



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos
y Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

*DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL
DE UN ROCÓDROMO*

Autor: IGNACIO SÁNCHEZ GONZÁLEZ

Tutor: CARLOS SANTIUSTE ROMERO

Leganés, 15 de octubre de 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. MOTIVACIÓN	7
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. NORMATIVA APLICABLE	10
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	11
2. ANTECEDENTES	12
2.1. ROCÓDROMOS	12
2.2. ESTRUCTURAS	14
2.3. ELEMENTOS FINITOS	16
2.3.1. SISTEMAS DISCRETOS Y SISTEMAS CONTINUOS	16
2.3.2. HIPÓTESIS DE DISCRETIZACIÓN	16
2.3.3. ETAPAS DE UN ANÁLISIS CON EL MEF	18
3. REQUISITOS DE DISEÑO	20
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	20
3.2. ESTADOS LÍMITE	26
3.2.1. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS	26
3.2.2. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO	27
4. MÉTODO DE CÁLCULO	28
4.1. ANÁLISIS/ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL MALLADO	28
4.2. ELECCIÓN DEL ESPESOR DEL PANEL DE MADERA	31
4.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA ZONA DE VÍAS 2	32
4.4. EFECTOS	34
4.4.1. EFECTOS PERMANENTES	34
4.4.2. EFECTOS VARIABLES	37
4.5. COMPROBACIÓN ELU Y ELS	40
5. ESTRUCTURA FINAL	45
5.1. RESULTADOS	45
5.1.1. BOULDER 1	45
5.1.1.1. Boulder 1.1	45
5.1.1.2. Boulder 1.2	46
5.1.2. BOULDER 2	47
5.1.2.1. Boulder 2.1	47
5.1.2.2. Boulder 2.2	49
5.1.3. VÍAS	50
5.1.3.1. Vías 1	50
5.1.3.2. Vías 2	51

5.1.3.3. Vías 3	52
5.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS	53
5.2. PRESUPUESTO	54
5.2.1. ESTRUCTURA	54
5.2.2. SUPERFICIE ESCALABLE	54
5.2.3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN	55
5.2.4. RESUMEN PRESUPUESTO	55
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	56
6.1. CONCLUSIONES	56
6.2. TRABAJOS FUTUROS	57
7. BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE FIGURAS DEL DOCUMENTO

<i>Fig. 1.1 Escalada de vías en roca natural</i>	7
<i>Fig. 1.2 Escalada de boulder en roca natural</i>	8
<i>Fig. 1.3 Rocódromo de vías (izquierda) y boulder (derecha)</i>	8
<i>Fig. 1.4 Escalada de vías en rocódromo</i>	9
<i>Fig. 1.5 Escalada de boulder en rocódromo</i>	9
<i>Fig. 2.1 Paneles de madera y estructura metálica en rocódromo para competición de boulder</i>	12
<i>Fig. 2.2 Presas atornilladas a paneles de madera en rocódromo de boulder</i>	13
<i>Fig. 2.3 Presas atornilladas a paneles de madera en rocódromo de boulder</i>	13
<i>Fig. 2.4 Puntos de protección individual</i>	14
<i>Fig. 3.1 Vista exterior de la nave industrial</i>	20
<i>Fig. 3.2. Vistas del interior de la nave</i>	21
<i>Fig. 3.3. Superficie escalable del rocódromo</i>	21
<i>Fig. 3.4. Estructura de madera en zonas de boulder</i>	22
<i>Fig. 3.5. Superficie escalable de la zona de boulder 1</i>	22
<i>Fig. 3.5. Superficie escalable de la zona de boulder 2</i>	23
<i>Fig. 3.6. Superficie escalable de la zona de vías</i>	23
<i>Fig. 3.7. Estructura de acero en la zona de vías</i>	24
<i>Fig. 3.8. Altura de los puntos de protección</i>	25
<i>Fig. 3.9. Forma de medir las distancias entre seguros</i>	25
<i>Fig. 3.10. Emplazamiento de los puntos de protección en el rocódromo</i>	26
<i>Fig. 4.1. Análisis de sensibilidad. 40 nodos. Tensión (Pa)</i>	28
<i>Fig. 4.2. Análisis de sensibilidad. 80 nodos. Tensión (Pa)</i>	29
<i>Fig. 4.3 Análisis de sensibilidad. 160 nodos. Tensión (Pa)</i>	29
<i>Fig. 4.4. Análisis de sensibilidad. 260 nodos. Tensión (Pa)</i>	29
<i>Fig. 4.5. Tensión (MPa) en la barra crítica en función del nº de nodos</i>	30
<i>Fig. 4.6. Tuercas embutidas (T-nuts)</i>	31
<i>Fig. 4.7. Tensión (Pa) producida por un escalador en un panel de madera de 18mm de espesor</i>	32
<i>Fig. 4.8. Estructura de la zona de Vías 2</i>	33
<i>Fig. 4.9. Estructura de la zona de Vías 2</i>	34
<i>Fig. 4.10. Estructura despreciando el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa)</i>	35
<i>Fig. 4.11. Estructura teniendo en cuenta el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa)</i>	35
<i>Fig. 4.12. Estructura despreciando el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa)</i>	36
<i>Fig. 4.13. Estructura teniendo en cuenta el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa)</i>	36
<i>Fig. 4.14. Diferentes posiciones de un escalador. Tensión (Pa)</i>	38
<i>Fig. 4.15. 3 personas escalando simultáneamente en los puntos más desfavorables. Tensión (Pa)</i>	38
<i>Fig. 4.16. Efectos sobre la estructura (representados en color amarillo)</i>	39

<i>Fig. 4.17. Anclajes de la estructura a la nave (representados en color naranja)</i>	39
<i>Fig. 4.18. Perfil #80x80 en toda la estructura. Tensión (Pa)</i>	40
<i>Fig. 4.19. Perfil #40x40 representado en color rojo y #60x60 en el resto</i>	41
<i>Fig. 4.20. Resultado final: tensión (Pa) boulder1</i>	41
<i>Fig. 4.21. Resultado final deformación (mm) boulder1</i>	42
<i>Fig. 4.22. Perfil L40x40x4 representado en color gris y L60x60x5 en color rojo</i>	43
<i>Fig. 4.23. Resultado final: tensión (Pa)</i>	43
<i>Fig. 4.24. Resultado final: deformación (mm)</i>	44
<i>Fig. 5.1. Resultado final Boulder 1.1: tensión (Pa)</i>	45
<i>Fig. 5.2. Resultado final Boulder 1.1: deformación (mm)</i>	45
<i>Fig. 5.3. Resultado final Boulder 1.2: tensión (Pa)</i>	46
<i>Fig. 5.4. Resultado final Boulder 1.2: deformación (mm)</i>	46
<i>Fig. 5.5. Resultado final Boulder 2.1: tensión (Pa)</i>	47
<i>Fig. 5.6. Resultado final Boulder 2.1: deformación (mm)</i>	48
<i>Fig. 5.7. Resultado final Boulder 2.2: tensión (Pa)</i>	49
<i>Fig. 5.8. Resultado final Boulder 2.2: deformación (mm)</i>	49
<i>Fig. 5.9. Resultado final Vías 1: tensión (Pa) a la izquierda y deformación (mm) a la derecha</i>	50
<i>Fig. 5.10. Resultado final Vías 2: tensión (Pa)</i>	51
<i>Fig. 5.11. Resultado final Vías 2: deformación (mm)</i>	51
<i>Fig. 5.12. Resultado final Vías 3: tensión (Pa) a la izquierda y deformación (mm) a la derecha</i>	52

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. MOTIVACIÓN

En los últimos años se ha producido una gran proliferación de estructuras artificiales para la práctica de la escalada (rocódromos) en todo el mundo debido al auge que está presentando este deporte.

A pesar de que en España contamos con algunos de los mejores escaladores del mundo y de que existen varias empresas nacionales dedicadas exclusivamente a la construcción de rocódromos, no disponemos de ninguno de las dimensiones y características de los de la mayoría de países europeos, por lo que se debería fomentar el desarrollo de estas instalaciones para que los aficionados y deportistas puedan disfrutar y entrenar en las mismas condiciones que en otros lugares.

Dentro de la escalada deportiva se pueden distinguir dos modalidades:

-Escalada de vías, en la que se utiliza una cuerda y sistemas de protección individual como elementos de seguridad en caso de caída.



Fig. 1.1 Escalada de vías en roca natural

-Boulder, que consiste en escalar recorridos de escasa altura (generalmente inferior a 5 metros) y máxima dificultad, con elementos de amortiguación (colchonetas) para absorber el impacto al caer.



Fig. 1.2 Escalada de boulder en roca natural

Estas dos modalidades pueden practicarse idealmente en el medio natural, pero una buena alternativa sería disponer de paredes artificiales si las condiciones meteorológicas no son las propicias o para poder practicar este deporte cuando no hay tiempo suficiente para desplazarse a la montaña, además de ser el medio ideal como entrenamiento para afrontar retos en la montaña o en competiciones.

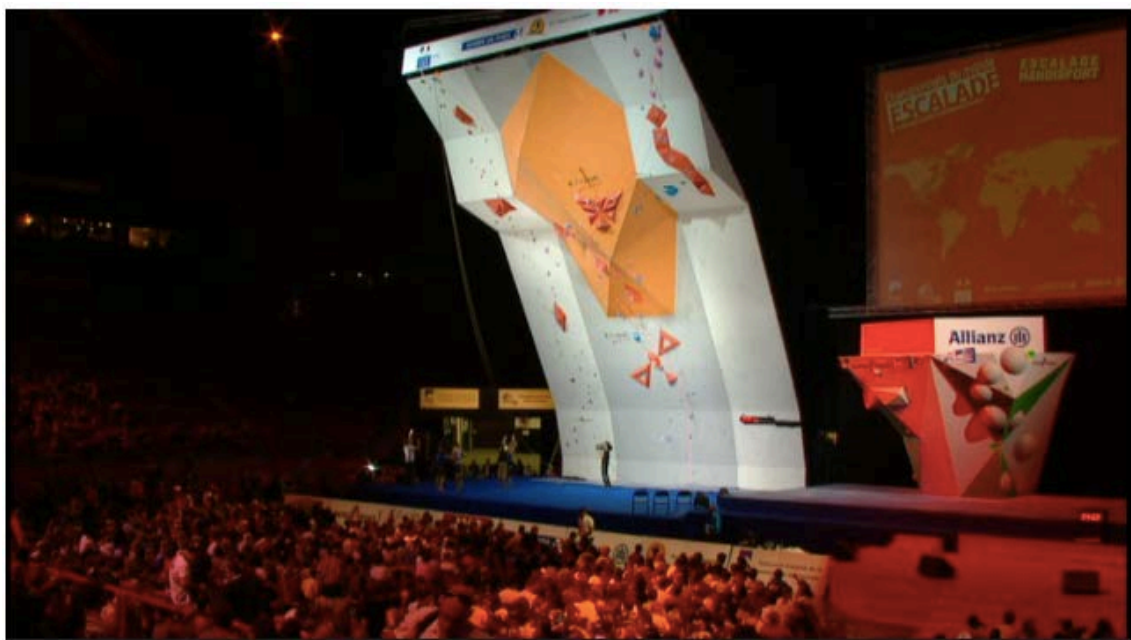


Fig. 1.3 Rocódromo de vías (izquierda) y boulder (derecha)

Por ello, sería muy interesante contar con una instalación de grandes dimensiones en la que pudieran compartir espacio todo tipo de aficionados a la escalada, desde cursos de iniciación hasta competidores internacionales de ambas disciplinas.



Fig. 1.4 Escalada de vías en rocódromo [23]



Fig. 1.5 Escalada de boulder en rocódromo [19]

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un rocódromo con las características adecuadas para ofrecer la mayor variedad posible de recorridos, realizando el diseño y cálculo estructural de acuerdo a la normativa vigente, y teniendo en cuenta que su emplazamiento será en el interior de una nave

industrial de 463m² de superficie útil, situada en la calle del Zinc del Polígono Industrial Sur de Colmenar Viejo.

Otros objetivos serían:

- Familiarizarse con el manejo de normas que regulan todas las construcciones industriales para asegurar la integridad de todo lo que se construye, y específicamente las que regulan las estructuras artificiales de escalada.
- Diseño y cálculo de una estructura industrial, elección, cálculo y comprobación de los perfiles más adecuados según las solicitudes.
- Adaptar y utilizar los conocimientos académicos para resolver un problema real.
- Aprendizaje y manejo del Método de Elementos Finitos. En este caso, aplicado al cálculo de estructuras utilizando el programa informático ABAQUS.
- Tener un primer contacto con el mundo de la construcción de una estructura industrial. Acercamiento a la realidad de la edificación.

1.3. NORMATIVA APLICABLE

A continuación se enumeran las normativas bajo las cuales este proyecto ha sido creado, cumpliendo en todo momento cada una de ellas.

Código Técnico de la Edificación (C.T.E.). Es el marco normativo español por el que se regulan las exigencias básicas que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer una serie de requisitos básicos de seguridad y habitabilidad definidos por la Ley 38/1999 de 5 de noviembre de Ordenación de la Edificación.

En este proyecto se han aplicado sobre todo los siguientes documentos que pertenecen a este código técnico:

- Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE)
- Documento Básico de Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación (DB-SE-AE)
- Documento Básico de Seguridad Estructural. Acero (DB-SE-A)
- Documento Básico de Seguridad Estructural. Madera (DB-SE-M)

[1]

Normas UNE. Las que afectan al cálculo y diseño de las estructuras artificiales de escalada:

UNE-EN 12572-1 Estructuras artificiales de escalada. Parte 1: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para SAE con puntos de protección. [2]

UNE-EN 12572-2 Estructuras artificiales de escalada. Parte 2: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para muros de escalada. [3]

UNE-EN 12572-3 Estructuras artificiales de escalada. Parte 3: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para presas de escalada. [4]

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento lo forman siete capítulos, cada uno de los cuales trata de los siguientes aspectos:

- **Capítulo I:** se trata de una introducción sobre el proyecto, planteando los objetivos del mismo y las características generales.
- **Capítulo II:** antecedentes. Se contextualiza el proyecto explicando qué es un rocódromo y una estructura. También se explican los programas utilizados para el diseño y cálculo del proyecto y el método de elementos finitos.
- **Capítulo III:** requisitos de diseño. Se trata de una explicación del porqué de las medidas adoptadas para la construcción basadas en el espacio disponible y las características necesarias para cumplir con la funcionalidad y los estados límite.
- **Capítulo IV:** método de cálculo. Se describe detalladamente la solución de un caso calculada con el Método de Elementos Finitos.
- **Capítulo V:** Estructura final. Este capítulo recoge todos los resultados de los cálculos efectuados y el presupuesto de los perfiles utilizados.
- **Capítulo VI:** conclusiones y trabajos futuros. En este capítulo se analizan las conclusiones y los trabajos a que ha dado lugar este proyecto.
- **Capítulo VII:** Bibliografía utilizada en la elaboración del documento.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.

En este capítulo se describen una serie de conceptos que pueden ayudar a comprender mejor cada uno de los puntos de este proyecto. Primero se dan unas breves nociones de lo que es un rocódromo y una estructura, sus componentes y cómo se comportan. Después se define el método de elementos finitos, utilizado para el cálculo de la estructura.

2.1. ROCÓDROMOS

Una estructura artificial de escalada, más conocida como rocódromo, es un *equipo deportivo que consiste en una estructura de escalada elaborada a tal fin, que presenta diversas características de construcción y que está diseñada para diversos usuarios de actividades de escalada deportiva, y que no está reservada a ningún grupo de edad en particular* [2].

Pueden ser construidos de diversas formas y materiales, pero generalmente constan de una estructura de acero o madera, recubierta de paneles de madera convenientemente anclados a ella, a la que se puede añadir textura exterior para aumentar la adherencia.



Fig. 2.1 Paneles de madera y estructura metálica en rocódromo para competición de boulder

A estos paneles de madera se atornillan las presas, que son los *elementos de escalada extraíbles utilizados para el avance por un muro de escalada* [4], generalmente fabricados en poliuretano, poliéster con carga mineral o madera. [20]



Fig. 2.2 Presas atornilladas a paneles de madera en rocódromo de boulder



Fig. 2.3 Presas atornilladas a paneles de madera en rocódromo de boulder [21]

Cuando la altura del rocódromo es inferior a 4.5 metros [3], se utilizan colchonetas para amortiguar el impacto en caso de caída, pero en caso contrario se utiliza una cuerda como elemento de seguridad, anclándola a los diversos puntos de

protección individual, que estarán convenientemente unidos a la estructura para soportar las cargas correspondientes.



Fig. 2.4 Puntos de protección individual [18]

2.2. ESTRUCTURA

Es el conjunto de elementos resistentes convenientemente vinculados entre sí que accionan y reaccionan bajo los efectos de las cargas a que son sometidos. Su finalidad es resistir y transmitir las cargas del edificio a los apoyos manteniendo la forma sin sufrir deformaciones incompatibles. Las cargas se pueden clasificar en:

- Peso propio.
- Cargas de funcionamiento.
- Acciones varias.

Dentro del peso propio se incluyen las cargas de la estructura, que son especialmente significativas en las estructuras de hormigón armado y las cargas reológicas, que son las producidas por las deformaciones que experimentan los materiales en el transcurso del tiempo por retracción, fluencia bajo las cargas u otras causas.

En el segundo punto se incluyen las cargas que actúan sobre la construcción, como por ejemplo las creadas por la presencia en la instalación de mobiliario, máquinas y personas.

El tercer punto se refiere a la temperatura (dilatación-contracción), el viento, la

nieve, sismos, etc.

Vemos que las cargas que pueden actuar sobre una estructura son muy variadas y pueden darse una serie de combinaciones entre ellas. La estructura debe soportar la combinación más desfavorable. Cuando se habla de soportar se hace referencia a tres aspectos:

- Estabilidad.
- Resistencia.
- Deformación limitada.

La estabilidad de una estructura es la que garantiza que dicha estructura, entendida como un sólido rígido, cumpla con las ecuaciones de la estática al ser sometida a las acciones exteriores y a su propio peso.

La resistencia es la que obliga a que no se superen las tensiones admisibles del material y a que no se rompa ninguna sección.

La deformación limitada implica que se mantenga dentro de unos límites. Toda estructura se deforma al actuar las cargas, pero esta deformación debe ser controlada.

Los elementos estructurales fundamentales de las estructuras son:

- Las vigas de directriz recta que fundamentalmente trabajan a flexión.
- Los pilares, que trabajan a compresión generalmente.

Es importante no perder de vista otros dos elementos:

- La cimentación.
- El terreno.

Si por algún motivo falla alguno de todos estos elementos, no se conseguiría el objetivo final de la estructura, que es transmitir las cargas al terreno sobre el que está.

Existen una serie de tipologías muy comunes dentro del mundo de las estructuras industriales que son:

- Los pórticos, principalmente de nudos rígidos.
- Las cerchas generalmente de nudos articulados.

[8,9]

2.3. ELEMENTOS FINITOS

2.3.1. SISTEMAS DISCRETOS Y SISTEMAS CONTINUOS

Al efectuar una clasificación de las estructuras, suelen dividirse en discretas y continuas. Las primeras son aquéllas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula. La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera, el equilibrio de toda la estructura puede representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.

Como contrapartida, en los sistemas continuos no es posible separar, a priori, el sistema en un número finito de elementos estructurales discretos. Si se toma una parte cualquiera del sistema, el número de puntos de unión entre dicha parte y el resto de la estructura es infinito, y es por lo tanto imposible utilizar el mismo método que en los sistemas discretos, pues los puntos de unión entre los distintos elementos, que allí aparecían de manera natural, no existen ahora.

Las estructuras continuas son muy frecuentes en ingeniería, y para su análisis es necesario disponer de un método que tenga en cuenta su naturaleza continua.

Hasta la llegada del Método de los Elementos Finitos, los sistemas continuos se abordaban analíticamente, pero por esa vía sólo es posible obtener solución para sistemas con geometría muy sencilla y con condiciones de contorno simples. [10]

2.3.2. HIPÓTESIS DE DISCRETIZACIÓN

En una estructura discreta, su deformación viene definida por un número finito de parámetros (deformaciones y giros), que juntos conforman el vector de deformaciones Δ , y la estructura tiene tantas formas de deformarse como términos tenga dicho vector. Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por grande que sea este último. Por lo tanto, la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito Δ como el anterior, sino que es una función vectorial \mathbf{u} , que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto, y que tiene tres componentes escalares.

Esta función es la solución de la ecuación diferencial que gobierna el problema, y, si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero

en principio no puede asegurarse que esta función u tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto, la función u no podrá conocerse en general.

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas *elementos finitos*.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados *nudos*.
- Los desplazamientos de los nudos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas *funciones de interpolación* que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nudos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores sobre él actuantes.

Los dos aspectos más importantes de esta hipótesis, sobre los que hay que hacer hincapié son:

- La función solución del problema u es aproximada de forma independiente en cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos, pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos, a juicio del analista, aunque deben cumplirse ciertas condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.
- La función solución es aproximada dentro de cada elemento, apoyándose en un número finito (y pequeño) de parámetros, que son los valores de dicha función en los nudos que configuran el elemento y a veces sus derivadas. La aproximación aquí indicada se conoce como la formulación en

desplazamiento. Claramente se han introducido algunas aproximaciones. En primer lugar no es siempre fácil asegurar que las funciones de interpolación elegidas satisfarán al requerimiento de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes, por lo que puede violarse la condición de compatibilidad en las fronteras entre unos y otros. En segundo lugar, al concentrar las cargas equivalentes en los nudos, las condiciones de equilibrio se satisfarán solamente en ellos, y no se cumplirán usualmente en las fronteras entre elementos. [7]

2.3.3. ETAPAS DE UN ANÁLISIS CON EL MEF

Todo análisis mediante códigos comerciales basados en el Método de los Elementos Finitos se puede dividir en tres fases principales:

1) Pre-proceso

En esta fase se realiza la descripción del problema que se pretende calcular, en caso de un análisis estructural hay que definir la geometría del modelo, discretizar dicha geometría en un cierto número de “elementos finitos” (mallado), asignar las propiedades del material constitutivo de cada una de las partes de la geometría y definir tanto las condiciones de contorno como las cargas a las que va a estar sometida la estructura.

Ésta es la fase en la que se define el problema que se va a resolver, es la fase más ingenieril y es muy importante tener claro el significado físico del problema. Por un lado, para definir la geometría, las propiedades del material, las condiciones de contorno, etc. es necesario siempre hacer hipótesis simplificadoras porque la realidad es siempre más compleja que lo que cualquier modelo pueda reflejar y el resultado final del modelo dependerá de las hipótesis realizadas en esta fase. Por otra parte, el resultado del Método de los Elementos Finitos dependerá también del tipo de discretización del problema, es decir, del mallado. Dado que el mallado no tiene significado físico en la realidad es necesario realizar un análisis de sensibilidad de la malla para obtener un mallado óptimo y estar seguros de que el resultado obtenido es correcto.

2) Procesamiento o Solución

En esta fase el código de Elementos Finitos resuelve las ecuaciones que se han planteado en el pre-proceso, para ello es necesario el ensamble de la matriz de rigidez y del vector de cargas y la solución del sistema lineal de ecuaciones algebraicas (inversión de la matriz de rigidez). Durante esta fase el usuario del código tiene la posibilidad de seguir los distintos pasos de resolución.

3) Post-proceso

En la fase final, el usuario tiene la posibilidad de visualizar los resultados, en el caso de un análisis estructural se atenderá principalmente a las tensiones, deformaciones, desplazamientos, etc. En función de los resultados obtenidos será necesario, o no, volver a la fase de pre-proceso y corregir el problema resuelto o definir uno nuevo, es decir, hace falta realizar un análisis crítico de los resultados. [5]

Para la implementación del Método de Elementos Finitos en este proyecto se utiliza el código comercial ABAQUS, muy versátil y adecuado para este tipo de geometría que no presenta ninguna simetría, por lo que se utilizan varias secciones diferentes en función de las solicitaciones en cada zona.

Al utilizar la licencia ABAQUS STUDENT, el número máximo de nodos está limitado a 1000, de forma que el tamaño de los elementos está restringido por esta condición. Por ello, se divide la estructura total del rocódromo en diversas regiones.

CAPÍTULO 3. REQUISITOS DE DISEÑO

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El primer paso de este proyecto es el diseño de la superficie escalable para que cumpla con los requisitos deseados de funcionalidad, realizado con SketchUp, un programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones, utilizado frecuentemente por empresas especializadas en la construcción de rocódromos. [11]

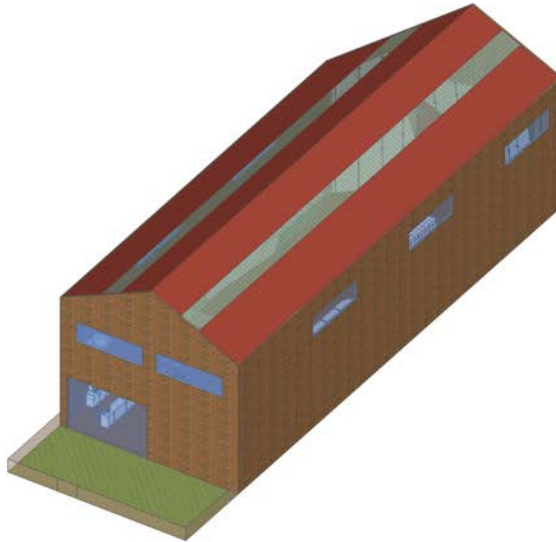
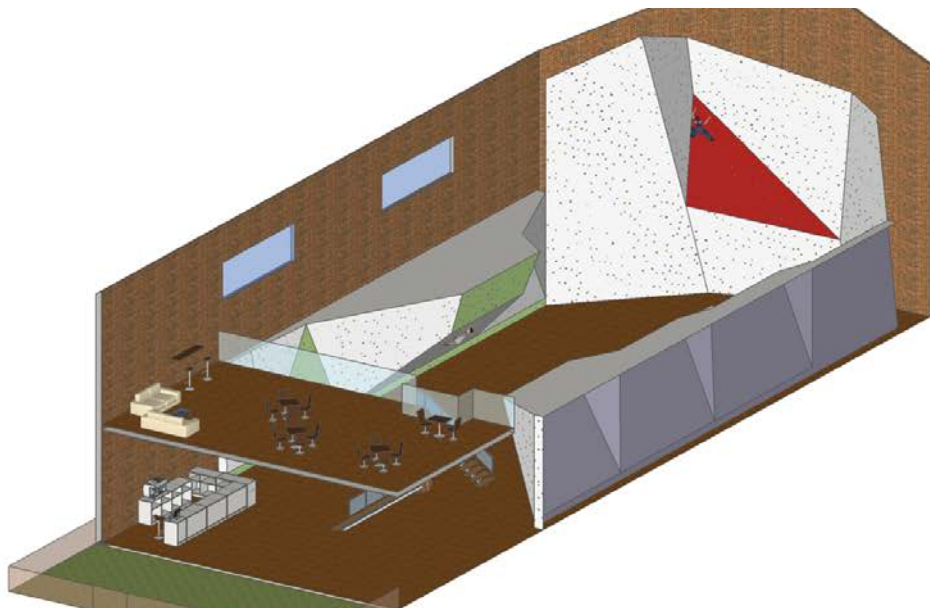


Fig. 3.1 Vista exterior de la nave industrial

En este caso, el espacio disponible viene determinado por el interior de una nave industrial de 463m² de superficie útil situada en Colmenar Viejo. El objetivo del diseño es lograr un equilibrio entre la mayor variedad posible de inclinaciones en los paneles escalables y su simplicidad constructiva, aprovechando el espacio lo máximo posible.



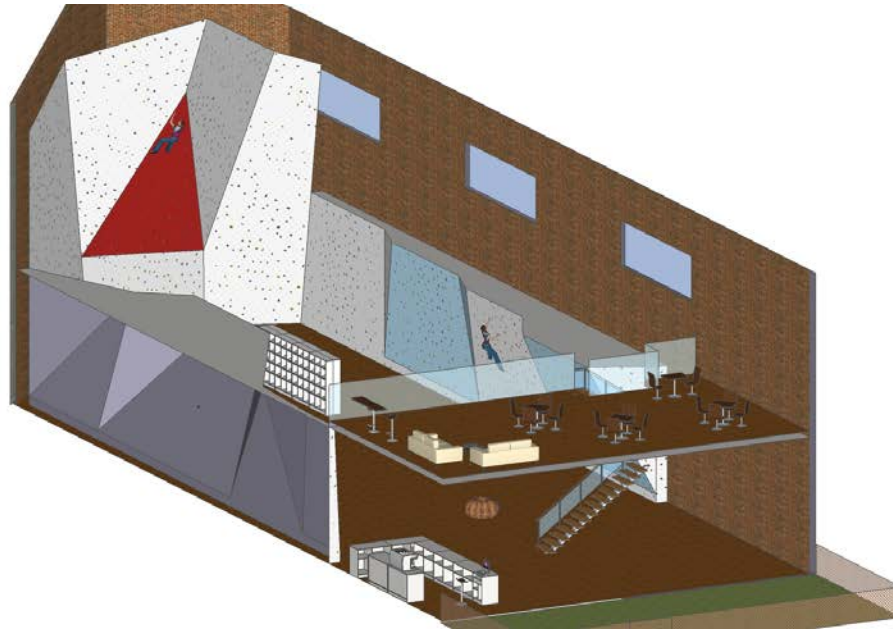


Fig. 3.2. Vistas del interior de la nave.

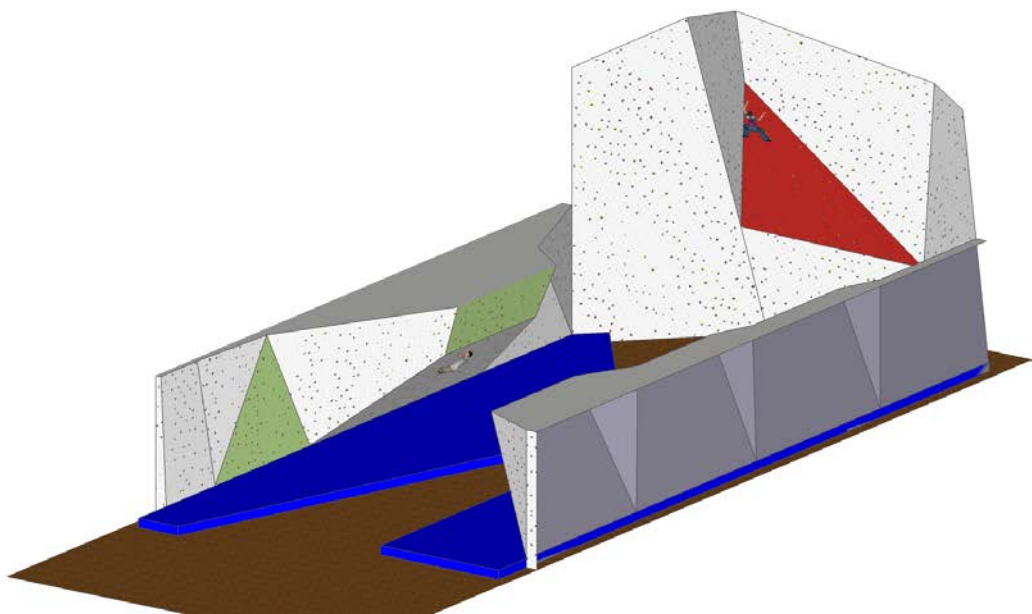


Fig. 3.3. Superficie escalable del rocódromo

La solución técnica elegida para constituir la estructura del rocódromo es una serie de cerchas separadas 1.5m aproximadamente, unidas entre sí formando una estructura tridimensional y ancladas a la estructura de la nave.

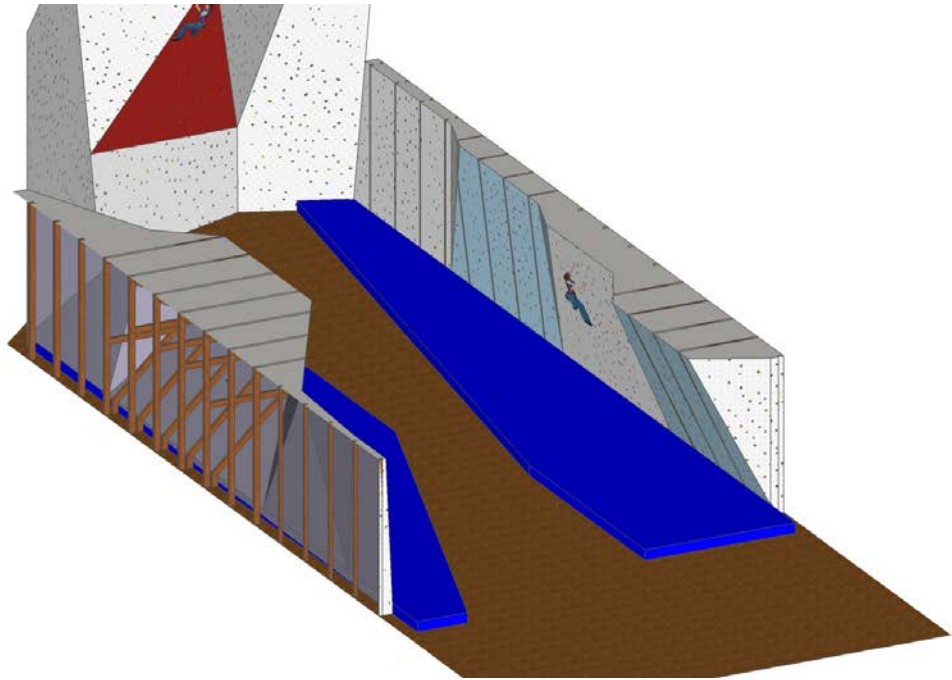


Fig. 3.4. Estructura de madera en zonas de boulder.

El material seleccionado para la estructura de la zona de boulder es madera laminada, ya que ofrece una gran versatilidad y facilidad constructiva a la hora de crear cambios de angulación en la superficie escalable, y las solicitaciones en esta zona no son elevadas.

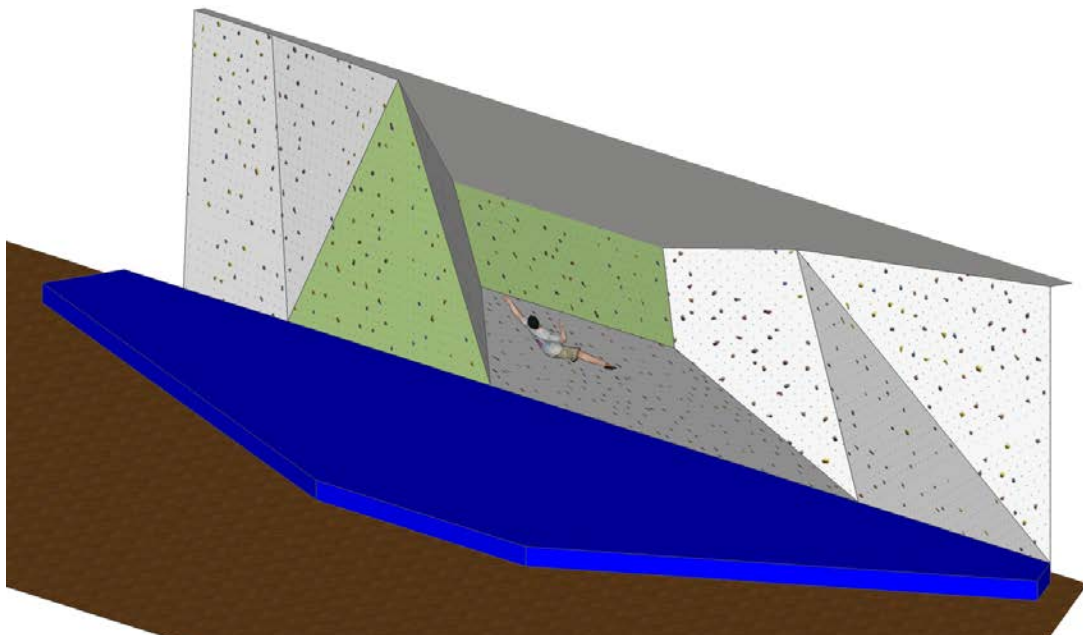


Fig. 3.5. Superficie escalable de la zona de boulder 1.

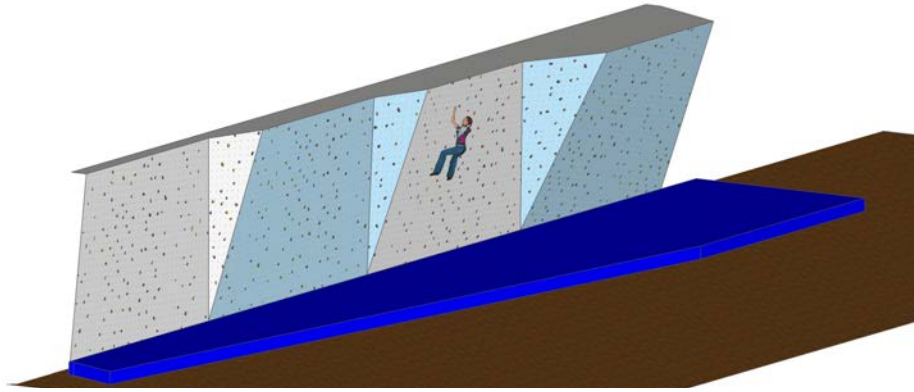


Fig. 3.5. Superficie escalable de la zona de boulder 2.

La estructura de la zona de vías es de acero laminado normalizado, ya que las sollicitaciones son mayores, tanto por el peso propio debido al tamaño de la estructura como por los esfuerzos provocados por la caída de un escalador.

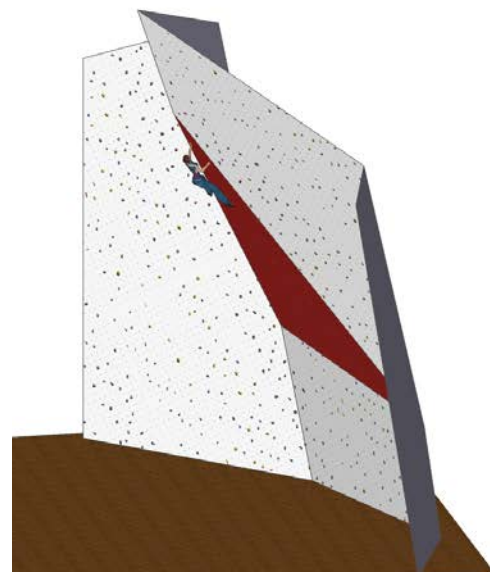
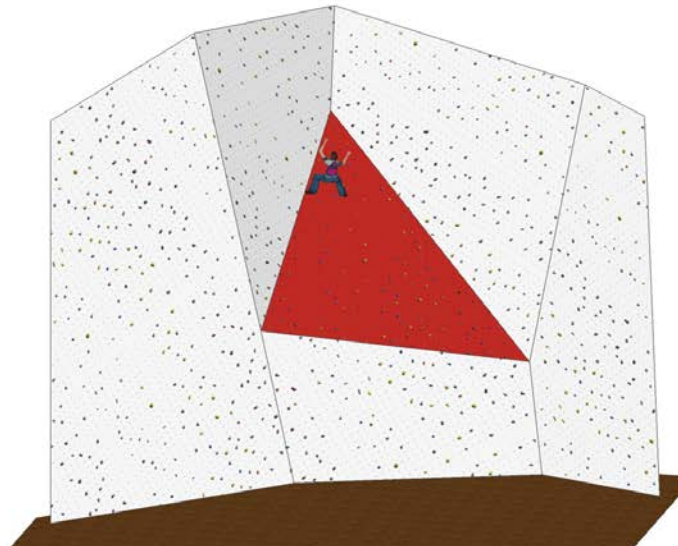


Fig. 3.6. Superficie escalable de la zona de vías.

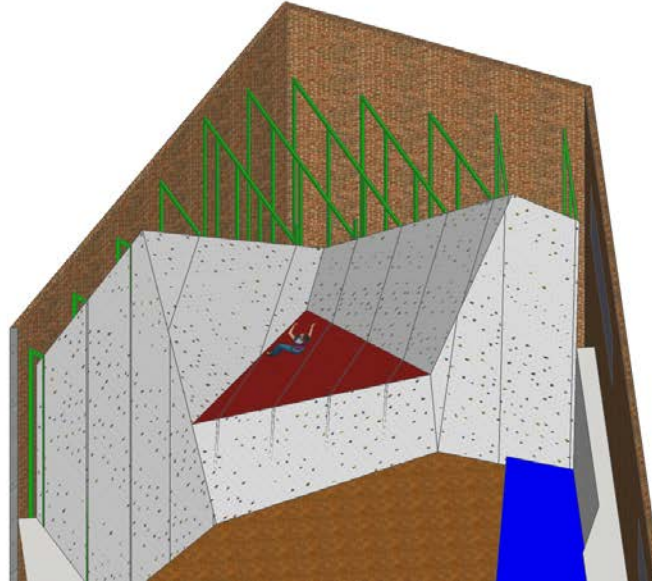


Fig. 3.7. Estructura de acero en la zona de vías.

Los perfiles de sección rectangular de madera y en L para el acero más adecuados se determinan en el siguiente capítulo, en función de los resultados obtenidos tras el cálculo en cada una de las zonas. A estos perfiles se unen directamente los paneles de madera mediante tornillos.

La distancia máxima x para la colocación de un punto de protección individual que sigue al punto situado a una altura h , se determina usando la fórmula:

$$x = (h+2) / 5$$

Donde h es la distancia entre el punto y el suelo o un obstáculo, el que esté más próximo, medida verticalmente, en metros, por debajo del punto en cualquier caso.

Sin embargo, x no debe ser superior a un metro si h es menor o igual a cinco metros o dos metros si h es mayor o igual a cinco metros.

La altura máxima del primer punto de protección no ha de ser superior a 3.1 metros. Con todo esto, los puntos de protección individual están separados como máximo según las siguientes cotas medidas desde el suelo. [2]

PUNTO DE PROTECCIÓN	ALTURA DESDE EL SUELO (m)
PUNTO 1	3.1
PUNTO 2	4.1

PUNTO 3	5.1
PUNTO 4	6.52
PUNTO 5	8.224
PUNTO 6	10.224
PUNTO 7	12.224

Fig. 3.8. Altura de los puntos de protección.

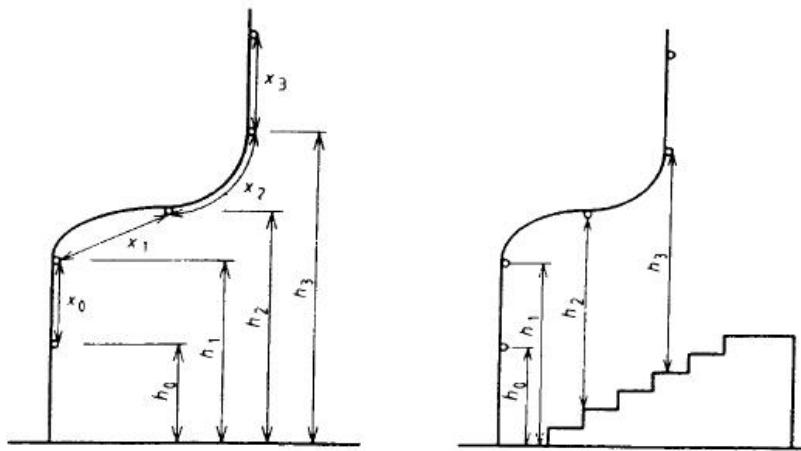
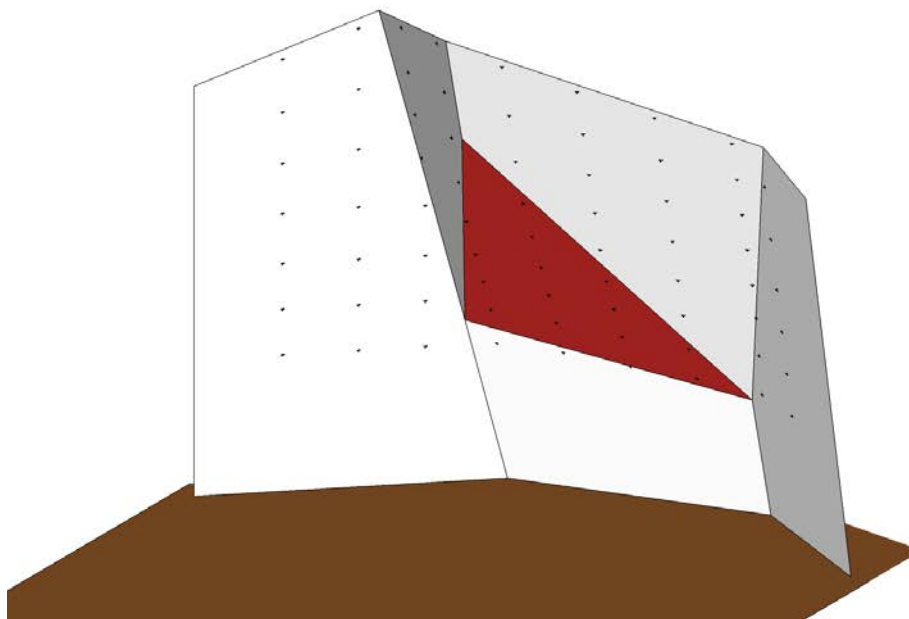


Fig. 3.9. Forma de medir las distancias entre seguros.



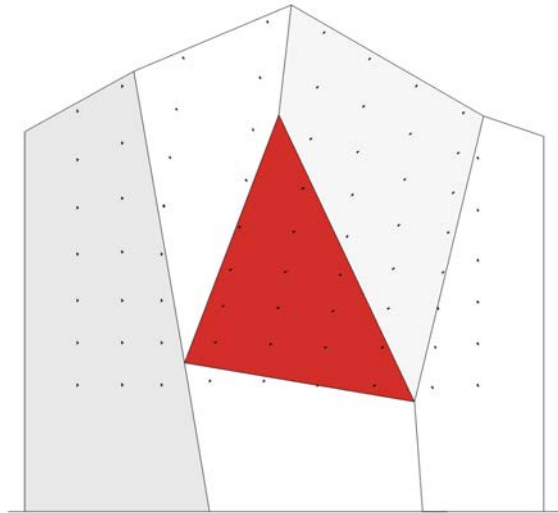


Fig. 3.10. Emplazamiento de los puntos de protección en el rocódromo.

3.2. ESTADOS LÍMITE

Se denominan estados límite a aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que la estructura no cumple alguno de los requisitos estructurales para los que ha sido concebida.

3.2.1. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

Los estados límite últimos (ELU) son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio de la construcción o el colapso total o parcial de la misma.

Como estados límite últimos deben considerarse los debidos a:

- Pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido.
- Fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de una parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales (incluidos los apoyos y la cimentación) o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originados por efectos dependientes del tiempo (corrosión, fatiga).

Para comprobar los ELU de esta estructura se utiliza un coeficiente de seguridad de 1.25 para la madera laminada encolada y de 1.05 (coeficiente parcial de seguridad relativo a la plastificación) para el acero, con una tensión de límite elástico de 275MPa, comprobando que las tensiones obtenidas, tras multiplicar las cargas por los coeficientes de ponderación correspondientes, son inferiores a las admisibles. [1]

3.2.2. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

Los estados límite de servicio (ELS) son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de la construcción o a su apariencia.

Los estados límite de servicio pueden ser reversibles o irreversibles. La reversibilidad se refiere a las consecuencias que excedan los límites especificados como admisibles, una vez desaparecidas las acciones que las han producido.

Como estados límite de servicio deben considerarse los relativos a:

- Las deformaciones (flechas, asientos o desplomes) que afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios o al funcionamiento de equipos e instalaciones.
- Las vibraciones que causen una falta de confort de las personas o que afecten a la funcionalidad de la obra.
- Los daños o el deterioro que pueden afectar desfavorablemente a la apariencia, durabilidad o funcionalidad de la obra.

Para ELS, se comprueba que el desplazamiento total de los nodos críticos es menor a $1/350$ la longitud de referencia, siendo ésta en este caso la distancia a la pared de la nave.

[1]

CAPÍTULO 4. MÉTODO DE CÁLCULO

Una vez diseñada la estructura, se procede a su cálculo, con la finalidad de comprobar los ELU y ELS, y elegir los perfiles más adecuados para cumplir con las solicitaciones pero sin sobredimensionar excesivamente, lo que influiría notablemente en el presupuesto final.

A continuación se analiza en detalle el proceso de cálculo de una de las zonas en las que se divide el rocódromo.

4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MALLADO

Para realizar el cálculo de la estructura con la mayor eficiencia posible y aprovechar los recursos disponibles sin provocar una disminución apreciable en la calidad y exactitud de los resultados, el primer paso es el estudio de la sensibilidad de la malla.

Al estar limitados por la condición de tener un máximo de 1000 nodos por utilizar la licencia ABAQUS STUDENT, la estructura global se fracciona en diversas regiones, en función del número de nodos más interesante por barra.

Este estudio consiste en el cálculo de la tensión producida por un escalador en una zona, cambiando el número de nodos en la barra crítica:

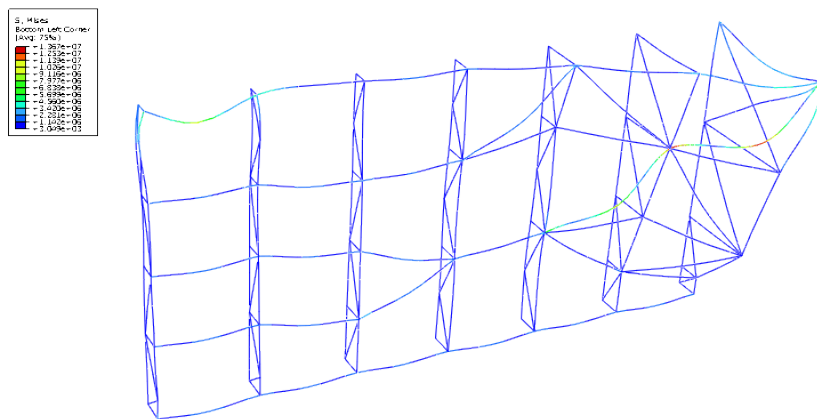


Fig. 4.1. Análisis de sensibilidad. 40 nodos. Tensión (Pa)

En general, en este proyecto se utiliza un factor de escala de 50 para representar la estructura deformada, con la finalidad de ver con claridad la deformación producida tras actuar las cargas pero sin perder de vista la forma de la estructura original. ABAQUS ofrece múltiples posibilidades de visualización de los resultados, pudiendo representarse también la estructura sin deformar junto con la deformada.

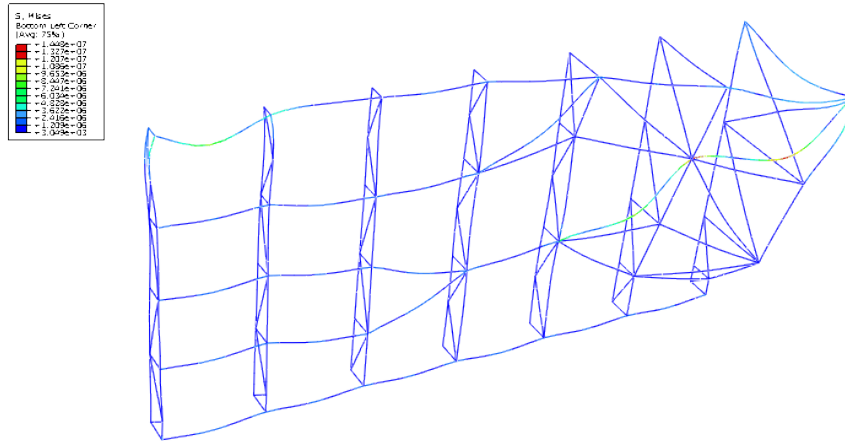


Fig. 1.2. Análisis de sensibilidad. 80 nodos. Tensión (Pa)

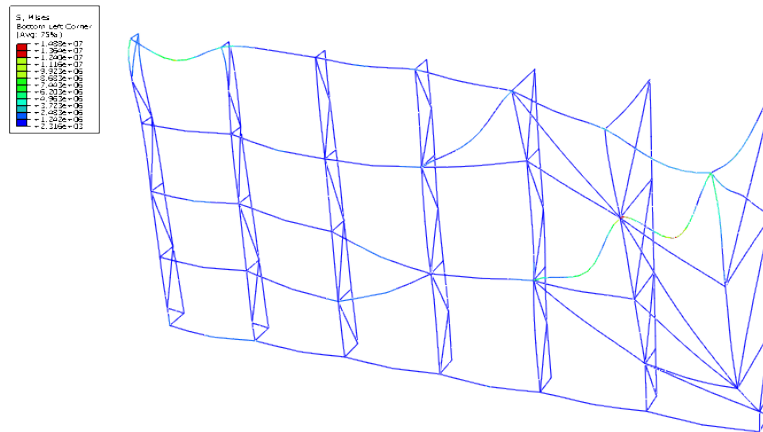


Fig. 2.3 Análisis de sensibilidad. 160 nodos. Tensión (Pa)

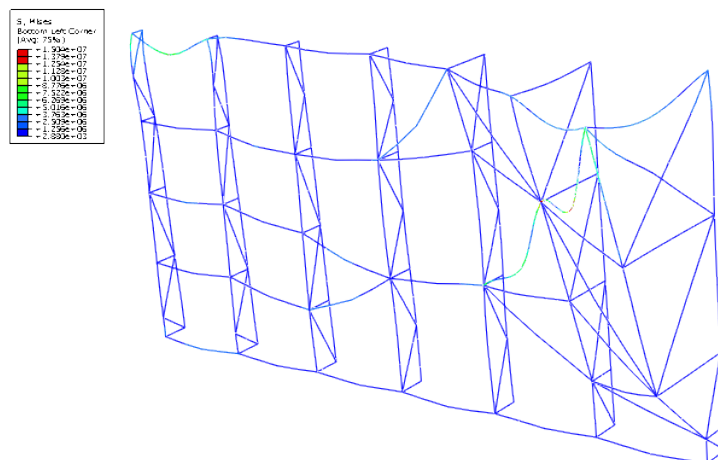


Fig. 4.4. Análisis de sensibilidad. 260 nodos. Tensión (Pa)

En la barra crítica, los resultados son los siguientes, en función del número de nodos:

Nº de Nodos	Tensión (MPa)
12	11.58
40	13.67
80	14.48
160	14.88
260	15.04

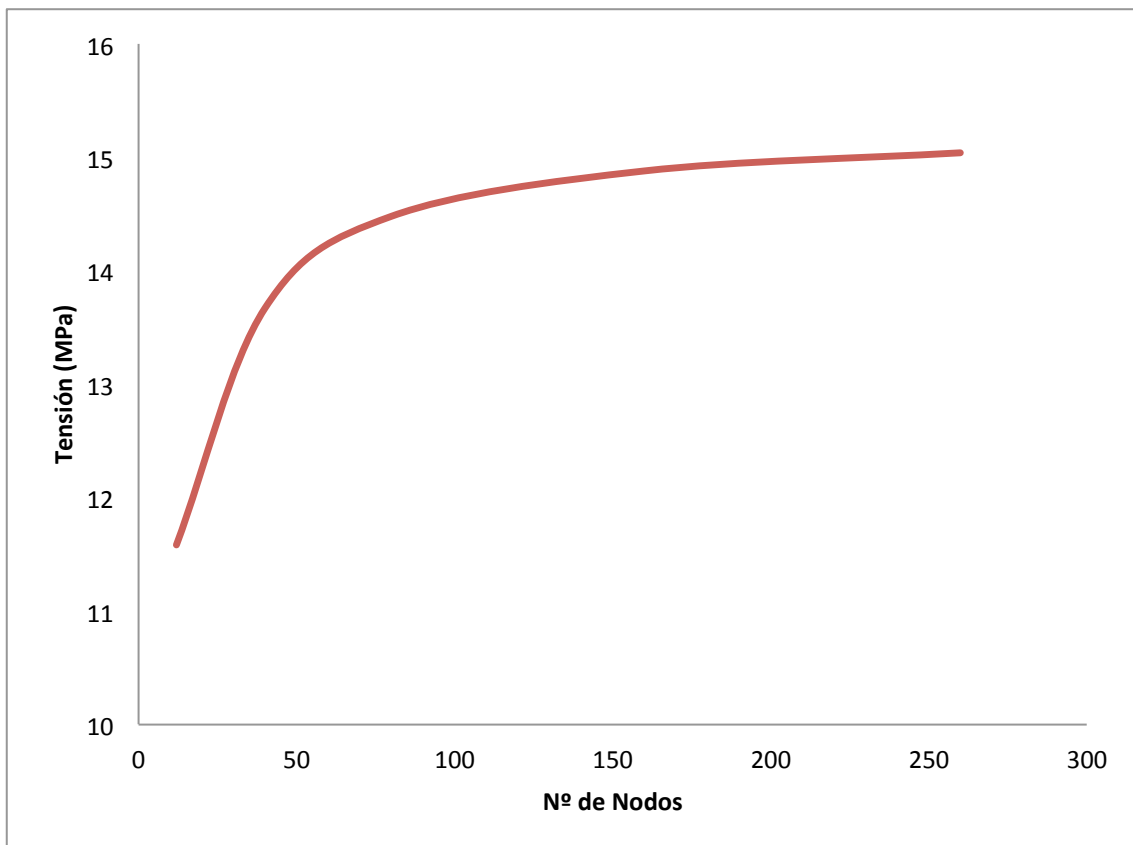


Fig. 4.3. Tensión (MPa) en la barra crítica en función del nº de nodos

Al representar estos resultados gráficamente, se puede observar la evolución rápida de la tensión obtenida hasta los 60 nodos aproximadamente, incrementándose muy lentamente a partir de los 100 nodos, por lo que se elige este número como el idóneo para el cálculo de las barras críticas de la estructura.

Tras comprobar que el número de nodos de que se dispone es insuficiente considerando una zona de vías y dos de boulder, se divide cada una de las zonas de boulder en otras dos partes cada una, y la de vías en tres.

En las zonas no críticas de la estructura se utiliza en un primer cálculo un número de nodos de 10 por barra, pudiendo disminuirse posteriormente en algunas zonas que se haya comprobado que no reciben esfuerzos significativos, con el objetivo de aumentar el número de nodos en otras zonas más importantes para el cálculo.

4.2. ELECCIÓN DEL ESPESOR DEL PANEL DE MADERA

Los paneles de madera utilizados generalmente en rocódromos suelen tener entre 18mm y 21mm de espesor, ya que deben tener la resistencia mecánica para soportar las cargas producidas por un escalador y además el espesor tiene que ser suficiente para albergar las tuercas embutidas a las que se atornillarán las presas.

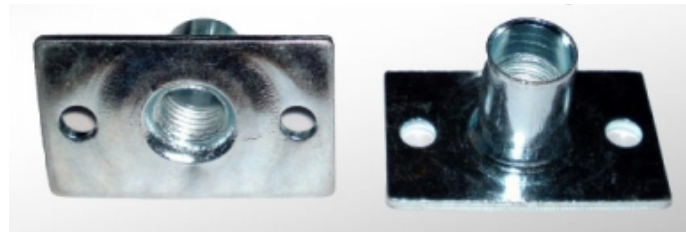
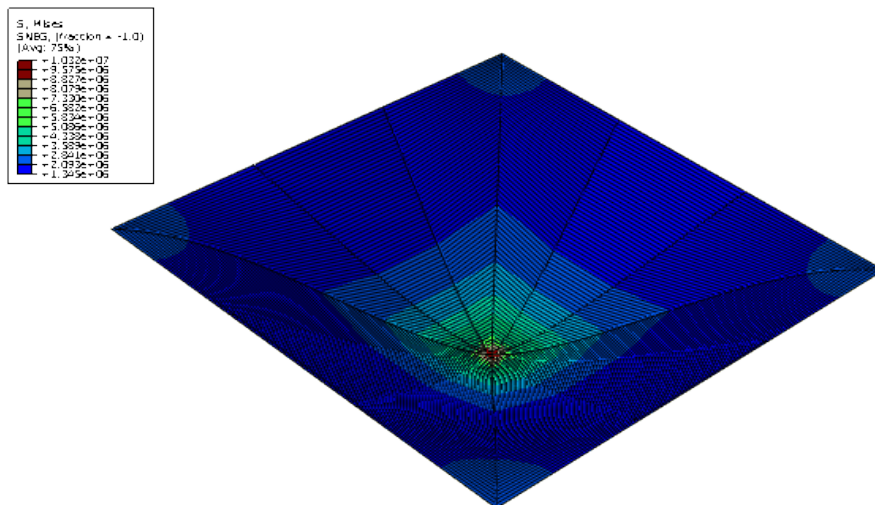


Fig. 4.4. Tuercas embutidas (T-nuts) [21]

Como comprobación de la resistencia de un panel de 18mm de espesor, se calcula la tensión provocada por un escalador suspendido en el centro de un panel de 1.5m de ancho y 1.5m de alto, colocado horizontalmente.



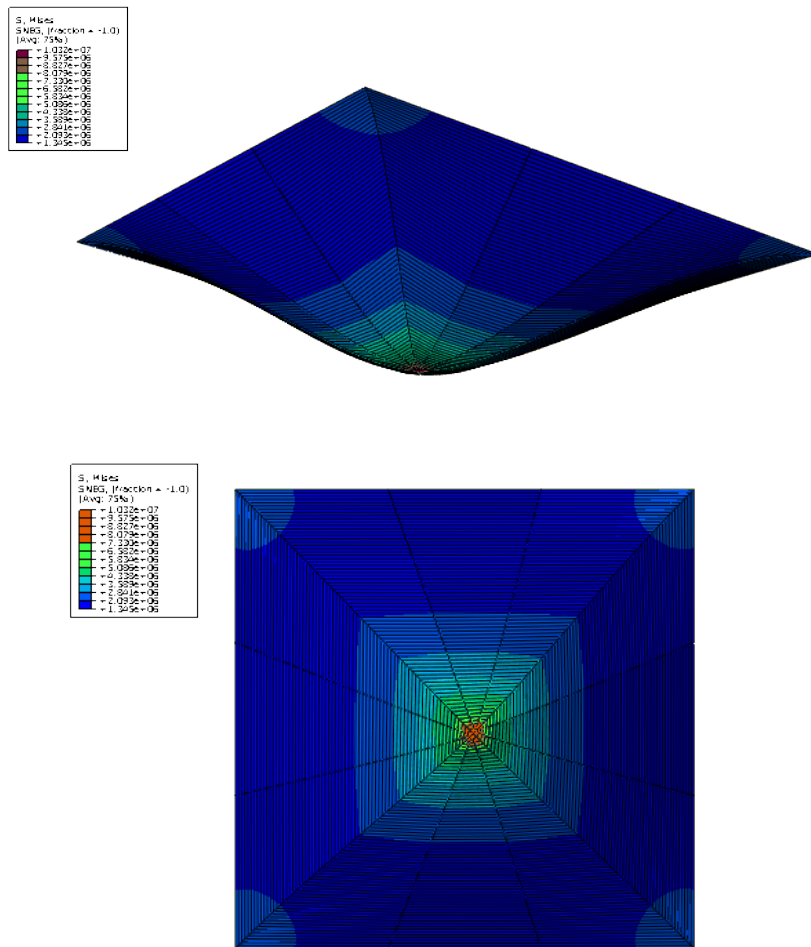


Fig. 4.5. Tensión (Pa) producida por un escalador en un panel de madera de 18mm de espesor.

El resultado obtenido es 10.32 MPa, siendo la resistencia de un tablero de fibras duro (UNE EN 622-2) de 32 MPa, y de 23 MPa para un tablero de virutas orientadas de alta prestación (UNE EN 300). [1]

4.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA ZONA DE VÍAS 2

Para explicar detalladamente el método de cálculo se describe la estructura de la zona de *Boulder 1*, usada anteriormente como ejemplo para el estudio de la sensibilidad, y la zona de *Vías 2*, representada a continuación:

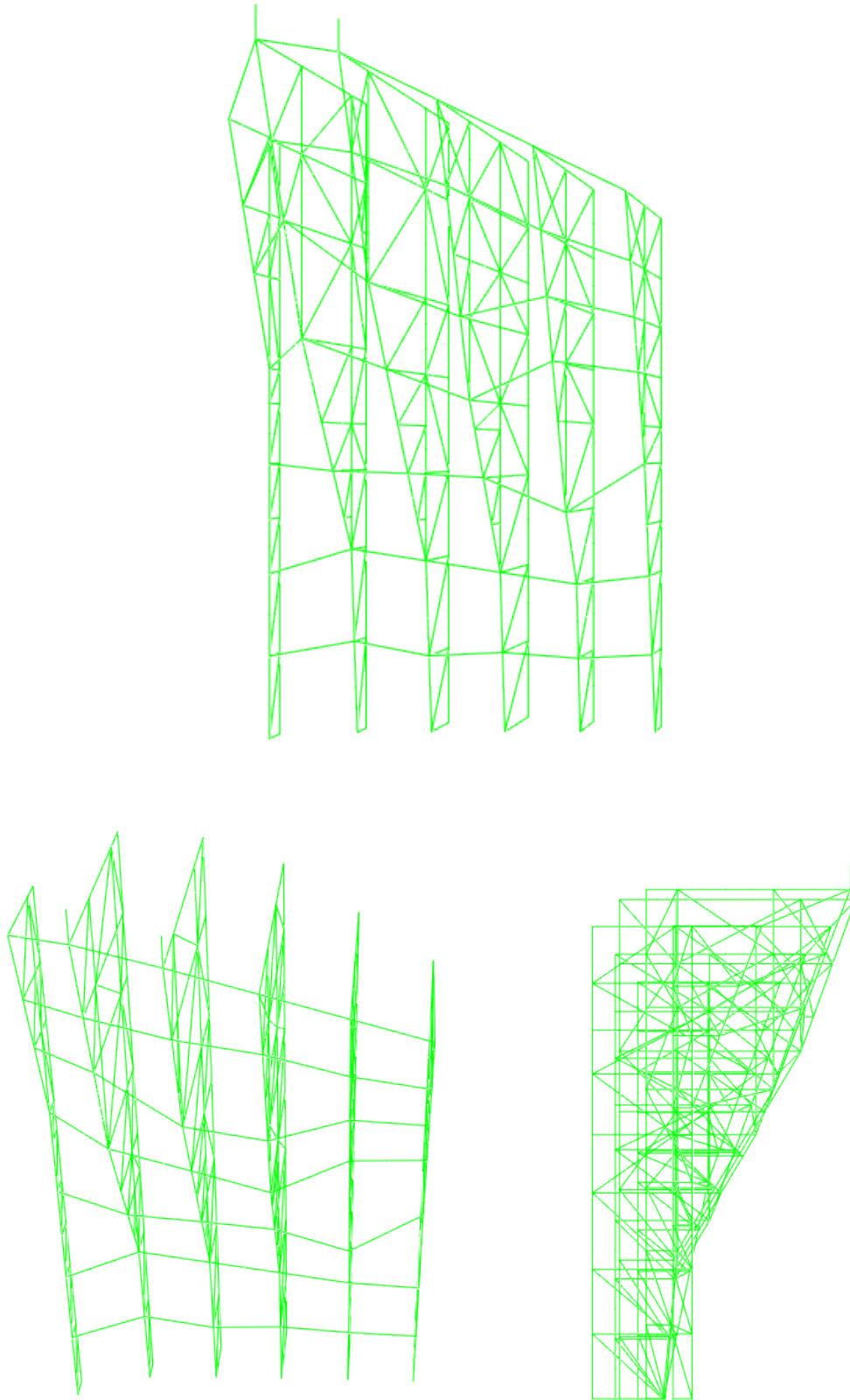


Fig. 4.8. Estructura de la zona de Vías 2.

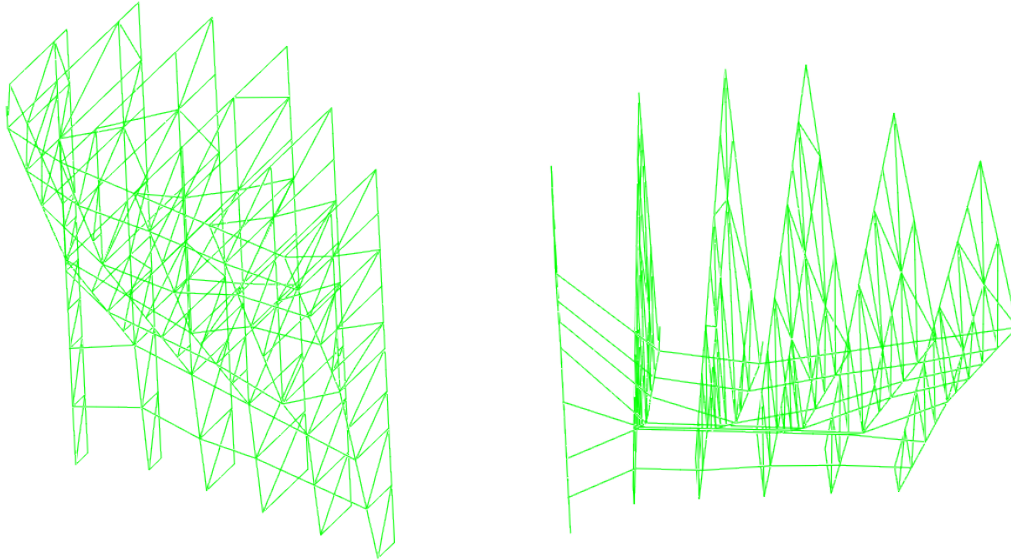


Fig. 4.9. Estructura de la zona de Vías 2.

4.4. EFECTOS

4.4.1. EFECTOS PERMANENTES

Los efectos permanentes comprenden el peso intrínseco de la estructura y el de todo el armazón estructural.

La estructura de la zona de boulder se resuelve con vigas de madera laminada encolada GL32h de dimensiones a definir más adelante, una vez finalizados los cálculos, mientras que la estructura de acero está constituida por perfiles de acero laminado de sección en L .

Se introduce el peso de la estructura en ABAQUS como una carga gravitacional, por lo que se incluye el factor de seguridad parcial para los efectos permanentes (1.35) en la densidad del material utilizado para la estructura. Teniendo en cuenta que la densidad de la madera laminada encolada es de 480 kg/m^3 , se multiplica por 1.35 para obtener 648 kg/m^3 , y para el acero $7850 \text{ kg/m}^3 \times 1.35 = 10597.5 \text{ kg/m}^3$.

El peso propio de los paneles se introduce como una carga lineal, en N/m . Al ser una carga poco importante comparada con las demás, se promedia por zonas para simplificar el proceso y se multiplica por el coeficiente de seguridad 1.35.

A continuación se comprueba si el peso de los paneles es despreciable o no frente a otras cargas para simplificar los resultados.

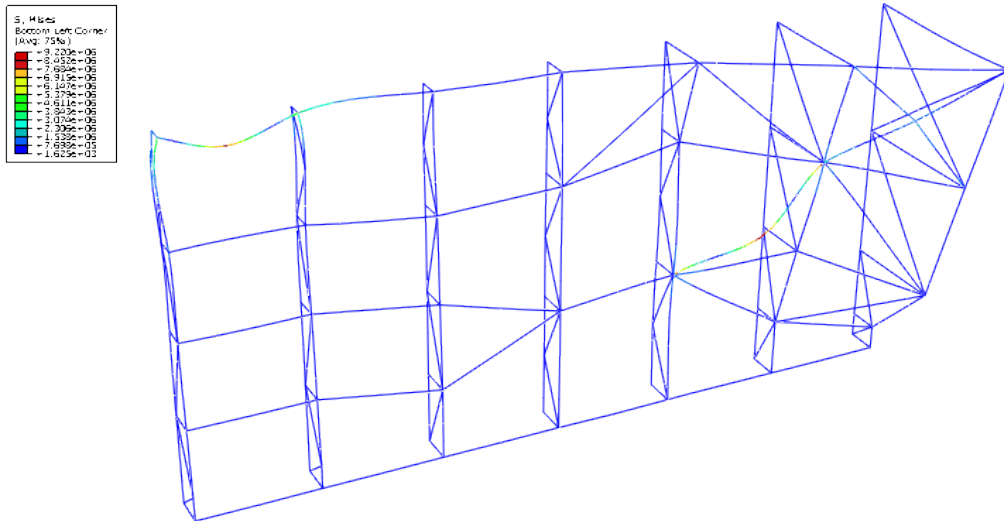


Fig. 4.10. Estructura despreciando el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa).

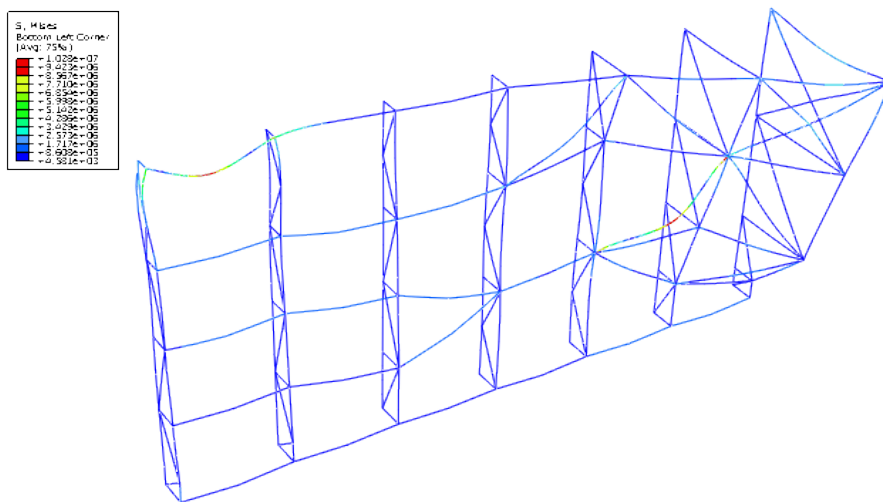


Fig. 4.11. Estructura teniendo en cuenta el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa).

Las tensiones resultantes con y sin paneles difieren notablemente en la zona de boulder (10.28 MPa frente a 9.22 MPa), por lo que se incluye esta carga en todos los cálculos.

Como se comprueba a continuación, sí podría despreciarse esta carga en la zona de vías respecto al peso de la estructura de acero y la carga de una caída escalando con cuerda, pero se optará por incluir esta carga también para obtener unos resultados más precisos.

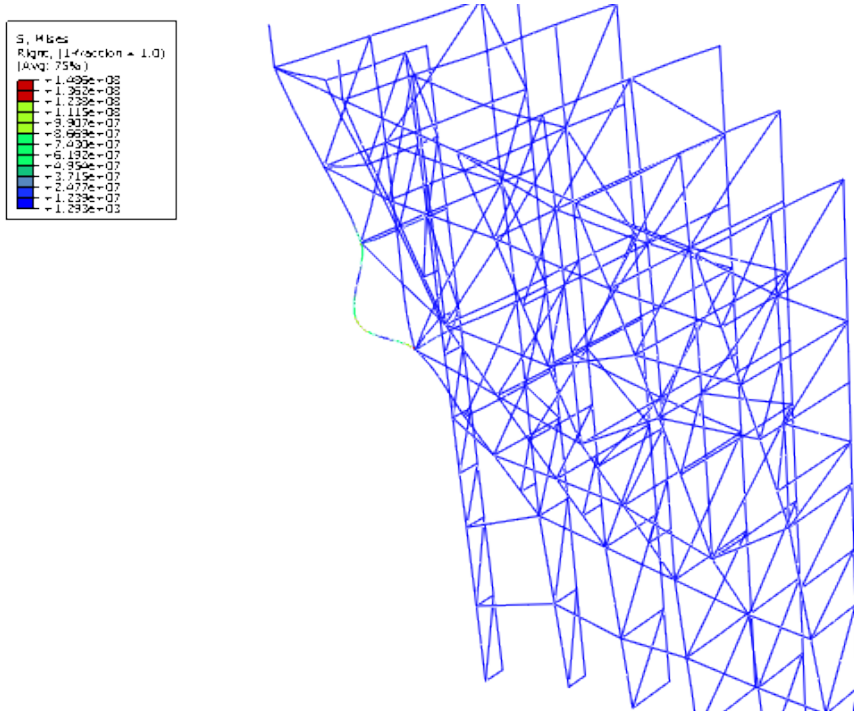


Fig. 4.12. Estructura despreciando el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa).

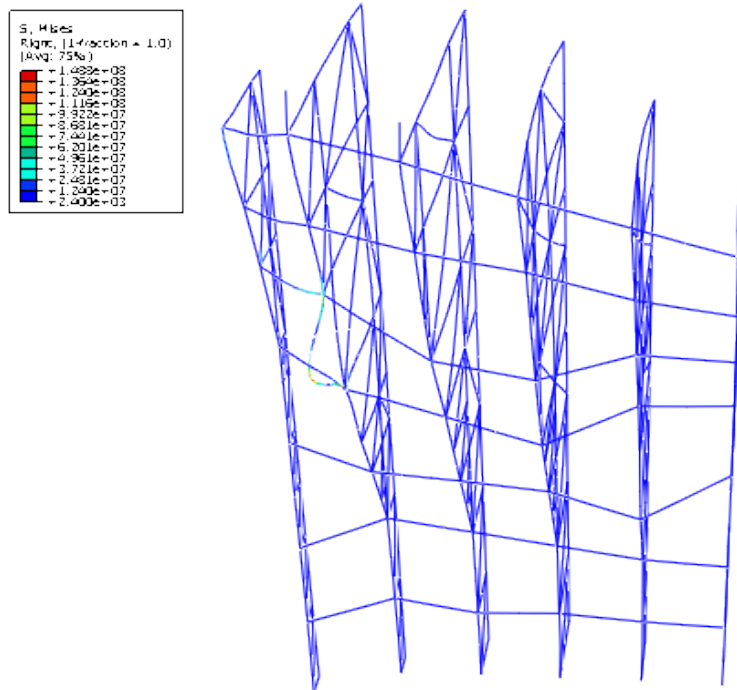


Fig. 4.13. Estructura teniendo en cuenta el peso de los paneles de madera. Tensión (Pa).

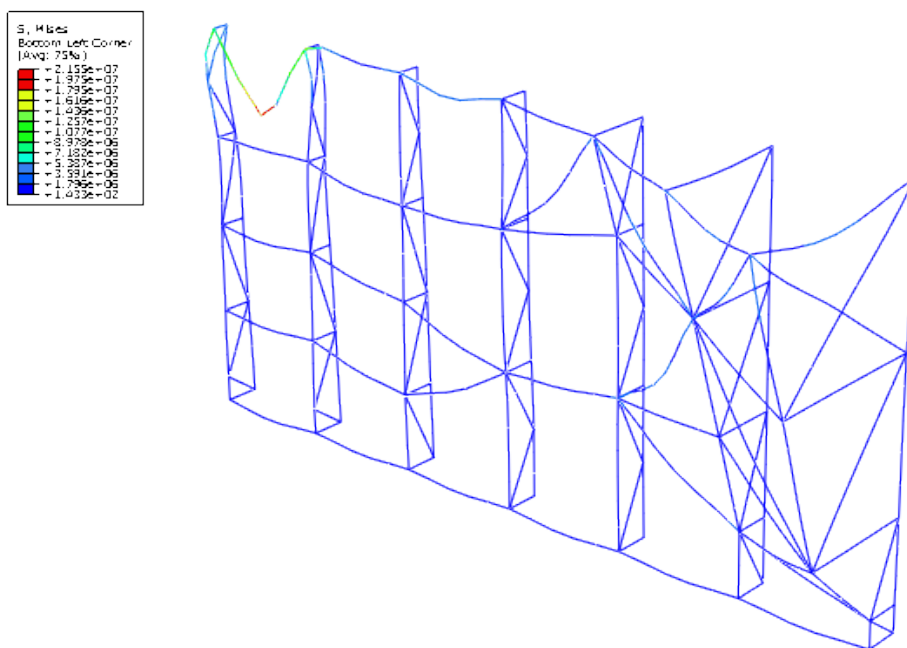
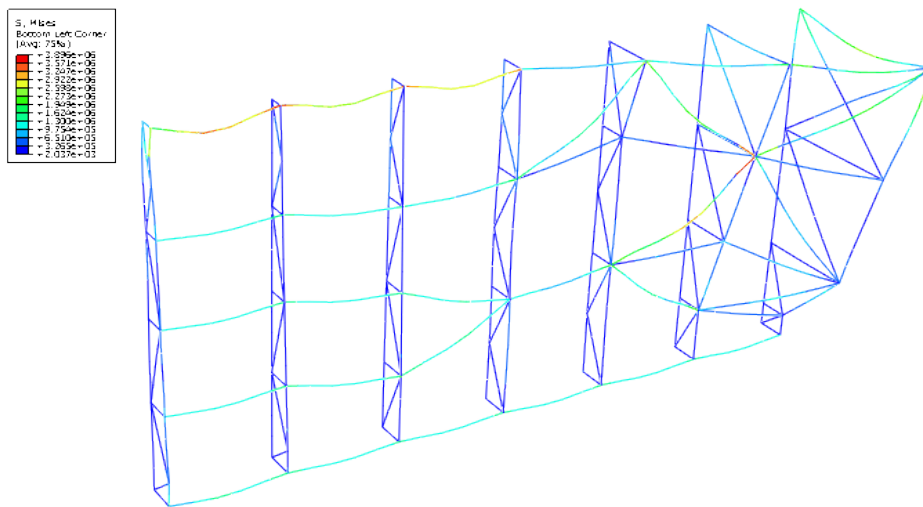
Considerando el peso de los paneles, la tensión obtenida en la barra crítica es 148.8 MPa, frente a 148.6 MPa sin ellos.

4.4.2. EFECTOS VARIABLES

Al estar situado este rocódromo en interior y ser una estructura relativamente pequeña, sólo es necesario considerar las cargas del usuario, estática y en caída.

En cada una de las zonas de boulder se consideran las cargas de tres personas escalando simultáneamente. La carga característica de un escalador es de 0.8 kN [2], que al multiplicarse por el coeficiente de seguridad 1.5 para efectos variables se introduce como 1200 N.

Para elegir los tres puntos más desfavorables se coloca un escalador en diferentes zonas y una vez comprobados los puntos con mayor sollicitación se colocan simultáneamente los tres.



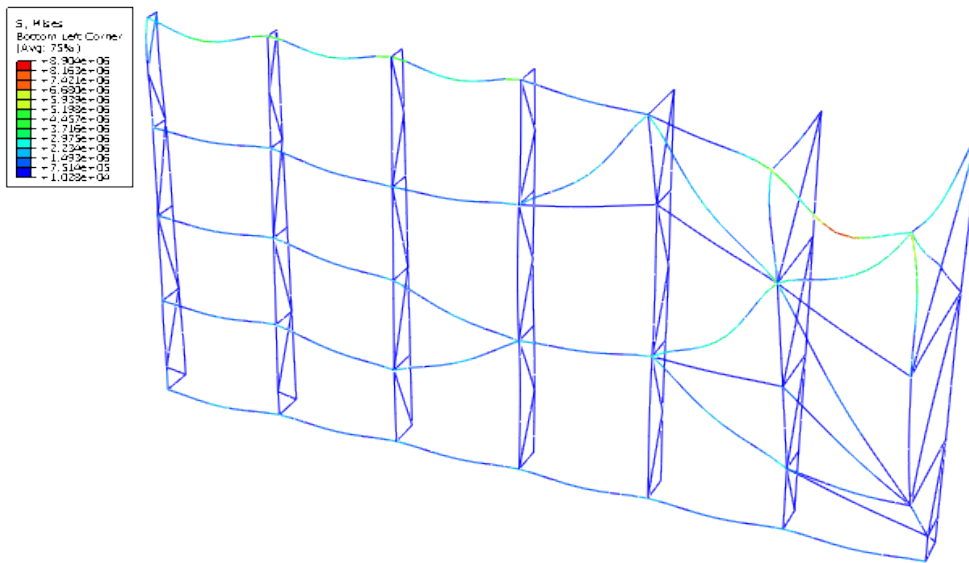
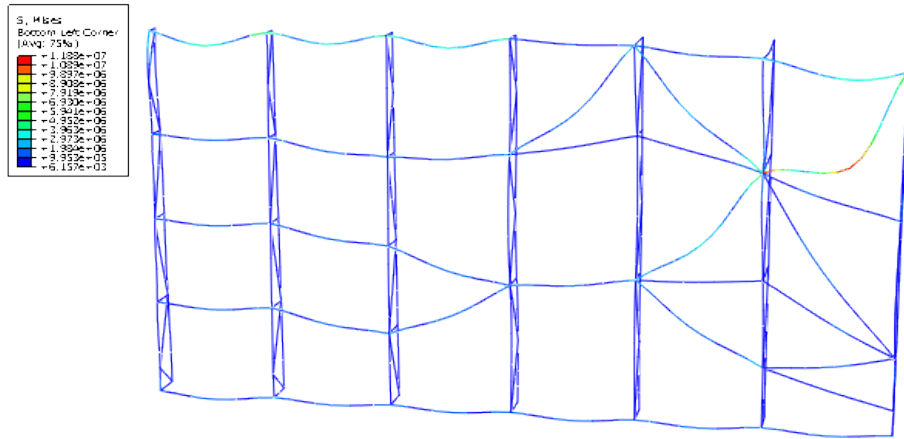


Fig. 4.14. Diferentes posiciones de un escalador. Tensión (Pa).

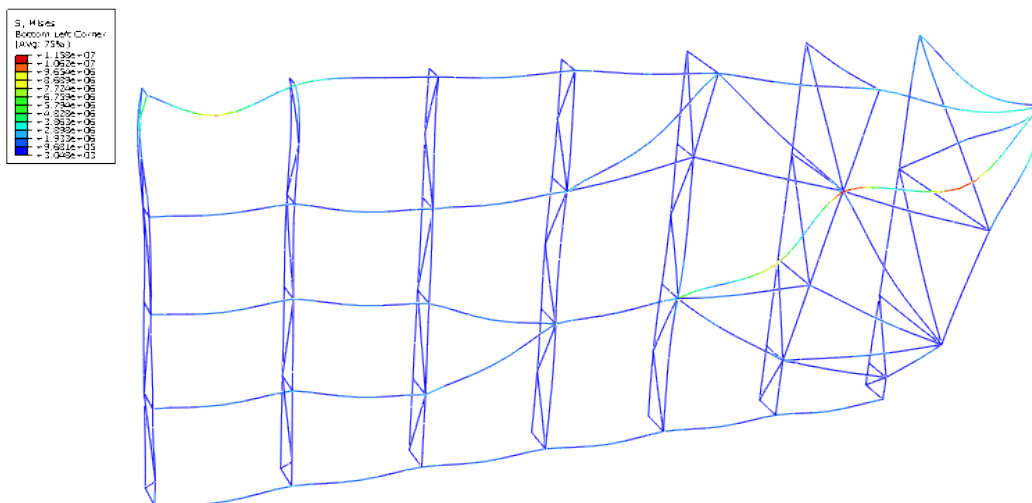


Fig. 4.15. Tres personas escalando simultáneamente en los puntos más desfavorables. Tensión (Pa).

En la zona de vías el procedimiento es similar, probando en diversos puntos, con la diferencia de que aquí las caídas (6.6 kN) sólo se pueden producir en los puntos de protección individual y de que se considera la caída de un solo escalador [2], aunque también se incluye un equipo de escalada en cada punto de protección superior (2.5 kN). Estas cargas también se multiplican por el coeficiente de seguridad: 1.5 para efectos variables.

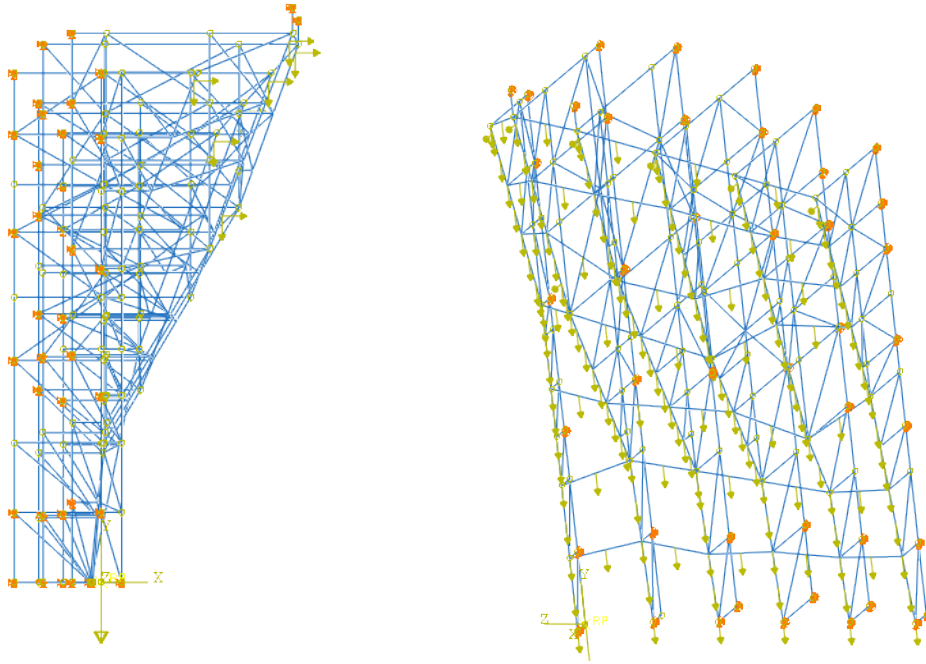


Fig. 4.16. Efectos sobre la estructura (representados en color amarillo)

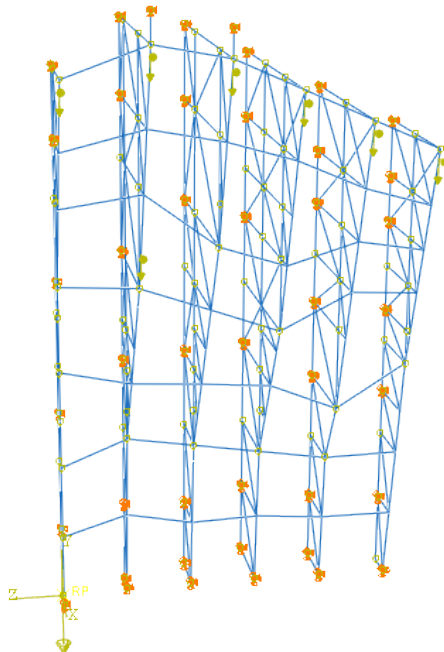


Fig. 4.17. Anclajes de la estructura a la nave (representados en color naranja)

4.5. COMPROBACIÓN ELU Y ELS

De forma simbólica, un estado límite se puede expresar como:

$$\gamma_F \cdot S \leq R/\gamma_M$$

donde

γ_F es un factor de seguridad parcial para los efectos

γ_M es un factor de seguridad parcial para los materiales

S es el efecto de la carga

R es la resistencia de la estructura

Finalmente, una vez verificados los ELU y ELS se reajusta el diseño disminuyendo y aumentando la sección de la estructura según las zonas en las que las solicitaciones son menores o mayores y se repiten los cálculos para comprobar que cumple con las condiciones requeridas.

En la zona de *Boulder 1* se ha realizado el cálculo inicial con un perfil de 80x80mm y posteriormente se ha modificado el diseño utilizando perfiles de 40x40mm y 60x60mm:

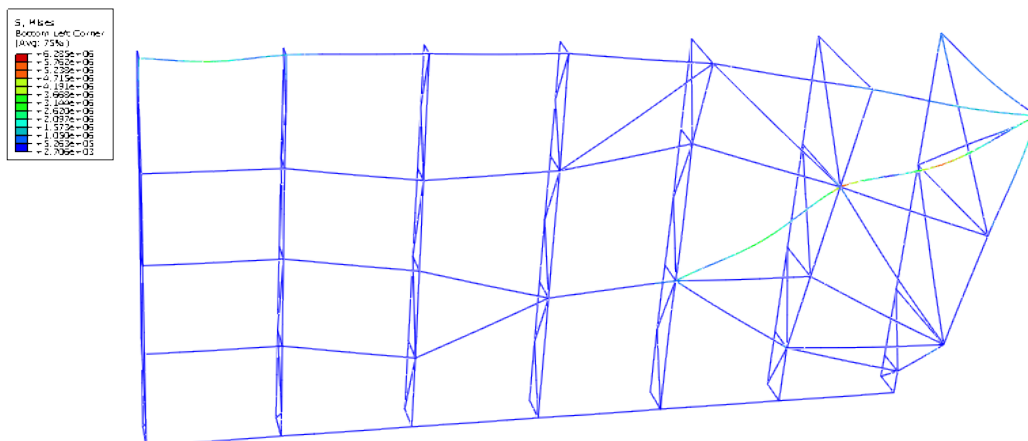


Fig. 4.18. Perfil #80x80 en toda la estructura. Tensión (Pa).

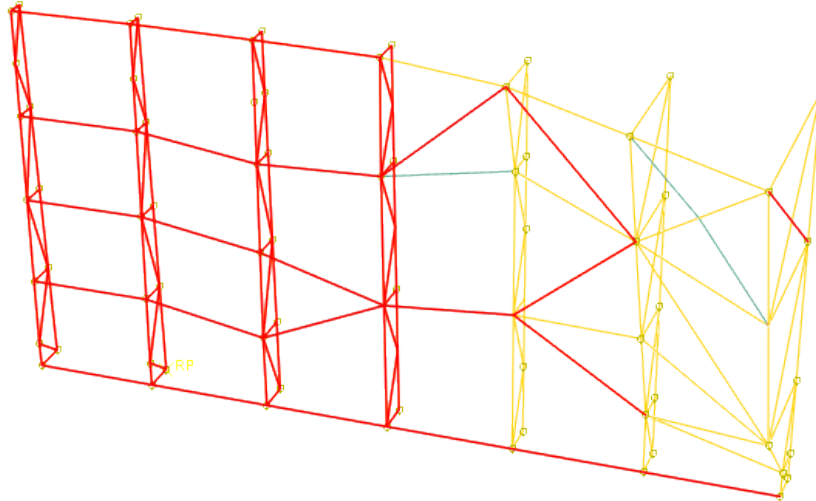


Fig. 4.19. Perfil #40x40 representado en color rojo y #60x60 en el resto

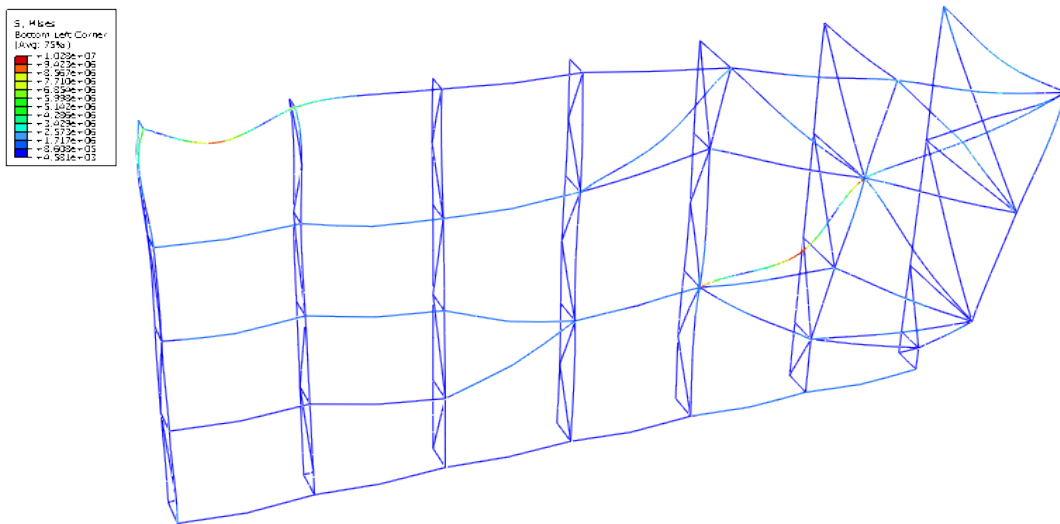


Fig. 4.20. Resultado final: tensión (Pa) boulder1.

La tensión máxima obtenida para esta zona de la estructura es 10.28 MPa, dividiendo la resistencia del material por el factor de seguridad del material ($32 \text{ MPa}/1.25 = 25.6 \text{ MPa}$) [1] se puede comprobar que cumple holgadamente con la condición de ELU.

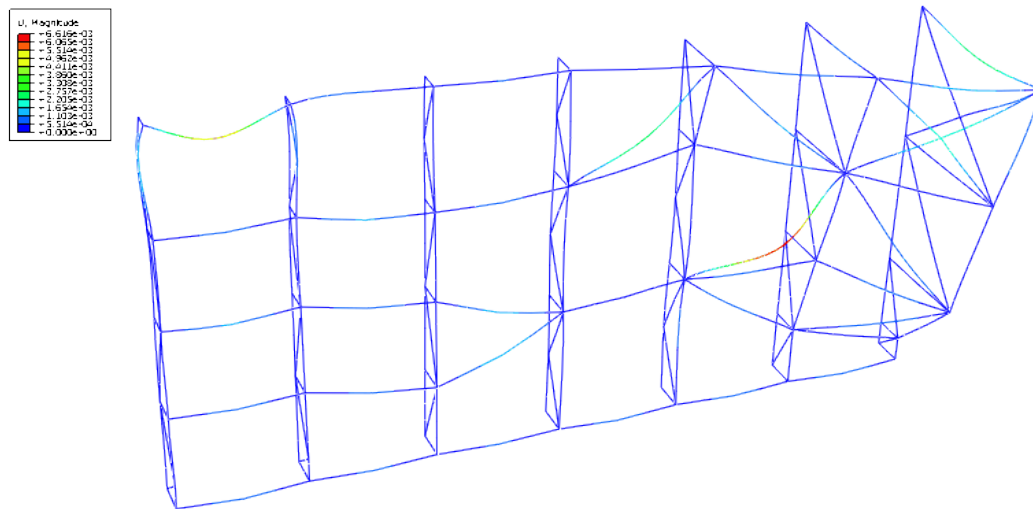


Fig. 4.21. Resultado final deformación (mm) boulder1.

La deformación máxima obtenida es 6.616mm. Para verificar el ELS, se divide la longitud de referencia, en este caso la distancia a la pared de la nave, por 350:

$$U_{max} = \frac{2374.5mm}{350} = 6.784mm$$

En la zona de vías 2, tras probar con varios perfiles de acero diferentes, finalmente se han utilizado dos tipos:

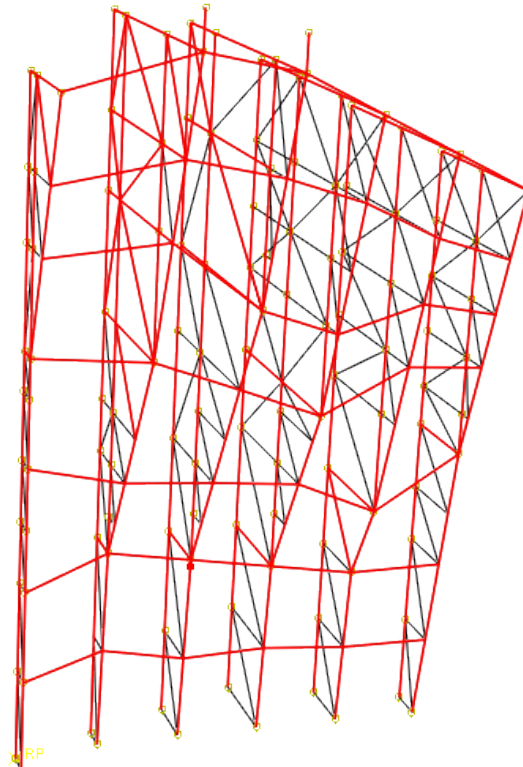


Fig. 4.22. Perfil L40x40x4 representado en color gris y L60x60x5 en color rojo [14].

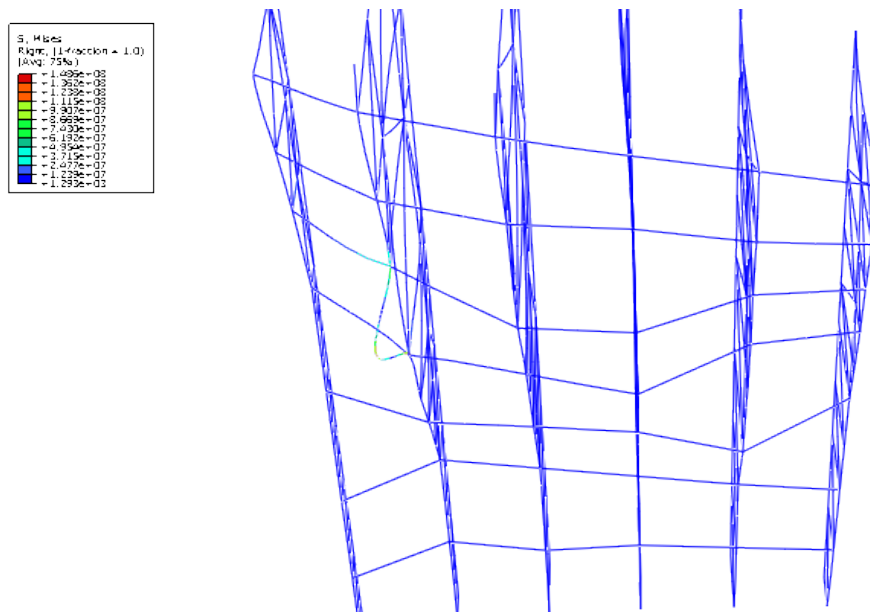


Fig. 4.23. Resultado final: tensión (Pa)

En la zona de *vías* 2, la tensión máxima obtenida es 148.6 MPa, dividiendo la resistencia del material por el factor de seguridad del material (275 MPa/1.05 = 262 MPa) [1] se puede comprobar que cumple sobradamente con la condición de ELU.

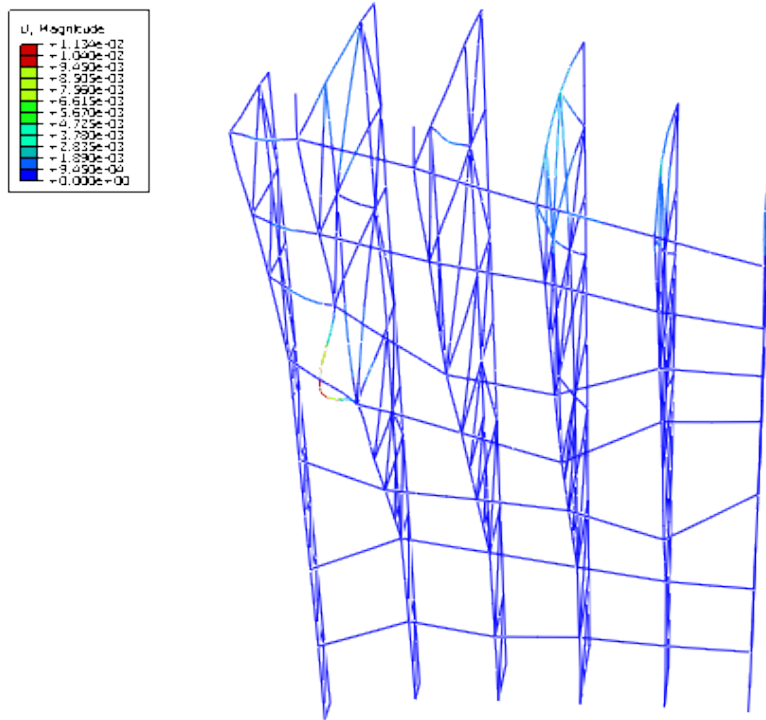


Fig. 4.24. Resultado final: deformación (mm)

La deformación máxima obtenida es 11.34mm. Para verificar el ELS, se divide la longitud de referencia, en este caso la distancia a la pared de la nave, por 350:

$$U_{max} = \frac{5474mm}{350} = 15.64mm$$

CAPÍTULO 5. ESTRUCTURA FINAL

En este capítulo se presentan los resultados de toda la estructura, dividida en sus correspondientes regiones, obtenidos por el procedimiento explicado anteriormente para diseñar y comprobar los estados límite últimos y de servicio. Finalmente se realiza un cálculo aproximado del costo del proyecto en base a las medidas, materiales y métodos empleados para la realización del mismo.

5.1. RESULTADOS

5.1.1. BOULDER 1

5.1.1.1. Boulder 1.1

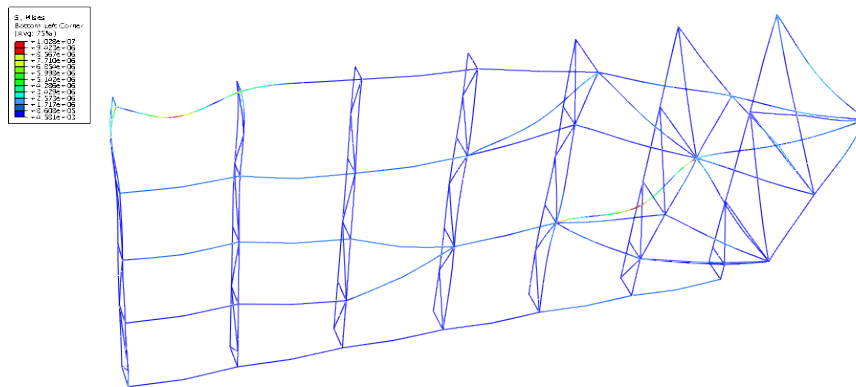


Fig. 5.1. Resultado final Boulder 1.1: tensión (Pa).

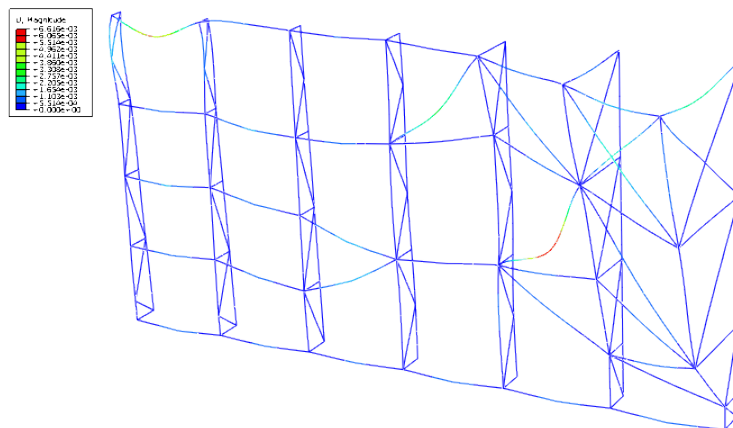


Fig. 5.2. Resultado final Boulder 1.1: deformación (mm).

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{32 \text{ MPa}}{1.25} = 25.6 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 10.28 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{\text{máx}} = \frac{2374.5}{350} = 6.784 \text{ mm} \longrightarrow U_{\text{máx}} > 6.616 \text{ mm}$$

En este primer caso, el factor limitante es la deformación en la comprobación de Estado Límite de Servicio, cuyo valor porcentual es el 97.5% del desplazamiento máximo en la región crítica, por lo que el diseño en esta región está bastante ajustado, limitado por esta condición, utilizando dos tipos de perfiles diferentes según la sollicitación sea mayor o menor en las diferentes zonas.

Sin embargo, el valor de la tensión máxima en la comprobación de Estado Límite Último no supera el 40.2% de la tensión admisible.

5.1.1.2. Boulder 1.2

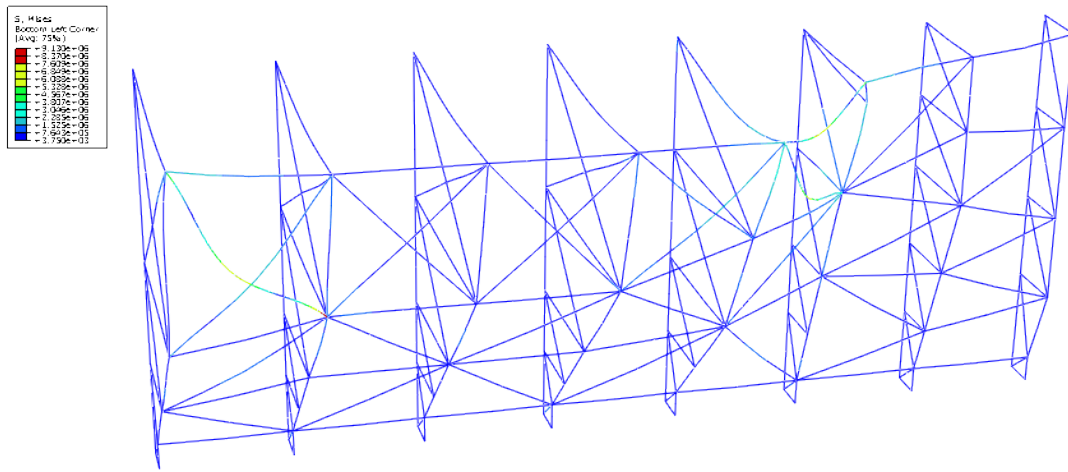


Fig. 5.3. Resultado final Boulder 1.2: tensión (Pa).

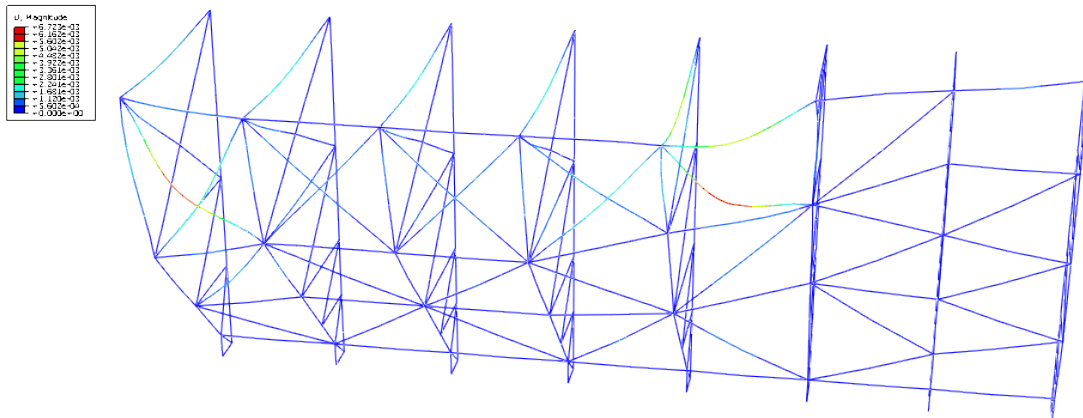


Fig. 5.4. Resultado final Boulder 1.2: deformación (mm).

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{32 \text{ MPa}}{1.25} = 25.6 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 9.13 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{m\acute{a}x} = \frac{3591.7}{350} = 10.262 \text{ mm} \longrightarrow U_{m\acute{a}x} > 6.723 \text{ mm}$$

En esta regi3n se han utilizado dos tipos de perfiles de secci3n mayor que en la anterior, ya que las solicitaciones son mayores al tener una superficie escalable m1s desplomada. En un primer c1lculo se utilizaron secciones iguales, pero no se cumpl1an las comprobaciones de estados l1mite.

Tras el redise1o, la limitaci3n es por ELS, siendo el valor de la deformaci3n producida el 65.5% del desplazamiento m1ximo en la regi3n cr1tica.

El valor de la tensi3n m1xima en la comprobaci3n de ELU es el 35.7% de la tensi3n admisible.

Con estos resultados, podr1a pensarse que esta zona de la estructura est1 ligeramente sobredimensionada, pero se han utilizado perfiles de la secci3n normalizada inmediatamente superior a las que no cumpl1an en un primer c1lculo.

5.1.2. BOULDER 2

5.1.2.1. Boulder 2.1

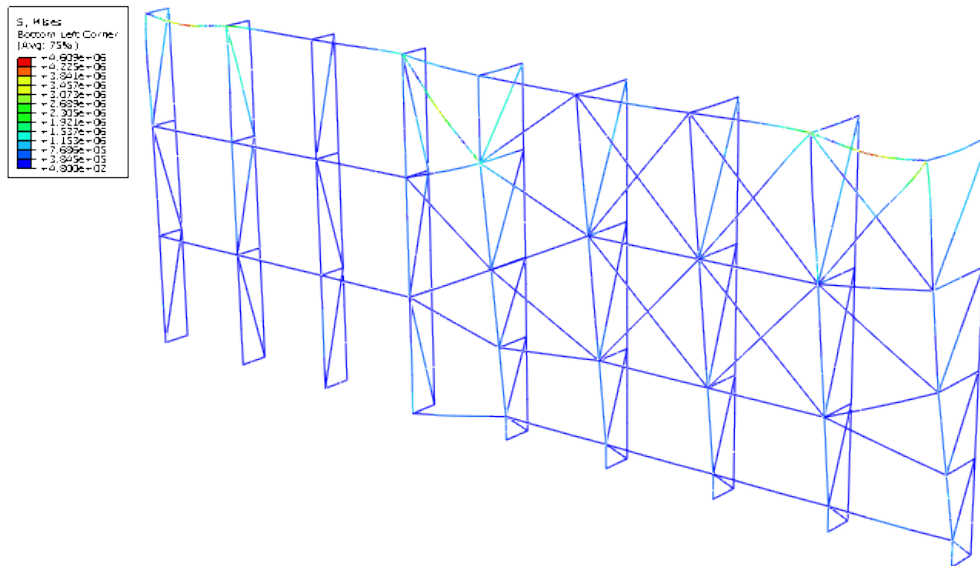


Fig. 5.5. Resultado final Boulder 2.1: tensi3n (Pa).

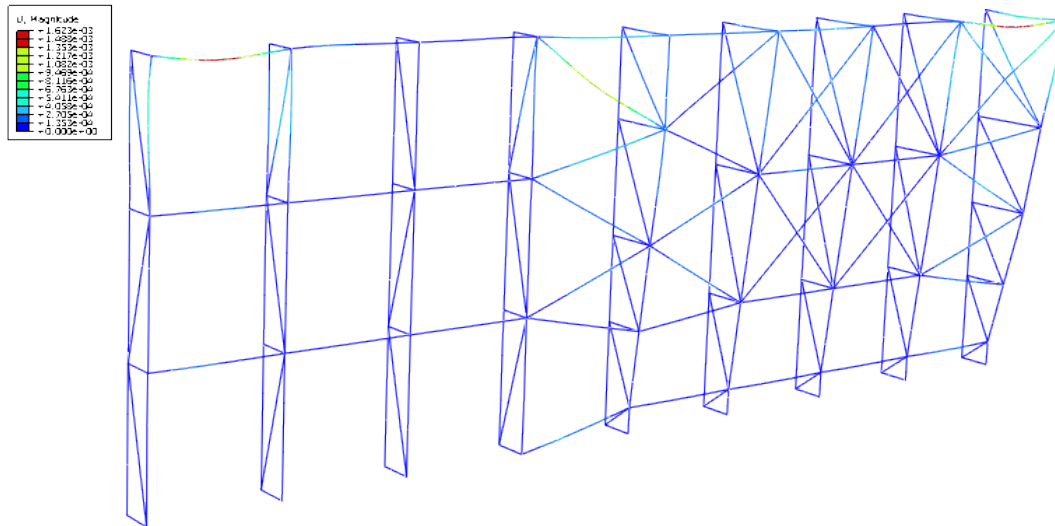


Fig. 5.6. Resultado final Boulder 2.1: deformación (mm).

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{32 \text{ MPa}}{1.25} = 25.6 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 4.609 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{\text{máx}} = \frac{1204.4}{350} = 3.441 \text{ mm} \longrightarrow U_{\text{máx}} > 1.623 \text{ mm}$$

Aquí la limitación también es por ELS, siendo el valor de la deformación producida el 47.2% del desplazamiento máximo en la región crítica.

El valor de la tensión máxima en la comprobación de ELU es el 18% de la tensión admisible.

Esta región está sobredimensionada, pero se ha diseñado con perfiles de secciones utilizadas en otras zonas, para no tener que emplear demasiados perfiles diferentes.

5.1.2.2. Boulder 2.2

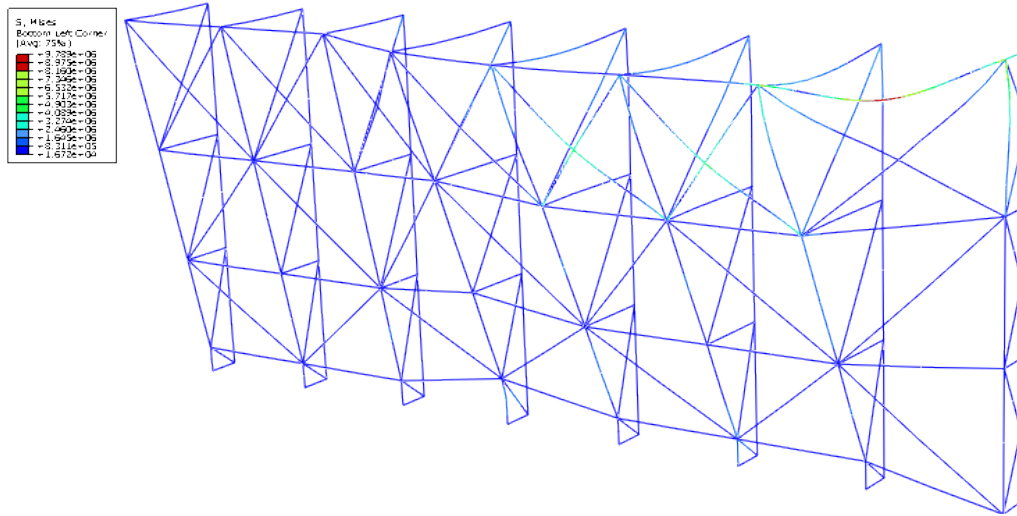


Fig. 5.7. Resultado final Boulder 2.2: tensión (Pa).

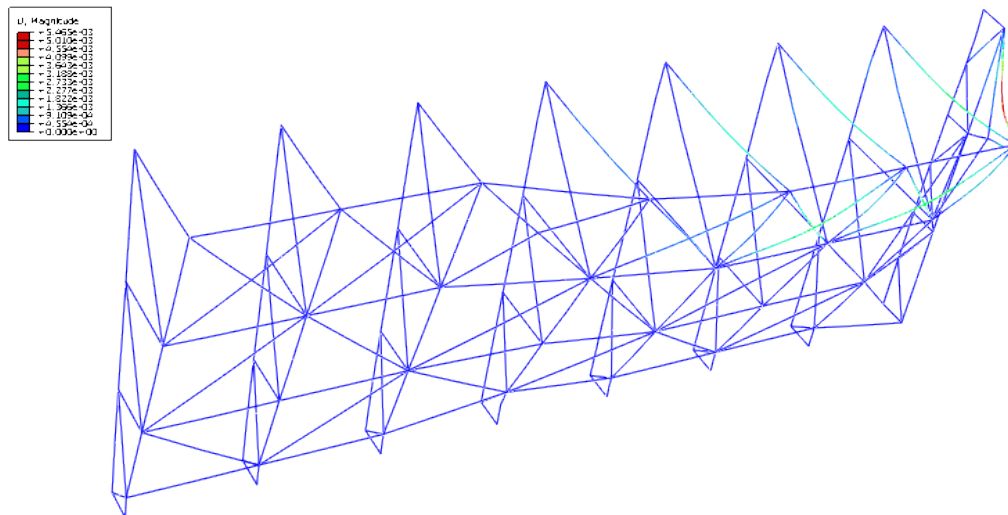


Fig. 5.8. Resultado final Boulder 2.2: deformación (mm).

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{32 \text{ MPa}}{1.25} = 25.6 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 9.789 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{\text{máx}} = \frac{2400}{350} = 6.857 \text{ mm} \longrightarrow U_{\text{máx}} > 5.465 \text{ mm}$$

Esta zona está diseñada con tres perfiles de los utilizados anteriormente, siendo la limitación por ELS, con un valor de la deformación producida el 79.5% del desplazamiento máximo en la región crítica.

El valor de la tensión máxima en la comprobación de ELU es el 38.2% de la tensión admisible.

5.1.3. VÍAS

5.1.3.1. Vías 1

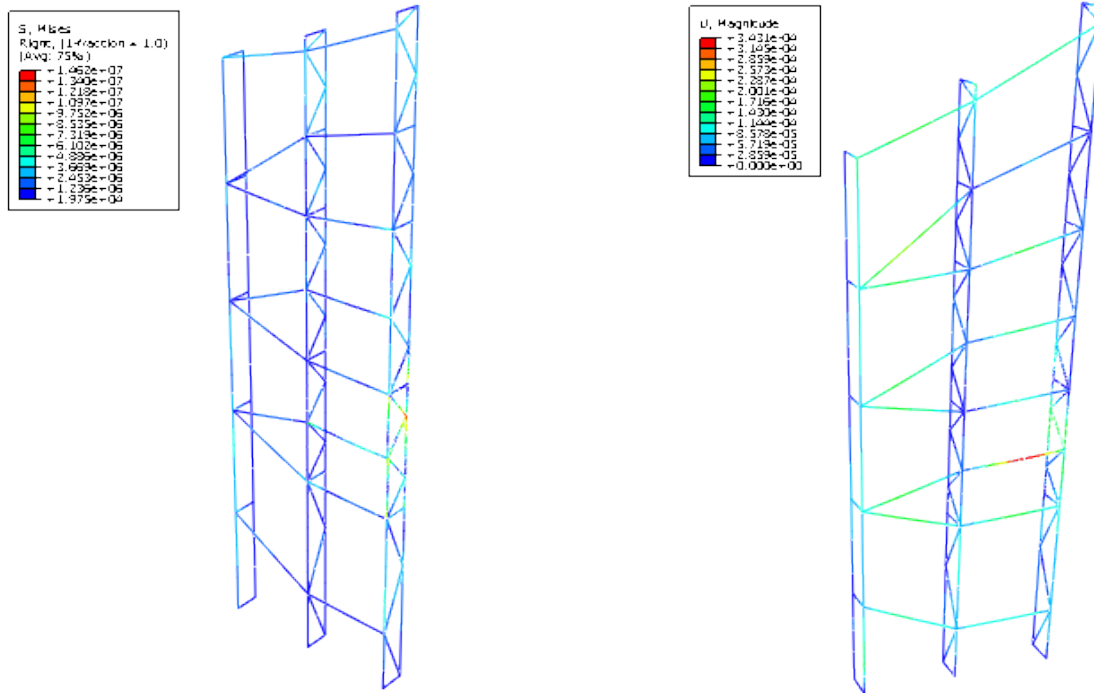


Fig. 5.9. Resultado final Vías 1: tensión (Pa) a la izquierda y deformación (mm) a la derecha.

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{275 \text{ MPa}}{1.05} = 262 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 14.62 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{\text{máx}} = \frac{400}{350} = 1.143 \text{ mm} \longrightarrow U_{\text{máx}} > 0.343 \text{ mm}$$

En la zona de vías se han utilizado dos perfiles diferentes de acero. En esta región sólo se ha empleado el de menor sección, al ser un área pequeña con una sollicitación relativamente baja por tener una superficie escalable vertical.

Con un valor de la deformación producida del 30% del desplazamiento máximo en la región crítica y un valor de la tensión máxima del 5.6% de la tensión admisible, la limitación es por ELS. Esta zona está sobredimensionada para los esfuerzos que se producen, aunque se haya utilizado el perfil de menor sección de los escogidos,

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{275 \text{ MPa}}{1.05} = 262 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 148.9 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{\text{máx}} = \frac{5474}{350} = 15.64 \text{ mm} \longrightarrow U_{\text{máx}} > 11.21 \text{ mm}$$

Ésta es la partición de la zona de vías más complicada, al ser la estructura más compleja y tener una superficie escalable muy desplomada, por ello se han utilizado dos perfiles normalizados de secciones diferentes.

El factor limitante es la deformación en la comprobación de ELS, cuyo valor porcentual es el 71.7% del desplazamiento máximo en la región crítica, mientras que el valor de la tensión máxima en la comprobación de ELU es el 56.8% de la tensión admisible. Éste el caso en el que menos diferencia porcentual hay entre ELS y ELU, ya que la tensión provocada por la caída de un escalador es muy elevada en algunas barras de esta estructura.

5.1.3.3. Vías 3

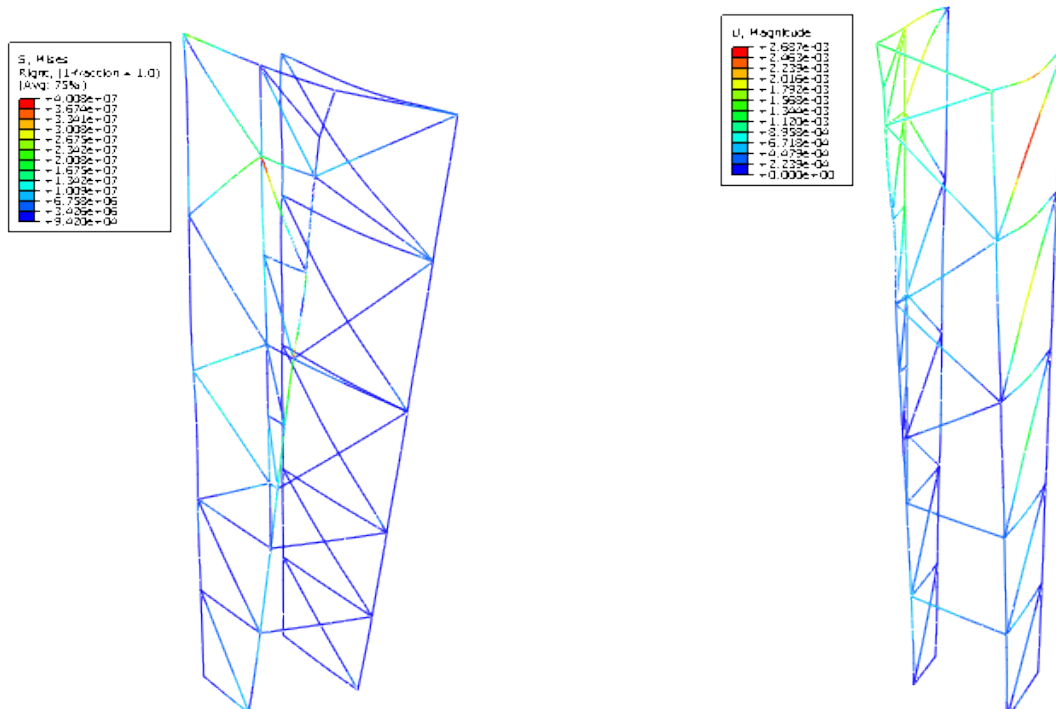


Fig. 5.12. Resultado final Vías 3: tensión (Pa) a la izquierda y deformación (mm) a la derecha.

$$\text{ELU: } R/\gamma_M = \frac{275 \text{ MPa}}{1.05} = 262 \text{ MPa} \longrightarrow R/\gamma_M > 40.08 \text{ MPa}$$

$$\text{ELS: } U_{m\acute{a}x} = \frac{3300}{350} = 9.428 \text{ mm} \longrightarrow U_{m\acute{a}x} > 2.687 \text{ mm}$$

Al igual que en la zona de *Vías 1*, aquí sólo se ha empleado el perfil de menor sección de los elegidos, al ser la sollicitación relativamente pequeña.

Con un valor de la deformación producida del 28.5% del desplazamiento máximo en la barra crítica y un valor de la tensión máxima del 15.3% de la tensión admisible, la limitación es por ELS. Esta zona también está sobredimensionada, pero no se ha querido complicar mucho el diseño y la construcción combinando demasiados perfiles diferentes para ajustar el diseño en áreas pequeñas, dando prioridad a la zona de *Vías 2*.

5.1.4. RESUMEN DE RESULTADOS

	ELU		ELS	
	R/γ_M (MPa)	$\gamma_F \cdot S$ (MPa)	$U_{m\acute{a}x}$ (mm)	U (mm)
<i>Boulder 1.1</i>	25.6	10.28	6.784	6.616
<i>Boulder 1.2</i>	25.6	9.13	10.262	6.723
<i>Boulder 2.1</i>	25.6	4.609	3.441	1.623
<i>Boulder 2.2</i>	25.6	9.789	6.857	5.465
<i>Vías 1</i>	262	14.62	1.143	0.343
<i>Vías 2</i>	262	148.9	15.64	11.21
<i>Vías 3</i>	262	40.08	9.428	2.687

Como se ha visto anteriormente, la limitación es por ELS en todas las secciones. Sin embargo, en este proyecto no se ha incluido el panel de la superficie escalable como un elemento estructural, sino sólo como una acción sobre la estructura, cuya modificación alteraría los resultados al restringir los desplazamientos de los nodos y por lo tanto en algunos casos la limitación podría ser por ELU realmente, ya que las zonas de la estructura con mayor deformación son las contiguas a la superficie escalable en la mayoría de estos casos, aunque también habría que tener en cuenta que son las zonas de tensión crítica, y los esfuerzos se repartirían entre más barras.

5.2. PRESUPUESTO

Los datos con los que se ha hecho este presupuesto corresponden al precio de la construcción industrial del año 2015 para elementos estructurales, obtenidos de la base de precios de la construcción disponible en la página web www.preoc.es, y el coste de otros elementos específicos ha sido consultado en empresas especializadas.

5.2.1. ESTRUCTURA

Ud.	Descripción	Cantidad	€/Ud.	Total
Kg	Acero laminado S275 en perfiles para vigas, pilares y correas, con una tensión de rotura de 410 N/mm ² . [12]	2589.37	1.41	3651.02€
m ³	Elemento estructural de madera laminada GL32h. [12, 15]	3.31	1208.78	4001.06€
Total Estructura				7652.08€

5.2.2. SUPERFICIE ESCALABLE

Ud.	Descripción	Cantidad	€/Ud.	Total
m ²	Tablero contrachapado fenólico de altas prestaciones de 18 mm de espesor. [16, 17]	467.29	19.5	9112.15€
1	Presas de escalada variadas, de poliuretano, poliéster y madera, densidad de 14 presas por m ² de superficie escalable. [19, 20, 21, 22]	5544	6.63	36756.72€
Total Superficie Escalable				45868.87€

5.2.3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

Ud.	Descripción	Cantidad	€/Ud.	Total
m ²	Espuma de poliuretano de alta densidad (30 Kg/m ³) y 30 cm de espesor. [24]	187	97.095	18156.76€
Total Elementos de Protección				18156.76€

5.2.4. RESUMEN PRESUPUESTO

Estructura	7652.08€
Superficie escalable	45868.87€
Elementos de protección	18156.76€
Total.....	71677.71€

El coste total de este rocódromo parece bastante razonable teniendo en cuenta las dimensiones y complejidad del mismo, y relativamente bajo con respecto al valor de la nave industrial en la que se instalaría.

Comparando los presupuestos de las diferentes partidas, la estructura representa un 10.7% del presupuesto total, la superficie escalable un 64%, y los elementos de protección un 25.3%.

Analizando esto, es destacable el bajo coste de la estructura en comparación con otros elementos.

Llama la atención especialmente el coste de las presas, representando más de la mitad del presupuesto total (51.3%). Esto es debido a la complejidad para fabricarlas, el coste de los materiales y lo especializado que es este producto.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha diseñado y calculado un rocódromo de estructura metálica y de madera, según las solicitaciones de cada zona, de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación, así como las normas UNE que se mencionan en la bibliografía.

El rocódromo estaría situado en el interior de una nave industrial del Polígono Sur de Colmenar Viejo, con un área de 236 m² escalables y 4.5 m de altura destinada a la práctica del boulder y otra zona de 160 m² escalables y 12 m de altura máxima para escalada de vías, ambas modalidades de la escalada deportiva.

La solución constructiva adoptada ha sido la siguiente:

- La zona de *boulder 1* está compuesta por 15 cerchas constituidas por perfiles de madera laminada encolada GL32h de secciones cuadradas de 40x40 mm y 60x60 mm y rectangulares de 100x60 mm según la solicitud de cada parte, separadas 1.5 m, y unidas entre sí formando un entramado tridimensional. Esta estructura estará anclada directamente a la estructura de la nave.
- La zona de *boulder 2* es similar a la anterior, resuelta con 17 cerchas formadas por perfiles GL32h cuadrados de 40x40 mm, 60x60 mm y 80x80 mm.
- La zona de vías está constituida por 11 cerchas unidas entre sí de perfiles de acero laminado S275 de secciones en L de 40x40x3 mm y 60x60x5 mm.
- La superficie escalable es tablero contrachapado fenólico de altas prestaciones de 18 mm de espesor, que recubre toda la estructura por la parte exterior, a la que se atornillan las presas de poliuretano, poliéster o madera directamente.

Esta estructura final ha sido diseñada por un proceso de optimización, empleando el Método de Elementos Finitos para el cálculo, modificando los perfiles utilizados según las solicitaciones fuesen mayores o menores en cada barra y verificando que se cumpliesen las condiciones impuestas por los estados límite últimos y de servicio.

El factor limitante para el diseño ha sido la deformación de los elementos contiguos a la superficie escalable en la mayoría de las secciones en que se divide esta estructura. En general, el diseño de los perfiles está bastante ajustado, pero se

ha decidido sobredimensionar algunas barras para no tener que emplear un número excesivo de perfiles diferentes.

El presupuesto total de este rocódromo asciende a **71677.71€**. No es un coste excesivo teniendo en cuenta las dimensiones y complejidad del mismo, y comparado con el valor de la nave industrial en la que se instalaría. Es destacable el bajo coste de la estructura (10.7% del presupuesto total) y el gran porcentaje que supone la adquisición de presas (51.3%).

6.2. TRABAJOS FUTUROS

Sería importante para la consecución del objetivo principal de este proyecto, que es el diseño y cálculo estructural de un rocódromo, terminar algunas líneas que no han sido incluidas en este proyecto. Por ejemplo:

- Sin lugar a dudas, el cálculo de las uniones de la estructura es el punto más importante para completar el trabajo y poder dar así un precio más aproximado al coste de la obra.
- En este proyecto, la nave industrial en la que se instala el rocódromo ya está construida, pero en un trabajo similar se podría incluir el diseño y cálculo de la nave.
- Se ha considerado una distancia máxima entre elementos estructurales de 1.5 m, pero podría realizarse el cálculo del tamaño máximo de un panel de madera a partir del cual habría que colocar una barra intermedia para soportar las cargas a las que está sometido.
- Sería interesante también, una vez realizado el punto anterior, repetir el cálculo de la estructura con el menor número de barras posible, aunque de perfiles de sección mayor, para elegir la solución de diseño más económica.
- Se ha utilizado madera en la estructura de algunas zonas para simplificar el proceso constructivo, pero habría que comprobar la rentabilidad de ésta respecto a estructura de acero en todo el rocódromo.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.

En la realización de este proyecto se han consultado los siguientes libros y documentos:

1. Código Técnico de la Edificación. Actualizado en abril de 2009.
2. UNE-EN 12572-1 Estructuras artificiales de escalada. Parte 1: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para SAE con puntos de protección. Septiembre de 2007.
3. UNE-EN 12572-2 Estructuras artificiales de escalada. Parte 2: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para muros de escalada. Julio de 2009.
4. UNE-EN 12572-3 Estructuras artificiales de escalada. Parte 3: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para presas de escalada. Julio de 2009.
5. Manual de ABAQUS. Asignatura de Elasticidad. Grado en Ingeniería Mecánica. Curso 2010/2011. Carlos Santiuste Romero.
6. Abaqus/CAE 3-D Wireframe tutorial. ME 455/555 Intro to Finite Element Analysis. Portland State University, Mechanical Engineering. Hormoz Zareh. 2010.
7. Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural. Juan Tomás Celigüeta Lizarza.
8. Apuntes de la asignatura de Transportes. Ingeniería Industrial 4º Curso. Universidad Carlos III de Madrid.
9. Apuntes de la asignatura Ingeniería estructural de 4º curso de Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.
10. Apuntes de la asignatura de Simulación de Flujos Industriales con Ordenador. Ingeniería Industrial 5º Curso. Universidad Carlos III de Madrid.

También se han utilizado las siguientes páginas web:

11. Software de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones: www.sketchup.com 2015.
12. Base de datos para la construcción, con el precio de más de 14000 precios unitarios sobre la construcción: www.preoc.es 2015.
13. Web dedicada al mundo de la construcción, arquitectura e ingeniería: www.construmatica.com 2015.
14. ArcelorMittal: líder mundial en la industria siderúrgica. Prontuario de perfiles de acero normalizados: sections.arcelormittal.com 2015.
15. Guía de soluciones técnicas en madera laminada www.finnforest.com 2015
16. Prodema: Productos de madera: www.prodema.com 2015
17. Empresa dedicada a la distribución y venta de una amplia gama de materiales para la construcción y decoración con madera: www.bricomarkt.com 2015.

18. Walltopia: líder mundial en la producción de rocódromos: www.walltopia.com 2015.
19. Entre-prises: Empresa especializada en la producción de rocódromos y presas: www.entre-prises.com 2015.
20. Top30: Empresa española especializada en la producción de rocódromos y presas: www.top30.es 2015.
21. HRT: Empresa especializada en la producción de presas de escalada: hrt-holds.com 2015.
22. S4C: Empresa especializada en la producción de presas de escalada: www.surfacesforclimbing.com 2015.
23. IFSC: Federación Internacional de Escalada Deportiva: www.ifsc-climbing.org 2015.
24. Especialistas en el transformado de espuma de poliuretano en todas sus formas, medidas y densidades: www.espumaencasa.es 2015.