizo se está flexionando, mientras que las soldaduras que se unen a la viga perimetral deben transmitir ese giro que provoca la flexión de la ménsula.

Lo que provoca a su vez una especie de cortante en la soldadura de la chapa de refuerzo. A este efecto le tenemos que sumar que la sección total de la unión entre la viga en voladizo y el resto de la estructura solamente lo tiene que aguantar el área de la soldadura, haciendo que las tensiones sean mayores de lo que realmente se podría haber pensado al suponer en el programa original un nudo en el que las vigas coincidían perfectamente.

- Por último, para intentar resolver el problema de las tensiones en las soldaduras se va a intentar recurrir a una solución sencilla que procure reducir los esfuerzos. En el siguiente punto se desarrolla esta solución.

4.7 Solución de diseño

4.7.1 Objetivos de la simulación

Esta solución se planteo para intentar reducir las tensiones que se generaban en el extremo de la ménsula sin cambiar en un principio el planteamiento del diseño original. Este problema se ocasionaba por dos características:

- La unión entre la ménsula y la viga del perímetro era una esquina que actuaba como acumulador de tensión.
- La tensión era muy grande porque el área de la que dependía para la flexión era muy pequeña.

Por lo que para reducir ambas características del problema se debería optar por una solución que eliminase a ambas. Es decir que cambiase la forma de la unión entre las vigas y que aumentase el área de transmisión de esfuerzos. Además se agradecería para los costes de diseño que fuese una solución sencilla y barata, por lo que al final se opto por poner 8 placas de acero con forma triangular unidas a las alas de las vigas del perímetro y a las planchas de acero de las vigas laterales.

4.7.2 Características principales del modelo

La construcción del modelo no supuso ningún problema, el mallado se realizó de la misma manera que en el modelo de sólidos anterior, y las placas que se pusieron se mallaron con un tamaño de malla de 50mm, porque lo que nos interesaba era el efecto que tendría estos elementos en las soldaduras y no las tensiones que se produjesen en ellos.

El tamaño de las placas que se iban a poner en la estructura se escogió usando un criterio de reducción de las tensiones en las soldaduras, al mismo tiempo que se intentaba reducir la tensión implicada en el resto de la viga. En un principio la chapa que se usó para este cálculo fue la de lado 100mm, el proceso de diseño que se había pensado en un principio era ver las tensiones en la soldadura y luego ir aumentando el lado de las chapas para que redujese la tensión. Con el primer cálculo se consiguió una reducción de más de 250MPa, algo que se considero satisfactorio y se creyó oportuno que no se debían hacer más simulaciones.

Habría que decir que esta solución solo se realizó en la ménsula modelada con sólidos. Esto no afectará a las conclusiones del proyecto ya que nuestro único objetivo en esta simulación es ver cómo se reducen las tensiones en la soldadura. Los esfuerzos que se transmitan a esta parte de la estructura no varían por no haber modelado en otros puntos de la estructura estos elementos.

4.7.3 Resultados

Por supuesto, no se estudiarán en esta simulación las reacciones, al ser iguales que las del modelo realizado con sólidos anterior. Los desplazamientos que se producen en la estructura son idénticos al del anterior modelo.

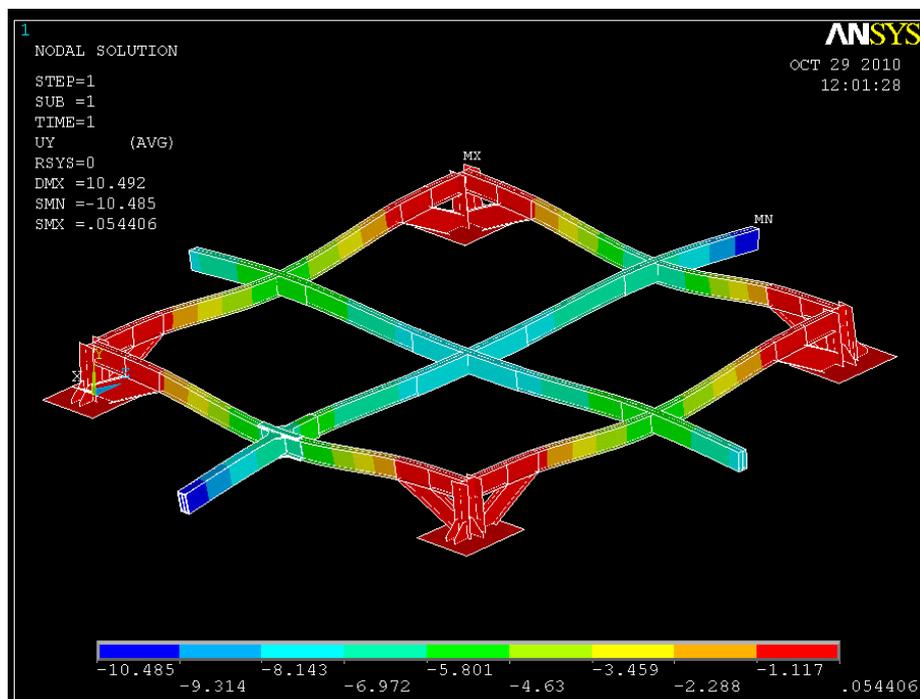


Figura 4.49. Desplazamientos en la solución de diseño

Esta solución hacía que la tensión se redujese de 410Mpa que se tenían en la soldadura anterior a 181MPa, en el punto de máxima tensión, como se puede ver en la Figura 4.50. En este caso también se produce el error de mallado que se producía en el anterior caso; que hay que ignorar.

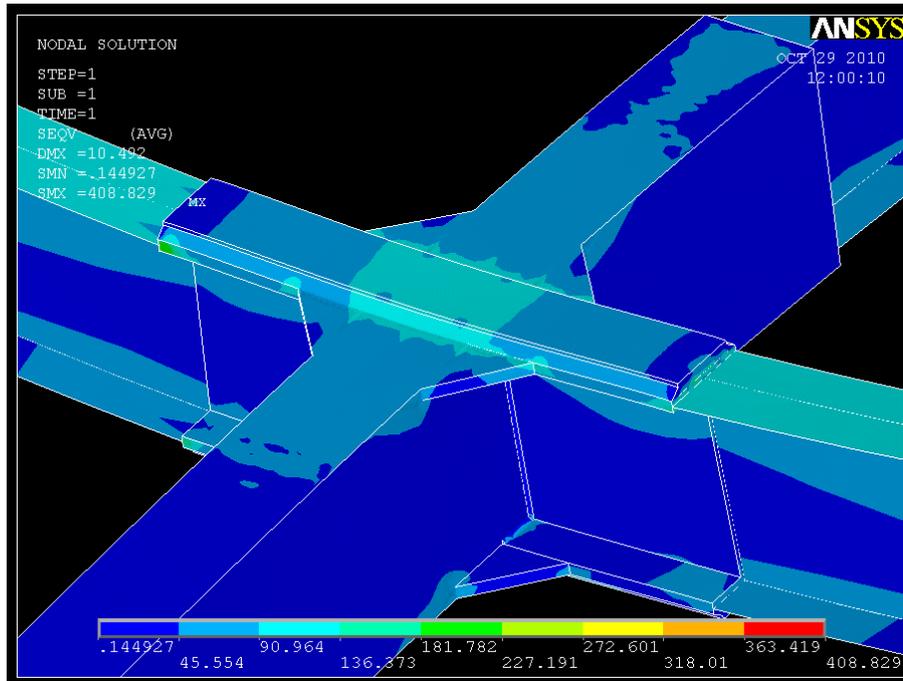


Figura 4.50. Tensiones en la unión de la ménsula con el resto de la estructura

El resto de soldaduras reducirán su valor de máxima tensión de 253Mpa a 174Mpa. Como se puede ver en la Figura 4.51.

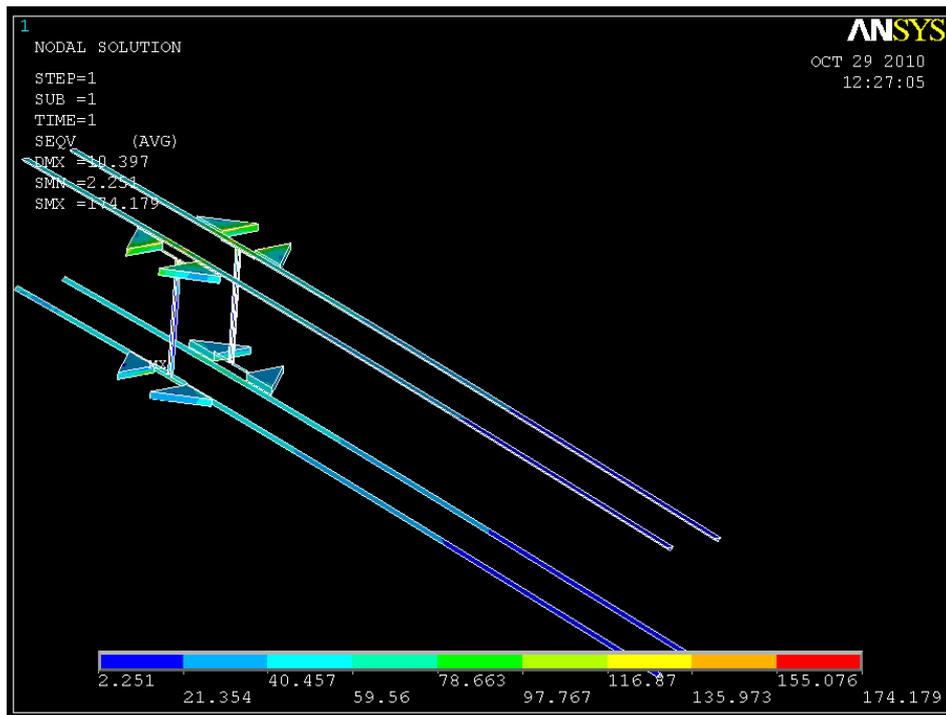


Figura 4.51. Tensiones del resto de soldaduras con chapas de refuerzo

4.7.4 Conclusiones

- La reducción de la tensión máxima encontrada en el modelo de sólidos se ve muy exagerada por la introducción de las placas en la simulación. Esto nos hace pensar que el problema de la tensión elevada en la simulación era un problema de la geometría del modelo y no de la transmisión de las tensiones al resto de la soldadura por falta de área. Por lo que haber puesto una placa de mayor tamaño no hubiera cambiado mucho las tensiones resultantes.
- Como se vio en el modelo de placas con placa soldada simulando el suelo, las tensiones que se conseguirían al poner ese suelo soldado se iban a reducir, por lo tanto las tensiones que se podrían encontrar en este modelo y en el anterior variarían del comportamiento real.
- Con esta solución se consigue bajar las tensiones anteriores a valores inferiores de 204MPa consiguiendo cumplir la norma. Con esta solución la conclusión que podemos sacar es que el no calcular las soldaduras puede acarrear problemas de diseño. Para solventar esos fallos existen inspecciones de mantenimiento y distintas soluciones a posteriori que se pueden aplicar.

5 PRESUPUESTO

En esta parte del proyecto se va a plantear un presupuesto de lo que va a costar la estructura. Para ello usaremos la herramienta de CYPE ingenieros de generación de presupuestos para estructura metálica, obteniendo los siguientes resultados. [17]

EAV010 kg Acero en vigas.

Acero **S275JR** en vigas, con piezas **simples de** perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, UPN, HEA, HEB o HEM con uniones soldadas.

Descompuesto	Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
mt07ala010b	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,050	0,82	0,86
mt27pfi010	kg	Minio electrolítico.	0,010	9,30	0,09
mo012	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	0,012	16,71	0,20
mo033	h	Ayudante montador de estructura metálica.	0,025	15,62	0,39
	%	Medios auxiliares	2,000	1,54	0,03
	%	Costes indirectos	3,000	1,57	0,05
Coste de mantenimiento decenal: 0,05 € en los primeros 10 años.				Total: 1,62	
Referencia norma UNE y Título de la norma transposición de norma armonizada			Aplicabilidad (1)	Obligatoriedad (2)	Sistema (3)
UNE-EN 10025-1:2005 Productos laminados en caliente, de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general. Parte 1: Condiciones generales de suministro.			192005	192006	2+

- (1) Fecha de aplicabilidad de la norma armonizada e inicio del período de coexistencia
 (2) Fecha final del período de coexistencia / entrada en vigor marcado CE
 (3) Sistema de evaluación de la conformidad

Tabla 4.17. Desglose del coste de la estructura

Se obtiene que el coste de la estructura según su peso; que es de 1,62€/Kg el peso de la estructura es de 7,7 toneladas, el coste de la estructura es de 12.500€

EAS005 Ud Placa de anclaje con pernos soldados y preparación de bordes.

Placa de anclaje de acero **S275JR** en perfil plano, de **600x600** mm y espesor **20** mm, con **6** pernos soldados, de acero corrugado **UNE-EN 10080 B 500 SD** de **20** mm de diámetro y **50** cm de longitud total.

Descompuesto	Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
mt07ala011b	kg	Pletina de acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfil plano laminado en caliente, para aplicaciones estructurales.	56,520	1,37	77,43
mt07aco010d	kg	Acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 SD, elaborado en taller y colocado en obra, diámetros varios.	7,395	0,93	6,88
mo012	h	Oficial 1ª montador de estructura metálica.	1,340	16,71	22,39
mo033	h	Ayudante montador de estructura metálica.	1,340	15,62	20,93
	%	Medios auxiliares	2,000	127,63	2,55
	%	Costes indirectos	3,000	130,18	3,91
Coste de mantenimiento decenal: 4,02 € en los primeros 10 años.				Total:	134,09
Referencia norma UNE y Título de la norma transposición de norma armonizada			Aplicabilidad (1)	Obligatoriedad (2)	Sistema (3)
UNE-EN 10025-1:2005 Productos laminados en caliente, de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general. Parte 1: Condiciones generales de suministro.			192005	192006	2+

(1) Fecha de aplicabilidad de la norma armonizada e inicio del período de coexistencia

(2) Fecha final del período de coexistencia / entrada en vigor mercado CE

(3) Sistema de evaluación de la conformidad

Tabla 4.18. Desglose del coste de las zapatas

Como son cuatro placas de anclaje el precio será de 134,9 € por las cuatro placas de los pilares obteniendo un valor de 539.6 €

Sumado el coste del resto de la estructura al precio de las placas de anclaje se obtiene un coste total de la obra y de la estructura de 13.040 €

6 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Las conclusiones del proyecto son las siguientes:

- Los modelos de elementos finitos son útiles para resolver una gran cantidad de problemas de ingeniería independientemente de su carácter. En este caso el problema a resolver ha sido la resolución de distintas simulaciones estáticas de estructuras. Cada uno de estos problemas o simulaciones ha supuesto distintos modos de resolución y de diseño, los cuales nos han aportado una gran cantidad de resultados, que deberá ser siempre interpretada por alguien con los suficientes conocimientos como para que esa información que nos aporta el modelo sea útil.
- En nuestro caso la construcción del modelo supuso una gran parte del trabajo a realizar. En este proyecto el tamaño del modelo y su complejidad hacían que esta parte fuese una de las que más tiempo ocuparon en su realización (junto con el mallado). La importancia del proceso de construcción de la geometría es básica, porque la gran mayoría de los fallos que se producen en la resolución del modelo se generan en esta etapa. Por tanto es fundamental que se construya el modelo bien desde un principio para evitar estos fallos, que son difíciles de detectar y de resolver, desperdiciando gran cantidad de tiempo de la simulación y estudio de un modelo.
- El mallado y el tipo de elemento a utilizar son fundamentales en el comportamiento de la estructura. Esto se puede observar en el apartado de conclusiones del modelo de sólidos, en el que la misma estructura se malla con tamaños distintos, haciendo que la estructura se comporte de manera diferente en cada caso, siendo, fundamental para la obtención de conclusiones en el modelo saber porque se están produciendo estos resultados.
- En ningún caso los resultados obtenidos con los modelos de elementos finitos se deberán tomar como una solución exacta del problema, sino como una aproximación del comportamiento que tendrá en la realidad, ya que estos modelos no están exentos de errores (como es el caso del modelo realizado con sólidos y la máxima tensión que se produce) que deberán ser analizados para su futuro resolución o interpretación del modelo.
- El comportamiento más o menos parecido a la realidad, dependerá del grado de exactitud que queramos dar al modelo y de los resultados que se quieran obtener, desde una pequeña orientación del comportamiento hasta una especificación de diseño. Con esto no hay que despreciar la información que te pueda aportar un modelo relativamente sencillo ya que siempre será una guía de los resultados que puedas obtener en futuros modelos más complejos. Y no porque un modelo tenga en cuenta más factores de simulación (contactos entre

superficies, dilataciones térmicas, etc...) sus resultados sean más valiosos que los obtenidos con una simulación más sencilla.

- La última conclusión de este proyecto sería la de completar estos modelos realizados con elementos finitos con prototipos reales; aunque los modelos de elementos finitos puedan estar muy bien realizados, los datos obtenidos siempre serán simulaciones de la realidad. Lo que se ha hecho en este proyecto ha sido comparar unos modelos con otros, la mejor comparación de todas hubiese sido realizar la estructura y comparar los datos de las simulaciones con el dato obtenido en el banco de ensayos, viendo de esa manera cual de todos los modelos se asemejaba más a la realidad.

7 TRABAJOS FUTUROS

- Esta estructura nunca se construyó y uno de los trabajos futuros más evidentes es construir la estructura metálica para comprobar si las conclusiones que se han obtenido en este proyecto son ciertas.
- Otra tarea pendiente es la obtención de elementos más precisos en el diseño que tengan en cuenta, por ejemplo el comportamiento de las soldaduras. Estos modelos realizados en ANSYS son muy costosos en tiempo, aunque dan soluciones elementales para su resolución, por lo que intentar crear herramientas para problemas muy precisos de una estructura sería una ventaja. Como por ejemplo crear una estructura con elementos tipo barra y una vez definidos los perfiles, que se crease una estructura hecha con elementos tipo placa o con elementos sólidos.
- Una herramienta muy útil en el diseño de una estructura sería el uso de elementos más complejos, es decir que no sean barras, para el diseño de estas estructuras que incorporasen la normativa correspondiente ya que como hemos comprobado el METAL 3D a pesar de tener la normativa incluida en su proceso de diseño no tuvo en cuenta problemas como el ancho de las soldaduras.

8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS

Lista de Referencias:

Numeración Título, Autor/ Editorial-Organización, Edición y Fecha

- [1] “Proyecto constructivo de la estructura metálica portante del quiosco de música, y refuerzo de los pilares del aparcamiento, de la Plaza de los Jardinillos (Majadahonda)”/ Alberto Martín Rodríguez/ Julio 2007.
- [2] “Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS LS-DYNA”, Natalia García Gayol/ Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [3] “Theory of Matrix Structural Analysis”, J.S. Przemieniecki / Dover Publications NY, 1ª Ed., 1985.
- [4] “A treatise on the mathematical theory of elasticity”, A.E.H. Love/ Dover Publications NY, 4ª Ed., 1944.
- [5] “Advanced Mechanics of Materials”, Richard J. Schmidt & Omar M. Sidebottom /John Wiley & Sons, Inc., 5ª Ed. 1993.
- [6] “El Método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural”, C. Martínez Arnaiz / Publicaciones de la E.T.S.I.A (Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos), 1998.
- [7] “Documento básico SE-A Seguridad Estructural Aceros”/ de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008).
- [8] “Documento Básico SE-AE Seguridad Estructural Acciones en la edificación”/ Abril 2009.
- [9] “Documento Básico SE Seguridad estructural”/ Abril 2009.
- [10] “Apuntes de la asignatura Estructuras Industriales”/ Universidad Carlos III de Madrid/ curso 2009-2010.
- [11] “Apuntes de la asignatura Cálculo de Máquinas”/ Universidad Carlos III de Madrid/ curso 2009-2010.
- [12] “Apuntes de la asignatura Transportes”/ Universidad Carlos III de Madrid/ curso 2009-2010.
- [13] “Ayuda de ANSYS versión 9”.
- [14] “Ayuda de ANSYS versión 14”.

- [15] “Guía de análisis estructural de ANSYS”.

Páginas Web Consultadas:

- [16] www.ansys.com (Junio 2010)
- [17] www.cype.es (Octubre 2010)