



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Técnicas de intervención en rehabilitación
estructural de vigas y forjados, y comprobación
mediante Método de Elementos Finitos

Autor/es

Marco José Rodrigo Artigas

Director/es

Begoña Genua Díaz de Tuesta
José Cegoñino Banzo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014-2015

Técnicas de intervención en rehabilitación estructural de vigas y forjados, y comprobación mediante Método de Elementos Finitos

RESUMEN

Iniciamos el estudio con un acercamiento al estado actual de la rehabilitación, estudiando lo que se entiende por rehabilitar y los cambios acerca del concepto de monumento. Continuamos viendo la necesidad que existe en la actualidad de recuperar estos elementos propios de tiempos anteriores, para acabar con las exigencias a las que tienen que adecuarse. Así, explicaremos la relación que tienen con la normativa existente, así como las posibles implicaciones derivadas de un cambio en el programa de necesidades.

Posteriormente, abordaremos las distintas técnicas de intervención existentes para la rehabilitación de elementos estructurales horizontales, aspecto en el que nos centraremos. Estudiaremos las causas que hacen necesarias estas actuaciones para explicar luego en detalle su aplicación sobre vigas y forjados.

Finalmente, plantearemos una metodología de cálculo mediante I-DEAS, programa que sigue el Método de Elementos Finitos. Para conseguirlo, modelizaremos una serie de hipotéticos casos con los que estableceremos conclusiones acerca de la solución más conveniente.

Con todo ello, conseguiremos aunar un enfoque patrimonial, constructivo y estructural que nos permita abordar con mayor garantía proyectos de estas características.

PALABRAS CLAVE

Arquitectura - Construcción - Ingeniería - Rehabilitación estructural
Patrimonio - Monumentos - Vigas - Forjados - Método de Elementos Finitos



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. METODOLOGÍA.....	3
3. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN.....	4
3.1. Acerca de los distintos conceptos	
3.1.1. "Rehabilitación"	
3.1.2. "Monumento"	
3.2. Necesidad de rehabilitar en el contexto actual	
3.3. Relación con la normativa existente	
3.4. Acerca del cambio de uso	
4. TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN EN REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL.....	13
4.1. Delimitación del tema	
4.2. Causas que hacen necesaria la rehabilitación estructural	
4.3. Aplicación a vigas	
4.3.1. Renovación material de una viga	
4.3.2. Mejora capacidad resistente mediante elementos añadidos	
4.3.3. Conversión en una viga mixta	
4.3.4. Técnicas de postesado	
4.4. Aplicación a forjados	
4.4.1. Aspectos previos a tener en cuenta	
4.4.2. Renovación material de un forjado o de un tramo del mismo	
4.4.3. Apertura de huecos en un forjado existente	
4.4.4. Mejora capacidad resistente mediante elementos añadidos	
4.4.5. Refuerzo mediante capa de compresión con conectores	
5. CASOS DE ESTUDIO MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
5.1. Geometrías utilizadas en la modelización	
5.2. Materiales, condiciones de contorno e hipótesis de cargas	
5.3. Comparativa de los resultados obtenidos	
6. CONCLUSIONES.....	29
7. BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXOS.....	31
I. Proceso de modelización mediante I-DEAS	
II. Conjunto de valores obtenidos en el cálculo	
III. Mapas de tensiones y deformaciones en cada caso de estudio	

1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo de Fin de Grado surge de la inquietud del alumno acerca de un tema tan presente en nuestros días como es la rehabilitación. No cabe duda que dado el contexto económico en el que nos encontramos, la necesidad de recuperar y volver a dar uso a ciertos edificios es una realidad difícil de cuestionar.

Ya no son sólo aspectos ligados al cambio en la mentalidad del sector de la construcción, con un ritmo que a la larga se ha visto insostenible, sino que además ahora entran en escena valores relacionados con el medio ambiente, la recuperación de los centros degradados de las ciudades o el mero hecho del valor diferencial que aporta un edificio con años de historia para aquel que lo ocupa. Son simplemente algunos de los muchos ejemplos que justifican este giro en el modo en el que vemos las cosas, con una vuelta hacia la consideración del pasado como algo que puede tener una segunda oportunidad.

En este sentido, nos gustaría abordar este tema desde tres puntos de vista diferenciados entre sí, pero que a su vez se complementan y ayudan a la buena realización de un proyecto de rehabilitación. De este modo, vamos a tener en cuenta a lo largo del trabajo aspectos patrimoniales, constructivos y de carácter estructural. Así, veremos como estos distintos enfoques aparecen y desaparecen a lo largo del discurso, muchas veces complementándose y enriqueciéndose para llevar a cabo una solución que sea la más correcta posible en la rehabilitación.

Entendemos con ello que al encontrarnos en la EINA (Escuela de Ingeniería y Arquitectura), debemos aprovechar todas las oportunidades y sinergias propias de ambas ramas del conocimiento, como una manera de ampliar la formación del alumno en cuanto aprovecha las herramientas que le proporcionan éstas. Con ello, el aspecto patrimonial sería resuelto mediante la arquitectura, la ingeniería otorgaría herramientas para el cálculo estructural, mientras que los planteamientos de carácter constructivo serían un poco el nexo de unión entre las disciplinas.

Así, en primer lugar conviene ponernos al día sobre qué es la rehabilitación y cómo se han visto los monumentos a lo largo de la historia. Vamos a ver la necesidad de conservar todo aquello que nos aporta un carácter documental, arquitectónico y significativo, de modo que al final conlleve un beneficio para el conjunto de la sociedad. También veremos la relación de una obra de rehabilitación con la normativa existente, en relación a los requerimientos y exigencias respecto a la obra nueva, lo que muchas veces ocasiona incompatibilidades y contradicciones. Por último haremos referencia al aspecto del cambio de uso, que es el que muchas veces hace necesaria esta rehabilitación estructural.

Posteriormente vamos a analizar una serie de técnicas intervención, en concreto para elementos estructurales horizontales como son las vigas y los forjados, cuya elección justificamos más adelante. En toda actuación hay una serie de fases sucesivas: el conocimiento del conjunto, la reflexión previa (¿Qué hacer?) y la propia intervención (¿Cómo hacerlo?). Así, el conocimiento y la reflexión nos van a permitir adecuar los medios y los fines a las circunstancias de cada caso concreto. Por el contrario, las distintas intervenciones en vigas y forjados dependerán de aspectos como el material, las patologías o los elementos en los que se interviene.

Finalmente, estableceremos unos casos de estudio de distintas técnicas de intervención, cuyo cálculo mediante el Método de Elementos Finitos y posterior comparativa nos va a permitir obtener unas conclusiones para el trabajo.

2. METODOLOGÍA

Como ya hemos visto, vamos a hacer uso del Método de Elementos Finitos para poder analizar las distintas técnicas de intervención. Para ello utilizamos el programa de cálculo I-DEAS, cuyo proceso de modelización explicamos en el Anexo I.

Conviene decir antes de nada que en el presente trabajo se plantea un modo de proceder ante estos casos, una serie de pasos que nos van a permitir comprobar el funcionamiento estructural de los distintos elementos que queramos analizar. Con ello, debemos tener en cuenta que cada intervención es distinta del resto, debiendo realizarse ante cada proyecto una evaluación y estudio previo de su estado de conservación.

Entendemos así que al tratarse de edificaciones a rehabilitar, en muchos de los casos aspectos como la capacidad resistente o los distintos enlaces entre los elementos existentes han evolucionado a lo largo del tiempo, por lo que habría que tener en cuenta estas variaciones si se dieran. No es lo mismo un edificio de obra nueva, que el realizar intervenciones sobre proyectos ideados desde el principio con un planteamiento estructural muy distinto al actual. Con ello nos gustaría remarcar que en la medida de lo posible es aconsejable seguir el planteamiento estructural original, aspecto que veremos más adelante. En caso contrario, deberemos ver las consecuencias en cuanto a funcionamiento del conjunto que implica cualquier cambio en el mismo.

Ya en nuestros casos de estudio, hemos planteado unas geometrías concretas, que podrían haber sido cualquier otras ya que lo que nos interesa del proceso es la comparativa entre los mismo. Así, partimos de una estructura original con un estado de cargas que se verá aumentado con un hipotético cambio de uso. Vamos a ver así con el cálculo los efectos que esta redistribución tiene sobre la estructura, estudiando las tensiones y las deformaciones en el conjunto de la estructura por un lado, y en cada uno de los elementos por otro. El mismo procedimiento seguiremos con distintas técnicas de rehabilitación, para observar el efecto que provocan.

Siguiendo este planteamiento, los materiales que utilizamos tienen unas determinadas propiedades en el orden de magnitud habitual, aunque como ya hemos comentado, luego en cada caso concreto los valores de los mismos cambian, por lo que sirven únicamente para la obtención de conclusiones.

Con ello, vamos a poder evaluar la idoneidad de cada una de las estrategias que hemos planteado en nuestros casos, pero entendiendo desde el principio que para otras geometrías, materiales, condiciones de contorno o cargas, estas conclusiones serían totalmente distintas. Estableceremos así comparativas teniendo en cuenta el funcionamiento estructural (tensiones y deformaciones), la viabilidad económica (mediante la cantidad de material necesario) y los planteamientos constructivos.

Finalmente, y siguiendo el discurso del trabajo, incorporaremos el punto de vista arquitectónico en cuanto a la coherencia de las soluciones en relación a la conservación del edificio. Entendemos así que en algunos casos se puede dar la circunstancia de que aquellas intervenciones que trabajen mejor estructuralmente pueden ser incompatibles con la conservación de los valores patrimoniales intrínsecos al lugar de intervención.

3. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN

3.1 Acerca de los distintos conceptos

3.1.1 "Rehabilitación"

Antes de comenzar con el desarrollo del trabajo, conviene ver cómo ha ido evolucionando lo que se entiende por rehabilitar a lo largo de la historia. De este modo, tradicionalmente han existido dos corrientes enfrentadas desarrolladas a lo largo del siglo XIX y que vamos a proceder a explicar.

Por un lado, tenemos el pensamiento desarrollado por el arquitecto francés Viollet le Duc (1814-1879) que persigue el edificio ideal y unitario en todos sus aspectos, es decir, dejando de lado las transformaciones que éste ha podido sufrir a lo largo de su historia para conseguir una obra que alcance la perfección. Así, obvia los hechos arquitectónicos añadidos con el paso del tiempo, para obtener un monumento reconstruido tal y como podía haber llegado a ser en una situación idealizada. Siguiendo esta unificación del conjunto edificado, aboga por adaptar el edificio a sus nuevos usos, con lo que ello implica en cuanto a instalaciones y exigencias.

Sin embargo, al contrario de lo que inicialmente pueda parecer, esta negación del pasado de cada obra arquitectónica con el objetivo de conseguir un proyecto unitario, implica que todas las nuevas actuaciones sean en cierto modo dependientes de la creatividad y maestría de su autor. Este ejercicio de negar la propia época durante la cual se realiza la rehabilitación supone acercarse a planteamientos historicistas, en cuanto se plantean intervenciones propias de una manera de pensar y de construir anteriores.

En el extremo opuesto encontramos al sociólogo inglés John Ruskin (1819-1900), que admiraba los oficios artesanos como los verdaderos creadores de la belleza. Veía de este modo que sólo la mano del hombre, escenificada en los detalles individuales y en las pequeñas irregularidades de cada obra, podía alcanzar el ideal utópico que perseguía. Rechaza por tanto el orden artificial fruto de la revolución industrial y que amenazaba seriamente las artes propias de la Edad Media que él tanto admiraba.

Por tanto, si la reconstrucción de un monumento suponía una mentira en cuanto a la negación de este trabajo artesano anterior, debían ser las ruinas las que ofreciesen veracidad del mismo. Por tanto, era partidario de una mínima intervención en los monumentos, de tal modo que la arquitectura pasa a ser un mero icono, como contemplación de la obra y recuerdo del pasado que fue. Se podría con todo ello extraer el mensaje de que *"si la mixtificación histórica o la obra descualificada son las alternativas, la ruina y la sustitución son preferibles"*¹.

Nos encontramos así con dos corrientes que van desde lo que la obra "pudo haber sido" hasta lo que "simplemente fue". De este modo, arquitectos como el italiano Camillo Boito (1836-1914) plantean metodologías intermedias. Se conciben así intervenciones de menor entidad que las reconstrucciones de Viollet le Duc, de tal modo que las nuevas actuaciones no se camuflen con el edificio original. Además, ve necesarias estas consolidaciones mínimas para el mantenimiento de los monumentos.

A partir de este momento, la manera de proceder de las diversas corrientes se englobará entre estos límites, de tal modo que ni la obra icónica de arquitectura

¹ GONZÁLEZ CAPITEL, Antón. "El tapiz de Penélope" en *Arquitectura*, 244, p. 24-34. Madrid, 1983.

prevalecerá sobre su historia y contexto urbano, ni ocurrirá que el respeto al pasado del monumento impida una actuación de mínimos o consolidación del mismo.

Sin embargo, el marcar una diferencia entre lo original y las nuevas intervenciones de rehabilitación, hace que una parte de la arquitectura moderna aproveche tal directriz de modo equivocado, pero de acuerdo a sus intereses de evolución con respecto a la historia anterior. Así, se fuerza la ruptura de la armonía existente entre lo nuevo y lo antiguo, tanto en términos técnicos como conceptuales.

Volvemos a ver que entre el mimetismo con el monumento y el planteamiento de "parches" hay un amplio rango de maneras de proceder a la hora de rehabilitar. Se pretende conseguir así guiños a la historia que, sin ser mera copia directa de lo existente, sí que se maclen con la obra original existente de una manera adecuada, sin necesidad de que aparezcan resultados carentes de sentido común.

De este modo, todas las acciones deberían tener en cuenta los distintos criterios existentes a lo largo de la historia, reflexionando acerca de todas las enseñanzas que éstos nos otorgan y sin necesidad de verlos como incompatibles. Debería ser una manera de proceder que, tal y como nos dice Capitel en el artículo antes citado, *"sepa distinguir recursos y establecer diferencias, equilibrando en cada caso la mentalidad conservadora y la operativa, y distinguiendo la oportunidad y calidad de las intervenciones"*.

Con todo ello vemos que la rehabilitación va a suponer siempre un equilibrio entre la necesaria actuación de mantenimiento y la propia aportación del arquitecto, variando en cada uno de los planteamientos vistos anteriormente la relación entre estos aspectos. En este sentido, deberá existir también una adecuada coherencia entre el nuevo destino previsto para el edificio y la conservación del mismo, evitando que aparezcan cuestiones incompatibles entre ambos.

Es labor por tanto del arquitecto el saber emplear las técnicas y métodos disponibles en su época para poder continuar dándole una nueva vida al edificio, pero entendiendo por otro lado que éste se ha configurado a raíz de sucesivas intervenciones de rehabilitación que lo han terminado de configurar tal y como es.

Así, esta rehabilitación aportará dos valores al edificio. Por una lado un valor económico como soporte para una nueva implantación en el mismo, mayor aún cuando permite aportar una situación privilegiada en la ciudad en el caso de edificios antiguos. Por otro lado un valor arquitectónico como garantía de transmisión del pasado que atesora, historia viva del lugar y de la que todavía podemos seguir aprendiendo.

3.1.2 "Monumento"

Como acabamos de ver, Viollet le Duc concebía la obra arquitectónica como un hecho aislado al que contemplar, desprovisto de la relación con el pasado que lo configura y lo modifica poco a poco. Se entiende así como un objeto exento del contexto urbano que le rodea y sin función asignada dentro de la ciudad.

Se producirá un rechazo contra este planteamiento de aislar progresivamente al monumento, de tal modo que se vuelve a valorar a todo aquello que rodea al edificio, entendiendo que lo contrario sería dar una visión falseada del mismo al no existir relación con las construcciones que lo rodean. Vuelve a tener importancia el conjunto urbano, entendido como una suma de monumentos que dan valor a las ciudades existentes.

En este sentido, surge el problema del mal entendimiento de los centros históricos como hechos diferenciados de los nuevos desarrollos, cuyo intento de resolución terminaba en muchas ocasiones con actuaciones "escenográficas", que sólo tenían en cuenta la apariencia exterior de las mismas sin un análisis urbano previo. Este último aspecto será estudiado por Aldo Rossi (1931-1997), al incorporar el monumento como una "tipología" propia de la ciudad y estableciendo una estructura que la configura a través de los propios monumentos.

Sin embargo, a este concepto de "tipo" como algo que se ha demostrado que funciona en un determinado ambiente, se impondrán los grados de protección presentes en muchas de las ciudades actuales, en los que únicamente se valora la imagen de la fachada exterior original para proceder a un vaciado del interior. Con ello, la obra antigua actúa únicamente de contenedor, para un contenido que raramente tiene relación con el primero y que constituye un error conceptual.

Respecto al monumento en sí, tradicionalmente han existido dos mentalidades contrapuestas en relación al objeto, entendido como la relación directa entre una idea y los requerimientos materiales para llevarla a cabo. Por un lado, sociedades como la japonesa planteaban construcciones con materiales orgánicos con un horizonte temporal corto. Esto era debido a que valoraban más el símbolo que el propio elemento tangible, por lo que era habitual en la rehabilitación de edificaciones la sustitución periódica de elementos dañados por otros nuevos. Por otro lado, en aquellos lugares en los que se utilizaba la piedra o el ladrillo, las construcciones permanecen a lo largo del tiempo, creciendo y transformándose para adaptarse, pero manteniendo siempre la esencia del monumento original.

Cabe plantearse así la autenticidad en aquellas intervenciones en las que se mantiene el aspecto y la forma del elemento original, pero se modifica su sistema constructivo para adaptarse a las nuevas técnicas. Enfrentamos así una visión histórica que hace referencia al respeto constructivo con la materia original, y una visión estética cuya forma es sólo apariencia.

Con todo ello, no le falta razón a la frase de que *"la restauración arquitectónica ya no es solo un problema exclusivamente filológico o técnico, sino que además de estas variables, otras como la complejidad de la arquitectura, de su uso, de su finalidad social y de todos los matices que acompañan a su significado, deben ser tenidas en cuenta"*².

² PÉREZ ARROYO, SALVADOR. "Restauo: nuevos problemas, nuevas oportunidades en un low-cost world" en *Informes de la Construcción*, Vol. 64, p. 35-43. Madrid, 2012.

3.2 Necesidad de rehabilitar en el contexto actual

No cabe duda de que está a la orden del día el intervenir sobre la ciudad consolidada, estando la arquitectura cada vez más relacionada con estudios históricos y técnicas de rehabilitación. Así, grandes remodelaciones urbanas, características de otras épocas, han dado paso a la reutilización de los viejos soportes, evitando con ello su destrucción y poniéndolos en valor para la sociedad.

Se evita por un lado la especulación derivada de la nueva construcción, a la vez que se conserva el patrimonio existente, que de otro modo sería una cuestión difícil de abordar al no tener un uso dedicado que permitiese su mantenimiento. Vemos así que no sólo responde a aspectos económicos como cabría pensar en un principio, sino que esta recuperación de las construcciones del pasado responde también a cuestiones sociales y culturales.

Así, como consecuencia del momento de cambio que hemos vivido, la intervención en edificios que forman parte de nuestro patrimonio ha sido impulsada tanto desde el sector público como desde el privado.

Desde la administración, se han tenido en cuenta diversos aspectos para potenciar la rehabilitación. En primer lugar es una manera de potenciar la historia colectiva de cara a la sociedad, como una manera de identificarse con el pasado. Por otro lado, son innegables las ventajas económicas derivadas de esta reutilización, evitando nuevas construcciones que en ocasiones se han visto innecesarias y fruto de errores pasados. Finalmente, y cada vez más, aparecen aspectos relacionados con la sostenibilidad, tanto de respeto al medio ambiente como de recuperación de estructuras urbanas.

Respecto a las compañías privadas, cada vez son más las que ocupan y hacen uso de edificios históricos, con las ventajas antes mencionadas que ello implica, además de la plusvalía que la situación y hecho diferenciador de estas construcciones llega a generar para sus usuarios.

En cuanto a la situación en España, tradicionalmente había existido una falta de consideración hacia la rehabilitación de monumentos, siendo las únicas intervenciones las consistentes en añadir nuevas arquitecturas o mejorar su funcionalidad. Sin embargo, con el paso de los años se revalorizará el patrimonio edificado, aunque sin un método ni condiciones claras para llevar a cabo estas intervenciones. En este sentido, convendrá buscar en proceso en el que cada uno de los distintos profesionales que interviniesen pudiese desarrollar su papel con eficacia.

Siguiendo esta línea, el arquitecto Antoni González Moreno-Navarro plantea, como hicieron otros muchos arquitectos, una metodología que nos gustaría explicar. Así, establece una serie de protocolos basados en la interdisciplinariedad de las distintas profesiones en el ámbito de la restauración, con el objetivo de que la suma de todas ellas mejore la actuación. Lo que él denomina "Restauración objetiva" se fundamenta a través de cinco fases sucesivas: el análisis previo, el planteamiento de los objetivos, la propia intervención, la ejecución material y la posterior difusión del proceso seguido.

Para el autor, cuenta más el monumento en sí que el modo de proyectar del que lo restaura, lo que supone una declaración de intenciones. Entendiendo el objeto desde sus dimensiones histórica, arquitectónica y significativa, podemos ya plantear la rehabilitación de manera científica, técnica y creativa.

Como documento histórico hace referencia al monumento que contiene una información y testimonio del tiempo pasado, y cuya lectura nos va a permitir plantear de mejor manera el proceso. Del mismo modo, posee un valor testimonial cuya conservación garantiza la transmisión de estos aspectos de cara al futuro.

Desde el punto de vista de objeto arquitectónico, implica una función para la sociedad. Esto quiere decir que es fruto de continuas transformaciones prolongadas a lo largo del tiempo, que lo configuran tal y como es en cada instante. Con ello, se va adaptando en relación a los usos que acoge en cada época.

Finalmente, la dimensión significativa hará referencia a la capacidad que tiene el monumento a aportar unos valores esenciales más allá de la materialidad que lo compone, es decir, superando los diversos cambios que se sucedan en el mismo.

A raíz de planteamientos similares a finales del S.XX, se produce en nuestro país un importante cambio de mentalidad, con el único objetivo de mejorar la manera con la que nos enfrentamos a cualquier proyecto de estas características. Sin embargo, no conviene caer en el error de confundir esta colaboración interprofesional con la mera suma de actores que no generen beneficios aparte del interés personal de cada uno.

Volviendo ya a la actualidad, no podemos dejar de lado una metodología a la hora de proceder, ya que existe el peligro de plantear actuaciones que resulten más perjudiciales que beneficiosas para el monumento. Ante un periodo de crisis económica, es preferible hacer un mantenimiento mínimo del patrimonio que realizar técnicas sin un trabajo previo de documentación que garanticen su buen desarrollo.

Por otro lado, conviene ser cauteloso con los avances en la técnica de los que disponemos en la actualidad respecto a las labores de rehabilitación. No conviene olvidar que la mala interpretación de datos científicos puede conllevar una mala intervención, con el perjuicio que eso supone para la sociedad. Como ya hemos dicho, el sustituir la realidad por un modelo conviene realizarse de manera cuidadosa para poder obtener unas conclusiones fiables.

Vemos así los posibles problemas que pueden surgir en la actualidad y que conviene recordar ante el impulso en el sector de la rehabilitación que estamos viviendo. De este modo, únicamente con el planteamiento de los objetivos desde el principio y la utilización de todos los medios disponibles para alcanzarlos va a hacer posible una intervención eficaz en todos los aspectos.

3.3 Relación con la normativa existente

La cuestión clave a plantearse es hasta qué punto es posible exigirle a un proceso de rehabilitación que cumpla con la normativa que se aplica a proyectos de obra nueva. Así, es complicado saber si se pueden alcanzar las mismas prestaciones cuando se actúa sobre edificios planeados y construidos hace cientos de años en algunas ocasiones.

Es sabido inicialmente que en estos procesos, el intentar dar respuesta a alguna demanda puede ocasionar graves perjuicios en cualquier otra. Así mismo, el cumplimiento al pie de la letra de los documentos del CTE puede por un lado ocasionar cargas económicas no admisibles, y por otro presentar contradicciones respecto a la protección patrimonial del monumento. Así, en lo relativo al Ámbito de aplicación dice lo siguiente:

“Igualmente, el Código Técnico de la Edificación se aplicará también a intervenciones en los edificios existentes y su cumplimiento se justificará en el proyecto o en una memoria suscrita por técnico competente, junto a la solicitud de licencia o de autorización administrativa para las obras. En caso de que la exigencia de licencia o autorización previa sea sustituida por la de declaración responsable o comunicación previa, de conformidad con lo establecido en la normativa vigente, se deberá manifestar explícitamente que se está en posesión del correspondiente proyecto o memoria justificativa, según proceda.

Cuando la aplicación del Código Técnico de la Edificación no sea urbanística, técnica o económicamente viable o, en su caso, sea incompatible con la naturaleza de la intervención o con el grado de protección del edificio, se podrán aplicar, bajo el criterio y responsabilidad del proyectista o, en su caso, del técnico que suscriba la memoria, aquellas soluciones que permitan el mayor grado posible de adecuación efectiva.

La posible inviabilidad o incompatibilidad de aplicación o las limitaciones derivadas de razones técnicas, económicas o urbanísticas se justificarán en el proyecto o en la memoria, según corresponda, y bajo la responsabilidad y el criterio respectivo del proyectista o del técnico competente que suscriba la memoria. En la documentación final de la obra deberá quedar constancia del nivel de prestación alcanzado y de los condicionantes de uso y mantenimiento del edificio, si existen, que puedan ser necesarios como consecuencia del grado final de adecuación efectiva alcanzado y que deban ser tenidos en cuenta por los propietarios y usuarios.

En las intervenciones en los edificios existentes no se podrán reducir las condiciones preexistentes relacionadas con las exigencias básicas, cuando dichas condiciones sean menos exigentes que las establecidas en los documentos básicos del Código Técnico de la Edificación, salvo que en éstos se establezca un criterio distinto. Las que sean más exigentes, únicamente podrán reducirse hasta los niveles de exigencia que establecen los documentos básicos”³.

Vemos así una cierta ambigüedad en cuanto a los parámetros requeridos, en cuanto se habla del grado de adecuación bajo criterio del proyectista. En cuanto al asunto de posibles incompatibilidades, se habla de justificarlas y establecer los niveles alcanzados, siempre y cuando no se reduzcan los del edificio original, con la excepción de que esta reducción cumpla con los marcados por el CTE.

³ Artículo 2 del Capítulo 1. Parte I del CTE. 2013.

En cuanto al DB SE, que es el que nos interesa para la rehabilitación estructural de vigas y forjados, plantea una serie de consideraciones previas en la evaluación estructural de edificios existentes:

“No es adecuada la utilización directa de las normas y reglas establecidas en este CTE en la evaluación estructural de edificios existentes, construidos en base a reglas anteriores a las actuales para los edificios de nueva construcción, por los siguientes motivos:

c) toda evaluación debe realizarse teniendo en cuenta las características y las condiciones reales del edificio (lo que normalmente no está contemplado en las normas de dimensionado que incorporan la incertidumbre asociada al proceso);

d) las normas actuales suelen estar basadas en exigencias diferentes y generalmente más estrictas que las vigentes en el momento en que se proyectó el edificio, por lo cual, muchos edificios existentes se clasificarían como no fiables si se evaluaran según las normas actuales;

e) se puede considerar, en muchos casos, un período de servicio reducido, lo que se traduce también en una reducción de las exigencias;

f) se pueden emplear modelos de análisis más afinados (a través inspecciones, ensayos, mediciones in situ o consideraciones teóricas), lo que puede aportar beneficios adicionales”⁴.

Con ello, se hace referencia a la merma de capacidad resistente del edificio con el paso del tiempo, así como a condiciones más permisivas en el momento de su construcción. Por tanto, se hace imposible el cumplimiento de las exigencias contempladas para obra nueva. Así, esta mejora planteada con la rehabilitación debería ser más permisiva y coherente con el estado original, adecuada a cada obra concreta y con la existencia de unos mínimos de seguridad para su futuro uso previsto.

Esta especificad implica, no obstante, que sea muy complicado el establecer niveles de exigencia homogéneos que sean aplicables en todos los casos, ya que pueden dejar de ser viables en algunos de ellos en perjuicio de su mejora. Así, al contrario que en obra nueva, aparece aquí el concepto de flexibilidad ligado al estado del edificio original y al tipo de intervención. Condicionantes como el valor patrimonial del edificio o las posibilidades técnicas y funcionales vuelven a entrar en juego para la definición de estos posibles límites.

Finalmente, en cuanto al tipo de intervención, la normativa contempla tres casos distintos. Para las ampliaciones, la parte añadida deberá de cumplir las exigencias como si se tratase de una obra nueva, con los necesarios cambios que ello pueda conllevar en la parte existente. Respecto al cambio de uso, se pueden admitir situaciones en las que no se alcance el requisito, siempre y cuando se pase a una menos exigente que la original. Finalmente, para las reformas se tiene en cuenta en nivel de intervención, de tal modo que el cumplimiento se exige para aquellas cuya contribución sea alta respecto al conjunto del edificio.

Además, conviene recordar que se contempla la presencia de soluciones tradicionales sancionadas por la práctica, no contempladas en la normativa y que hayan demostrado ser igualmente válidas ante el cumplimiento de determinadas exigencias.

⁴ Anejo D del DB SE. Parte II del CTE. 2009.

3.4 Acerca del cambio de uso

El término "rehabilitar", como ya hemos visto hace referencia a dar una nueva vida a edificios que no la tenían. Por tanto, un sinónimo muy acertado para esta acepción sería el de "revitalizar". Será una herramienta para otorgar a un centro histórico o a un edificio en concreto la oportunidad de volver a albergar un programa, el mismo que originalmente si el problema es sólo de adecuación a la normativa y mantenimiento, u otro distinto para los habituales cambios de uso en construcciones históricas. Aparece de este modo un programa asignado, una función compatible que les dota de vida en los nuevos tiempos.

En relación a este aspecto, el CTE dice que *"En todo cambio de uso característico de un edificio existente se deberán cumplir las exigencias básicas del CTE. Cuando un cambio de uso afecte únicamente a parte de un edificio o de un establecimiento, se cumplirán dichas exigencias en los términos en que se establece en los Documentos Básicos del CTE"*⁵.

Generalmente, la rehabilitación estructural que implica un cambio de uso se debe al aumento de cargas asociadas al mismo, valores que se especifican en la tabla 3.1 del DB SE-AE (Acciones en la Edificación). Así, en muchos de los casos de rehabilitación de monumentos la categoría de uso nueva es de Zona de acceso al público, con la mayor exigencia en cuanto a cargas que ello conlleva.

Será importante plantear un equilibrio entre estas actuaciones y la obra nueva, debido a que en ocasiones el valor del edificio original o las dificultades técnicas hacen inviable su recuperación. Conviene recordar que este nuevo uso generará un nuevo conjunto de requisitos en las normativas relativas tanto a la seguridad (estructura, incendios...), habitabilidad e instalaciones necesarias, que no siempre van a ser compatibles con un edificio existente de ciertas características.

Por otro lado, en cuanto nos metemos de lleno en la labor de adaptar el programa de necesidades anterior al nuevo, suele ser habitual la existencia en el conjunto edificado de partes con una calidad y estado constructivo muy diferenciado. De este modo, es posible diferenciar en ocasiones distintas zonas para el reparto de los nuevos usos previstos tras la rehabilitación.

En este sentido, en las partes más nobles del conjunto se suelen disponer usos cuyas características puedan poner en valor el sistema constructivo y la calidad espacial del edificio original. Por el contrario, la parte del programa con un carácter servidor se puede localizar en estancias de menor valor patrimonial y que a su vez puedan ser objeto de una rehabilitación más profunda para acometer su objetivo. Se consigue con ello una adecuación al monumento entendido en su conjunto tanto desde el punto de vista de la rehabilitación estructural como desde la reflexión previa de la propia intervención.

Aparece también a la hora de valorar el edificio existente la problemática de valorar todos los testimonios históricos que han tenido lugar durante la vida del monumento, o simplemente poner énfasis en aquellos cuya calidad arquitectónica se eleve por encima del resto. La solución pasaría en todo caso por mantener siempre aquellos que permitan un sistema de relaciones con el nuevo uso.

En cuanto a las partes ya degradadas, se establecerán nuevas relaciones que no tuvieron por qué existir en la concepción original del conjunto. Conseguimos con ello resolver el programa adecuándonos en la medida de lo posible a las preexistencias.

⁵ Artículo 2 del Capítulo 1. Parte I del CTE. 2013.

Nos parece interesante también citar lo que dice Annuncio al respecto:

“La diferencia entre una ruina bella y un edificio está en que aquella ha perdido sus pretéritos sistemas de relaciones que le daban sentido arquitectónico. Su nueva belleza tiene más que ver con la belleza de la naturaleza, o de la escultura, como un elemento capaz de cualificar un determinado lugar.

Pero la grandeza de edificios como el que nos ocupa está en que las relaciones implícitas en su arquitectura, son, aún, susceptibles de mantenerse y de ponerse en valor. Siguen teniendo capacidad para cualificar un espacio urbano y tienen capacidad para responder a nuevos requerimientos. Se trataría por tanto de utilizar aquellos elementos de su arquitectura que, por encima de su valoración estilística, son capaces de continuar cualificándola, al margen de su adscripción a tal o cual momento de la historia”⁶.

En cuanto a la relación de estos cambios de uso con las figuras de protección integral, estructural y ambiental, encontramos una gran heterogeneidad en los aspectos a los que hace referencia la catalogación de los edificios, debida normalmente a la infinidad de casuísticas existentes. Como ya hemos visto anteriormente, es habitual el caso en el que se protege la fachada o la primera crujía de un monumento pero se da libertad a la edificabilidad en su interior, con las consiguientes contradicciones que surgen muchas veces entre la forma de relacionarse con la ciudad y las relaciones que suceden en el edificio. Es el caso de intervenciones tan conocidas como el Caixaforum de Madrid, antigua central eléctrica reconvertida en museo por Herzog & de Meuron, o la Alhóndiga de Bilbao, obra de Ricardo Bastida y reformada por Philippe Starck para transformarse en un centro de ocio y cultura.

Por tanto, siempre y cuando la ciudad los demande, parece lógico el plantear un programa de necesidades compatible con los edificios existentes en la misma, y compatible con las intervenciones de rehabilitación a realizar. En el caso de usos residenciales, aparece el problema de los avances de confort que proporcionan las viviendas nuevas, además de que muchas veces la tipología de los edificios antiguos no se adapta a las necesidades del mercado. Sin embargo, pueden aparecer usos terciarios compatibles que aprovechen estos monumentos. En cuanto a usos más singulares, a priori más adecuados para su ocupación, es importante la realización de estudios previos para relacionar de la mejor manera el nuevo uso con la preservación tanto de la fachada como del planteamiento interior original. Conseguiremos con ello un edificio unitario en su conjunto, para evitar incoherencias propias de una rehabilitación sin haber entendido la historia y la evolución de cada obra.

La solución pasaría por la integración desde el principio de todos los agentes que intervienen en el proceso, teniendo claro los objetivos a conseguir con la intervención, para posteriormente aplicar todos los medios y técnicas de los que dispongamos, en aras de un buen resultado. Sólo así lograremos dar una segunda oportunidad al edificio, integrado en la ciudad, y con una función compatible con sus requerimientos de conservación.

⁶ ARNUNCIÓ PASTOR, JUAN CARLOS. “Aproximación metodológica a la intervención en el patrimonio arquitectónico en el medio urbano” en *El proyecto de restauración*. Madrid: Munilla-Lería, 2003.

4. TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN EN REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL

4.1. Delimitación del tema

A la hora de entender, explicar y analizar una serie de técnicas de rehabilitación estructural, nos hemos querido centrar en aquellas que trabajan a flexión, es decir, en las vigas y en los forjados. Esta reducción de los aspectos a estudiar creemos que es la mejor manera de poder sintetizar la información adquirida, a la vez que nos va a permitir profundizar más en una temática que, de otro modo, sería prácticamente imposible de abordar en un trabajo de estas características. A modo de guía, utilizaremos la clasificación de técnicas y los planteamientos constructivos que sigue el arquitecto Robert Brufau⁷.

Así, tradicionalmente las estructuras se han realizado mediante elementos que trabajaban a compresión, básicamente utilizando para ello materiales pétreos. A lo largo de la historia, se han sucedido las obras levantadas con muros de carga para posteriormente ir vaciándolos por medio del arco, que igualmente transmitía las presiones a lo largo de su directriz. Surgieron a partir de él las bóvedas y cúpulas como evolución de su traslación a lo largo de un eje o de su giro sobre sí mismo. Será ya con el descubrimiento de las escuadrías de madera cuando se puedan plantear los dinteles, como elementos horizontales que trabajan a flexión. A diferencia de la piedra, este material permitirá que una de sus caras pueda absorber las tracciones, dando con ello un impulso a la manera de edificar existente. Con el paso de los años, el descubrimiento de las vigas metálicas, con resistencias mucho mayores, permitirá hazañas nunca antes pensadas. Finalmente, la invención del hormigón armado, en el que el acero absorbe las tensiones y el hormigón la compresión, dará una vuelta más de tuerca a las nuevas estructuras basadas en el uso de pórticos.

Vemos con ello un gran campo en el que analizar las técnicas de rehabilitación, a la vez que un gran futuro en cuanto a que cada vez conseguimos vigas y forjados con luces superiores, menor canto y mayor capacidad de hacer frente a estados de carga exigentes. Con ello, de las vigas y viguetas tradicionales hemos pasado a elementos con aligeramientos incorporados, de tal modo que se reduce considerablemente su peso propio a igualdad de propiedades resistentes. En este sentido también hemos avanzado en el campo de la prefabricación, con el uso de placas de fácil colocación en obra y elevadas prestaciones. Finalmente, nos encontramos con una gran evolución en losas armadas reticulares que funcionan muy eficazmente en planteamientos ortogonales.

Volviendo a la rehabilitación estructural de estos elementos ya acotados, decir que habrá que tener en cuenta una serie de recomendaciones, puesto que cada una de las técnicas de intervención va a necesitar operaciones específicas para que se realicen de manera adecuada y se asegure su buen funcionamiento tras la ejecución. Una de ellas aboga por mantener las deformaciones originales, con el fin de no crear tensiones indeseables en el monumento durante el intento de eliminarlas. Otra de ellas sería observar si las deformaciones existentes al entrar el elemento rehabilitado en carga son coherentes con los cálculos realizados, o si por el contrario puede haber fallos conceptuales en el planteamiento de la estructura o modificaciones en los enlaces originales entre elementos.

⁷ BRUFAU I NIUBÓ, Robert. *Rehabilitar con acero*. Madrid: Publicaciones APTA, 2010.

4.2. Causas que hacen necesaria la rehabilitación estructural

Existen múltiples condicionantes que hacen necesario proceder a una rehabilitación, desde el momento en el que queremos dotar de una nueva vida a un edificio que se encuentra degradado o que simplemente queremos someter a una mejora. Vamos a tratar de clasificar estas causas en función de su origen para proceder a su explicación.

Cómo hemos podido ver en los apartados anteriores, en el momento en el que nos enfrentamos a cualquier actuación en un edificio histórico, uno de los primeros problemas con el que nos encontramos es la adaptación del mismo a la situación actual. Por un lado, a un proceso de este tipo suele acompañarle siempre un incremento de los estados de carga que actúan sobre los forjados, y en consecuencia sobre las vigas que los reciben. Estas cargas provienen del peso propio (PP) aportado por los refuerzos añadidos, del nuevo valor de sobrecarga de uso (SU) que implica cualquier cambio en el programa de necesidades, de la variación de la carga permanente (CP) ocasionada por los nuevos pavimentos y tabiques, y del añadido que pudiese ocasionar cualquier otro tipo de acción sobre estos elementos horizontales. Por otro lado, esta rehabilitación va a requerir un cumplimiento de la normativa, con mayor o menor grado de acercamiento tal y como hemos visto. Vamos a tener que hacer frente a estados de cargas más exigentes, con las implicaciones que ello va a tener en las tensiones y deformaciones de los elementos de nuestra estructura, aspecto que podremos observar más adelante con los casos analizados en el Capítulo 5. Además, deberemos poner atención a otras cuestiones como la estabilidad frente al fuego o a la seguridad ante los fenómenos de inestabilidad, poniendo atención a la aparición de abolladuras locales o posibles pandeos laterales a evitar.

En relación a este cambio en la función que albergará el edificio, suelen ser frecuentes cambios en su geometría para poder satisfacer los requerimientos programáticos. El desplazamiento de la posición en planta de ciertos pilares para la manipulación de áreas funcionales puede conllevar consigo una importante variación del esquema estructural de los elementos existentes, por lo que habría que evaluar este nuevo cambio y tomar las decisiones necesarias al respecto. Esto puede implicar modificaciones en las vigas como una alteración de su sección resistente o una eliminación de un forjado por ejemplo, técnicas de rehabilitación que podremos ver más adelante.

Finalmente, vamos a ver las causas que se hacen presentes en el monumento con el paso del tiempo. En primer lugar encontramos unas patologías vinculadas al estado del material, debidas a deficiencias del mismo o a ataques de agentes agresivos externos, y que minan su capacidad resistente. Hablamos de efectos de corrosión en los metales, ataques de humedad y hongos en la madera, defectos en las resinas de unión o posibles problemas de fisuración en el hormigón entre muchos otros. Otros aspectos que inciden en la conservación de la estructura son causas ajenas a la misma, como pueden ser asentamientos diferenciales en la cimentación provocados por el estado del terreno, sucesos accidentales a la vez que improbables y condiciones propias del ambiente que repercutan negativamente en los elementos constructivos del monumento. Finalmente, un aspecto que puede observarse a la larga es un cálculo previo incorrecto por parte del proyectista. Fallos en la disposición y cuantía de las armaduras pueden provocar grietas en las vigas, así como una falta de rigidez en los forjados desembocará en unas flechas excesivas.

4.3. Aplicación a vigas

4.3.1 Renovación material de una viga

En aquellas ocasiones en las que el elemento a rehabilitar se encuentre muy degradado o cuando sea materialmente imposible su rehabilitación, podemos proceder a sustituir funcionalmente dicha viga por otra equivalente en la misma posición. En este caso, debemos de tener mucho cuidado durante dicho proceso debido a las posibles situaciones no definitivas que acarreen peligro para el conjunto de la estructura, tanto referido a fenómenos de inestabilidad como a merma de resistencia.

Durante esta intervención, es muy importante mantener el funcionamiento original de los distintos elementos, conservando las condiciones constructivas existentes en los enlaces de la viga con los pilares y en el encuentro con los forjados. En caso contrario, evaluaremos las consecuencias que este cambio en el planteamiento tiene sobre la estructura.

Así, cabe la posibilidad de modificar la concepción de la misma, con el objetivo de aumentar su rigidez. Para ello, modificamos el tipo de enlace con los pilares, pasando de una estructura isostática (con enlaces articulados) a una estructura hiperestática (con enlaces rígidos). En este sentido, conviene tener en cuenta la redistribución de los momentos flectores a lo largo de nuestro pórtico, con el objetivo de evitar efectos no deseados.

Respecto al alcance de dicha intervención, veremos si afecta al global de la estructura o a elemento específico, poniendo de nuevo atención a planteamientos de vigas que trabajan en continuidad. Para ello, observaremos las causas de la degradación existente.

Finalmente, en relación a la tipología del refuerzo, podemos plantear una viga monomaterial o mixta, así como simple o compuesta. Actuaremos en función de la sollicitación que provoca el problema de resistencia o estabilidad para encontrar la tipología de refuerzo más adecuada en nuestro caso.

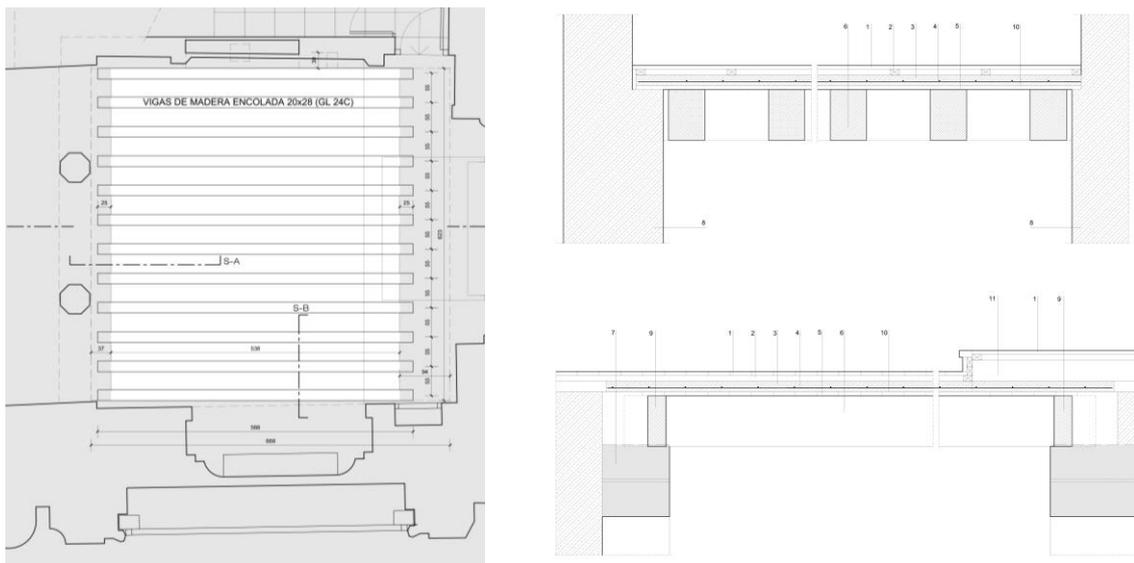


Figura 1: Intervención en la Parroquieta de la Seo (Pemán y Franco), en la que se sustituye el forjado de madera original.

Figura 2: Detalles constructivos de la solución adoptada, más resistente para soportar las cargas.

4.3.2 Mejora capacidad resistente mediante elementos añadidos

La adición de piezas acopladas a la viga es actualmente unas de las técnicas de rehabilitación más utilizadas en las distintas intervenciones, tanto por su relativa facilidad constructiva como por la lógica que aporta en la evaluación de la mejora en el funcionamiento estructural. Para ello, vamos a proceder a su explicación en función del material de la viga a mejorar.

Sobre vigas de acero actuamos en función del esfuerzo que predomina en nuestro elemento. Cuando queremos mejorar la capacidad ante un esfuerzo flector, la solución pasa por aumentar el valor del módulo resistente, es decir, conseguir una sección con mayor inercia, que en la práctica suele convertirse en una sección con canto mayor. Respecto al cortante, la respuesta pasa por aumentar el área de nuestro elemento. Cuando aparece el esfuerzo torsor, normalmente en perfiles abiertos, debemos hacer uso de pletinas para obtener perfiles cerrados, cuya respuesta a esta problemática es mucho mejor. Finalmente, deberemos localizar los refuerzos en aquellas partes donde se produzcan inestabilidades locales, en el alma y el ala comprimida para abolladuras, y en la mitad comprimida de la vida para evitar el pandeo lateral.

En el caso de escuadrías de madera, los elementos que acoplaremos van a depender de la distribución de los esfuerzos de flexión a lo largo de la viga. De este modo, para momentos negativos situaremos las pletinas en la parte superior y en los extremos de la viga, y para momentos positivos haremos lo propio en la parte inferior y en el centro de la misma. Sin embargo, la colocación de estos elementos también va a depender del sistema constructivo con el que nos encontremos y de sus características arquitectónicas, por lo que también cabe la posibilidad de colocar los perfiles metálicos en las caras laterales de nuestro elemento. Así, respecto al acoplamiento en obra, deberemos tener en cuenta la flecha existente en el elemento para una buena adherencia, utilizando para ello colas de contacto en el caso de madera laminada o conectores metálicos.

Respecto a las jácenas de hormigón, es importante prestar atención a la cuantía y disposición del armado a la hora de añadir piezas acopladas. Su disposición va a depender, como ya hemos visto para las vigas de acero, de la distribución de los distintos esfuerzos, pero teniendo en cuenta en este caso la poca resistencia del hormigón en las zonas traccionadas. Además, y como ya hemos visto anteriormente, deberemos tener en cuenta el planteamiento global de una estructura construida con este material, con nudos rígidos y continuidad entre los elementos en la mayoría de los edificios.

A modo de excepción podemos citar algún elemento de fábrica, caso difícil de ver por la falta de resistencia a tracción. En él, habrá que identificar las directrices en las que aparezca este esfuerzo para la disposición de las pletinas, y dejar que el resto de la fábrica trabaje a compresión que es como estaba concebida.

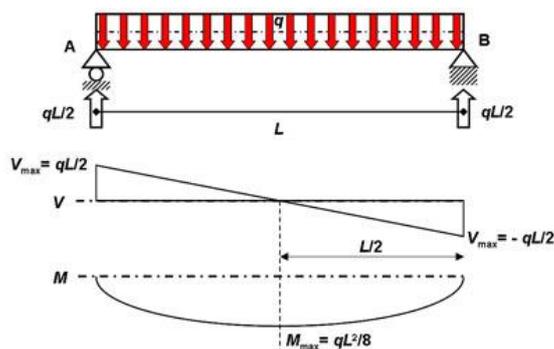


Figura 3: Diagrama clásico de esfuerzos a lo largo de una viga, que deberemos cubrir con los refuerzos añadidos al rehabilitar.

4.3.3 Conversión en una viga mixta

Una de las opciones que tenemos a la hora de intervenir en una viga monomaterial es transformarla en una viga mixta, es decir, conseguir que la sección original y las partes añadidas trabajen como si de una sola sección se tratase. Conseguimos con ello aumentar de nuevo la inercia de la misma, pero no como la suma directa de las inercias de la parte original y la nueva, sino consiguiendo una inercia mucho mayor que la del valor que obtendríamos de este sumando.

Con todo ello vamos a conseguir una mayor resistencia debida a la adición de material, y una menor deformación, con la consiguiente reducción de la flecha máxima experimentada por la viga. Para ello, deberemos realizar el llamado proceso de "homogeneización", que no sirve para obtener un valor de módulo elástico (E) de la nueva sección a partir de los valores de los respectivos materiales que la componen y que en ocasiones son muy dispares entre sí.

En cuanto al método de intervención, va a depender en muchas ocasiones de las preexistencias a conservar con que nos encontremos, que en algunos casos tienen un valor patrimonial y por tanto hay que conservar.

Cuando queramos mantener el pavimento existente, reforzaremos por la cara inferior del elemento, mediante pletinas acopladas tal y como hemos visto con anterioridad. En esta situación deberemos tener en cuenta la dificultad de conectar los perfiles metálicos en el caso de desplazamientos excesivos de la viga existente, por lo que podríamos apostar por soluciones más novedosas como la incorporación de láminas de fibra de carbono en las partes sometidas a esfuerzos de tracción. En este sentido, también existiría un posible riesgo de descalce del apoyo en muro si se diese este tipo de enlace. La solución inmediata para evitar el último inconveniente sería actuar en las caras laterales de la sección.

Por el contrario, cuando los techos presenten un valor arquitectónico que nos interese conservar, la mejor herramienta será el refuerzo mediante una capa de compresión en la parte superior, de la cual hablaremos en profundidad más adelante. En relación a esta técnica, pondremos atención al notable incremento en el peso propio que supone la cantidad de hormigón que aportemos.

Conviene recordar que en algunas ocasiones se da la imposibilidad de determinar la capacidad resistente que tiene la sección original, por lo que se procede a considerar como nula su aportación. Así, las partes añadidas asumen toda la función portante aunque el material original se puede mantener en su lugar sin problema. Se trata de una solución muy habitual para perfiles metálicos que han sufrido corrosión, en los que se opta por envolverlos con una viga de hormigón con su propio armado que resuelve este problema y asume todos los esfuerzos finales.

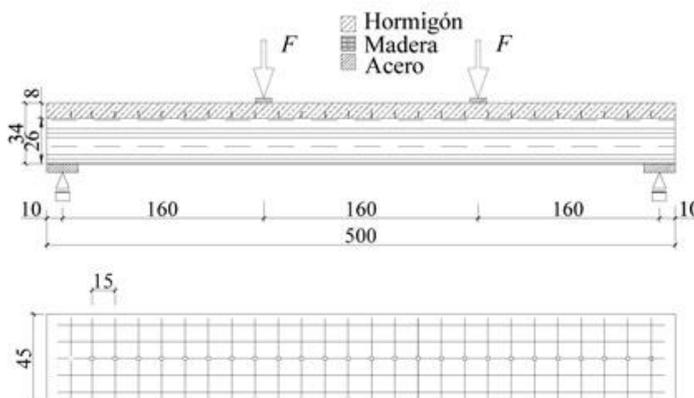


Figura 4: Viga mixta con los materiales debidamente conectados, en la que el hormigón de la parte superior asume los esfuerzos de compresión y el acero desempeña la misma labor con los de tracción.

4.3.4 Técnicas de postesado

Se trata de una manera de intervenir en la que prima la eficacia estructural, con un gran resultado en relación a la cantidad de material necesaria para la rehabilitación. Además, se puede aplicar a cualquier tipo de viga con independencia de su material de construcción.

Se trata de un refuerzo activo, es decir, que entra en carga a la vez que el resto de la estructura. Así, cuando esto sucede se introducen tensiones de signo contrario a las existentes en la viga original con carga, por lo que es muy útil para casos de deformaciones excesivas. Normalmente, el sistema consistirá en un cable que funcione a tracción y un montante que transmita esos esfuerzos a la viga mediante compresión. Existen dos mecanismos para la activación de este refuerzo. En primer lugar podemos plantear aplicar un esfuerzo inicial de tracción en el cable antes de la entrada en carga de la viga, con el objetivo de reducir sus solicitaciones posteriores. El otro caso posible es que dicho esfuerzo de tracción aparezca una vez el conjunto ha entrado en carga, y que se deberá al alargamiento producido en el cable a raíz del desplazamiento de la estructura.

Para hacernos una idea de los valores de tensión necesarios, suele ser habitual que esta técnica de postesado asuma totalmente las cargas verticales provocadas por el peso propio del conjunto, de tal modo que la estructura soporte únicamente la magnitud de las sobrecargas variables.

Una de las tipologías más utilizadas es la "Viga Fink", que como ya hemos visto, aporta un gran rendimiento estructural a consta de una baja cantidad de acero necesaria en comparación con otras intervenciones. Se trata de un mecanismo que tuvo su origen en las obras de ingeniería desarrolladas por Albert Fink a lo largo del S.XIX, y que analizaremos posteriormente en profundidad en uno de nuestros casos de estudio.

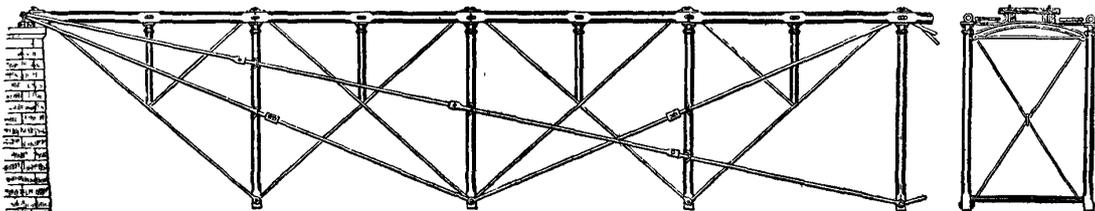


Figura 5: Estructura ferroviaria proyectada por Albert Fink en la que aprovechaba la capacidad resistente de los cables de acero a tracción.

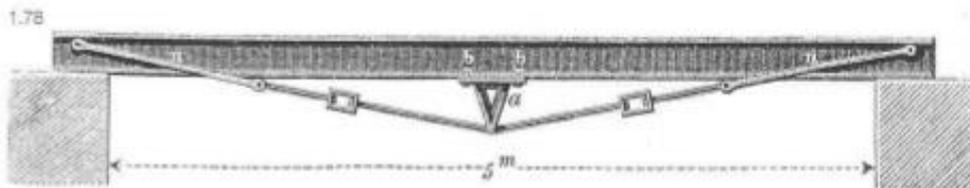


Figura 6: mecanismo de postesado en la parte inferior de una estructura existente, en el que el montante vertical será el encargado de transmitir las cargas a la viga mediante un esfuerzo de compresión.

4.4. Aplicación a forjados

4.4.1 Aspectos previos a tener en cuenta

Existen una serie de factores que debemos considerar con anterioridad al inicio de cualquier tipo de reparación en un forjado, ya sea de sustitución o de refuerzo para hacer frente a las nuevas exigencias.

En primer lugar debemos de tener en cuenta las características geométricas del edificio en el que intervenimos. Por una parte nos condiciona bastante la altura libre entre plantas, ya que en ciertas ocasiones nos limita el recrecido del canto del forjado o la adición de nuevos refuerzos en la parte superior o inferior del mismo. En este sentido, debemos prestar también atención a las dimensiones en planta y en sección del propio elemento en sí, de tal modo que sea compatible con las técnicas de intervención que planteemos.

Por otro lado, y como ya hemos visto en el caso de las vigas, conviene entender el planteamiento conceptual con el que haya sido proyectada la estructura. Este aspecto incluye el enlace del forjado con el resto de elementos que lo reciben, ya sean las propias vigas o unos muros de carga. También debemos evaluar las características resistentes de los materiales que lo componen, incluyendo una posible capa de compresión que le otorgue rigidez, y teniendo en cuenta la posible pérdida de capacidad resistente de los mismos con el paso del tiempo. Por último, no conviene olvidar las condiciones de accesibilidad al lugar de intervención como factor importante a la hora de elegir la intervención más adecuada.

Respecto a las posibles lesiones que haya sufrido nuestro forjado, nos fijaremos en una serie de aspectos que nos pueden dar pistas acerca de la mejor manera de actuar.

En cuanto al estado de conservación del elemento, debemos observar por un lado las deformaciones presentes en las viguetas, bovedillas o losas, y por otro el modo en el que se han conservado los distintos materiales que componen el conjunto. De igual modo, es bastante indicativa la presencia de grietas o fisuras a lo largo de nuestro edificio. Que aparezcan en tabiques y pavimentos suele ser síntoma de una flecha excesiva provocada por una deformación excesiva del forjado. Lo mismo sucede cuando los propios elementos de separación interiores dan muestras de aplastamiento.

Por último, efectos como el cimbreo excesivo cuando se le somete a cargas dinámicas o la alteración geométrica de otros elementos portantes son causa inequívoca de la necesidad de una rehabilitación estructural.

4.4.2 Renovación material de un forjado o de un tramo del mismo

En primer lugar debemos evaluar las patologías existentes para ver el alcance de nuestra intervención. Así, para lesiones graves plantearemos una sustitución física o funcional del forjado, en problemas localizados actuaremos únicamente en refuerzos específicos donde sea necesario, y para aspectos leves sólo repararemos las posibles piezas dañadas.

Un primer caso sería el de la sustitución integral de la totalidad del forjado retirando las viguetas originales. Durante este proceso será muy importante ir controlando el estado del muro mientras se van retirando las cabezas de las viguetas. Así, los agujeros en el propio muro supondrán una pérdida de su capacidad resistente, por lo que cabe la posibilidad de macizarlos conforme se vayan realizando para asegurar la estabilidad del conjunto.

Otra forma de actuar sería la sustitución meramente funcional, absorbiendo los refuerzos la totalidad de la carga pero sin necesidad de retirar la estructura original del monumento. Una de las opciones es intercalar las nuevas viguetas entre las ya existentes, de tal modo que el sistema constructivo asegure que el tablero apoya en los elementos añadidos. En el caso de que los refuerzos se sitúen bajo las viguetas existentes, conviene comprobar que éstas puedan transmitir eficazmente la carga y que el contacto con los añadidos sea continuo a lo largo de toda su extensión.

Una alternativa sería plantear un apoyo intermedio en la parte central de las viguetas, aunque para ello tendremos que revisar la altura libre de la que hemos hablado antes. Esta técnica del parteluz hace que, al disminuir la distancia entre los soportes y conseguir una viga continua, los esfuerzos a soportar se reduzcan. Sin embargo, eso conlleva también la aparición de un momento flector negativo en el centro de la viga, aspecto que puede ser perjudicial si no estaba previsto en el cálculo de la estructura inicial.

En el caso de que el problema se presente en el encuentro con los muros, se suele disponer de elementos bajo la cabeza de las viguetas para mejorar el enlace. Así, se tratan de perfiles metálicos o de escuadrías de madera que transmiten mejor el esfuerzo cortante, que es máximo en los apoyos.

Cuando esta intervención afecte a un único tramo de forjado debido a un conjunto de cargas nuevo o a una degradación por alguna causa externa, procederemos a su sustitución en un área delimitada, de tal modo que consigamos recuperar las condiciones de entrega existentes con anterioridad.

Siempre que se dé esta circunstancia, conviene apuntalar los extremos de los forjados que se hayan proyectado como un tramo continuo, manteniendo durante la intervención estos apoyos en los elementos que no sufren modificación. Del mismo modo sucede con los tramos extremos de forjado, que durante el proceso no apuntalan la fachada y ésta puede sufrir pandeos debido al viento y a su variación de altura libre.



Figura 7: Fotografía en la que se muestra una degradación parcial del forjado visto desde su cara inferior.

4.4.3 Apertura de huecos en un forjado existente

Es bastante más habitual de lo que parece el interrumpir un tramo del forjado con el objetivo de eliminar estas separaciones horizontales en algunas partes del programa de necesidades en las que interese. Vinculado a este cambio de uso puede ser necesario dotar a edificios antiguos de nuevas comunicaciones verticales tales como ascensores y escaleras que hagan necesarias intervenciones de este tipo.

Cuando el forjado está formado por viguetas unidireccionales, añadiremos perfiles metálicos en el perímetro del hueco a abrir, con el objetivo de que sirvan de apoyo para el forjado que mantenemos. Al igual que sucedía en la renovación material de un tramo del forjado, volveremos a revisar la redistribución de los momentos flectores que nos aparezca al eliminar la continuidad de los distintos tramos.

En el caso de forjados reticulares o losas, deberemos tener de nuevo en cuenta estos aspectos, y realizaremos la intervención siguiendo una serie de pasos. En primer lugar realizaremos un apuntalamiento que nos permita retirar el material central de nuestro hueco. Posteriormente vamos a proceder a crear un nuevo zuncho de borde, adaptando para ello el armado existente mediante el doblado de las barras para que se mantenga la continuidad. Después crearemos un remate metálico en todo el límite del hueco, que nos permita hormigonar el conjunto y resuelva los esfuerzos en el extremo. Finalmente, procederemos a comprobar la eficacia del nuevo refuerzo tras la retirada del apuntalamiento provisional.



Figura 8: Apertura de hueco en un forjado existente para generar una doble altura en el proyecto.



Figura 9: Realización de hueco de ascensor a partir de la demolición de un tramo existente.

4.4.4 Mejora capacidad resistente mediante elementos añadidos

En este apartado las soluciones van a ser muy similares a las empleadas en las vigas, ya que al fin y al cabo ambos elementos funcionan del mismo modo. Por tanto, vamos a continuar con la clasificación en función del material que los compone.

Cuando nos encontramos con viguetas metálicas, la solución de adosar pletinas se puede realizar desde la cara inferior, para cubrir el diagrama de momentos, o en los laterales de la misma, como opción cuando queremos resolver el cortante en sus extremos. Otras opciones alternativas serían desdoblarse las viguetas con otras nuevas situadas de manera paralela, o añadir hormigón que las envuelva mediante el vaciado del material de relleno presente en el entrevigado.

Respecto a la vigería de madera, la más habitual en edificios antiguos, siempre que se encuentre en buen estado de conservación alberga todas aquellas soluciones vistas relativas a la mejora de resistencia ante los distintos esfuerzos que se den a lo largo del elemento. Además, aparecen otras soluciones menos utilizadas pero igualmente válidas como pueden ser el acoplamiento de láminas de carbono en la dirección de las fibras, la conversión de tramos aislados dándoles continuidad, o la reducción de la luz de las viguetas, ya sea mediante tornapuntas o mecanismos de postesado como la "Viga Fink" de la que hemos hablado antes.

Sin embargo, cuando las viguetas aparecen deterioradas debido a la humedad o al ataque de insectos xilófagos, deberemos sustituir aquellas partes que no garanticen un buen funcionamiento estructural. En muchas ocasiones nos encontramos con las cabezas de las mismas en mal estado, por lo que se suelen adosar tramos de madera en el lateral. En un caso extremo, cabe la posibilidad de aprovechar el forjado original como encofrado perdido para rellenar dichas cabezas con mortero y varillas de conexión a la madera que permanezca en buen estado, devolviendo a la sección una capacidad resistente similar.

Finalmente, las viguetas de hormigón presentan en ocasiones problemas de aluminosis, por lo que conviene detectar la degradación provocada por este tipo de cemento. Es habitual la utilización de elementos extensibles tanto en la parte inferior como lateral de la viga para dar respuesta al aumento de las demandas. En estos casos, se suelen utilizar placas de anclaje en los extremos para garantizar los apoyos.

En cuanto a refuerzos por encima de la capa de compresión, se suelen utilizar barras corrugadas de acero o láminas de fibra de carbono, adheridas en las caras traccionadas mediante resinas, para plantear tramos continuos. Limitamos con ello la fecha al reducir así los momentos flectores positivos, aunque con ello aparezcan momentos negativos que deberemos considerar.

Decir además que nuevamente vuelven a ser válidas las soluciones relativas al aumento de la resistencia frente a los esfuerzos, teniendo todavía más cuidado si cabe en estos casos debido a la despreciable resistencia del hormigón a tracción, que se resuelve mediante el armado.

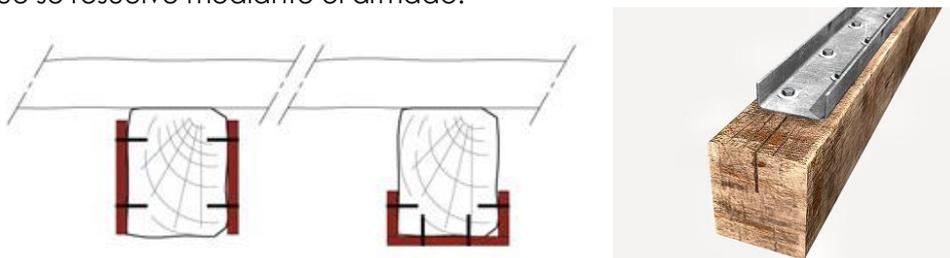


Figura 10: Disposiciones de distintas pletinas adosadas a una viga de madera.

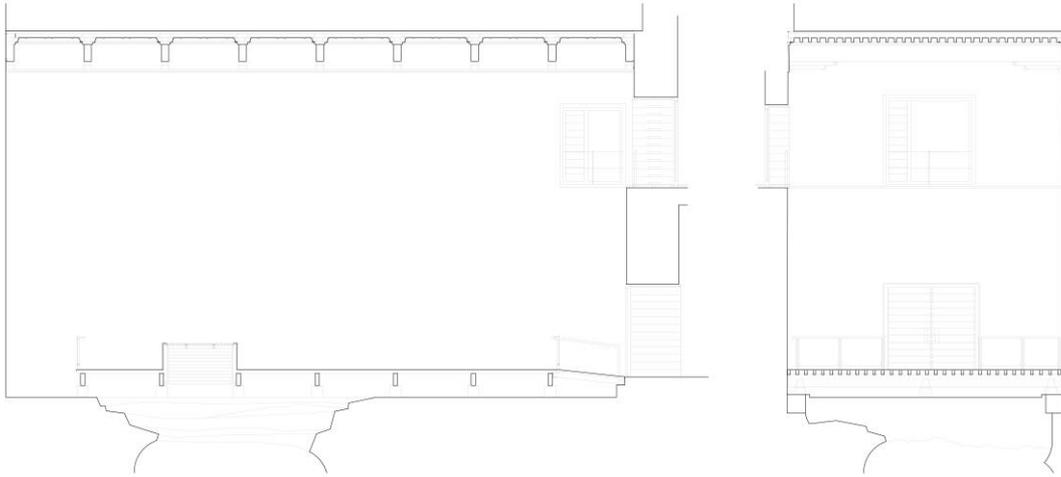


Figura 11: Secciones de la actuación en el Palacio de Pedro IV (Pemán y Franco) en el interior de la Aljafería de Zaragoza, en el que se refuerzas las vigas originales.

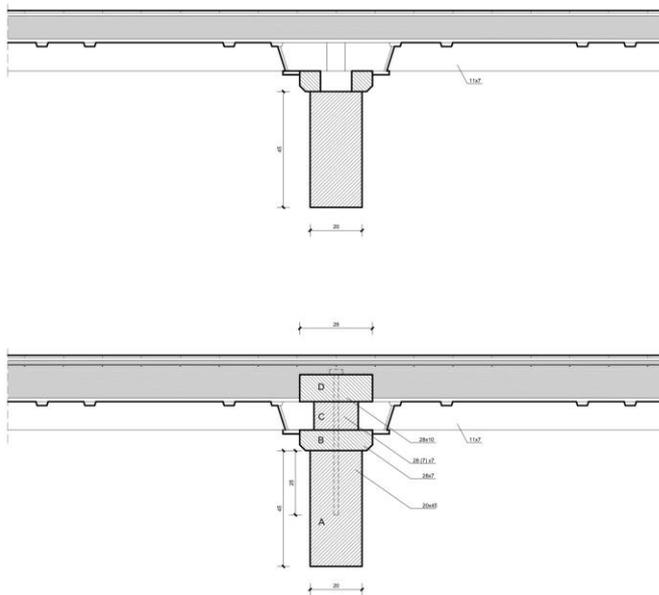


Figura 12: Detalles constructivos del estado original y de la posterior rehabilitación de la vigería. Se adosan láminas de madera mediante resinas y pernos de acero inoxidable, de modo que aumentamos su canto estructural y su resistencia a flexión.

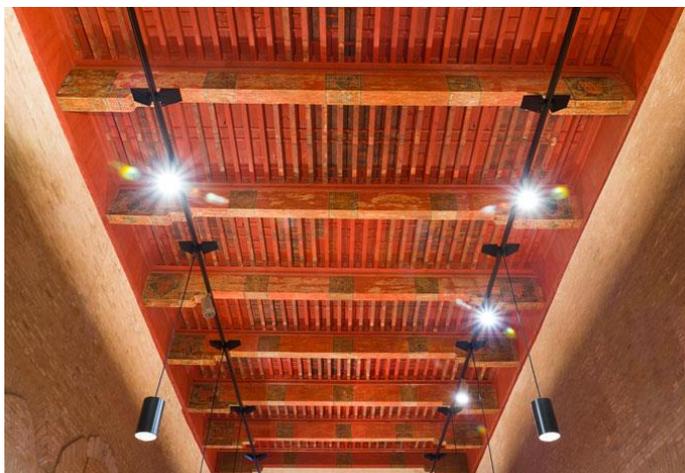


Figura 13: fotografía que muestra las decoraciones pictóricas presentes en el techo de la sala. Debido a esta catalogación, la rehabilitación mantendrá la sección constructiva coordinada con las piezas existentes, de modo que sea compatible con el patrimonio.

4.4.5 Refuerzo mediante capa de compresión con conectores

Se trata de una reconversión de un forjado monomaterial en uno mixto, que se plantea ante un aumento en el estado de cargas. Suele ser habitual también como solución en aquellos casos en los que el techo posea un valor patrimonial, y por tanto no se pueda intervenir por la cara inferior. Mediante esta técnica añadimos una capa de compresión solidaria con lo existente, mediante conectores que se anclan a las viguetas y enlaces con los muros perimetrales.

Antes de comenzar la actuación, vamos a proceder a analizar la estructura original con la que nos encontramos. En cuanto al sistema constructivo, estudiaremos las dimensiones de las viguetas y su distancia de separación, el acabado horizontal que presenta y las condiciones de enlace con los apoyos. Respecto a su comportamiento resistente, veremos la existencia de grietas o movimientos acusados que nos puedan ayudar a estimar su comportamiento ante las sollicitaciones que reciba. Con estos datos, podremos ver los esfuerzos que soporta y las deformaciones máximas ante los nuevos estados de carga.

Con todo ello podremos actuar de una manera más coherente. Será importante elegir el tipo de hormigón que nos cumpla las exigencias, así como el material de relleno para los desniveles provocados por las flechas existentes.

En cuanto a los conectores, serán los que absorban las fuerzas rasantes entre los materiales, consiguiendo así una sección mixta que trabaje de forma conjunta. Estos conectores que solidarizan la estructura pueden ser de muchos tipos en el caso de escuadrías de madera, que facilita su penetración: clavos, tirafondos, pernos, de crampón o con forma de anillo, trabajando cada uno de manera distinta y siendo adecuados para distintas situaciones. En el caso de viguetas metálicas se hace uso de redondos o de pletinas planas que normalmente van soldados.

Respecto a su disposición a lo largo del eje del elemento, va a depender de los esfuerzos rasantes, que son siempre mayores en los extremos que en el centro de las viguetas. Así, una solución mantiene la distancia entre los conectores y varía sus dimensiones, mientras que el otro planteamiento unifica los refuerzos mientras que concentra su cantidad en función de las necesidades de cálculo.

Finalmente, en el encuentro con los muros y siempre que éste no presente patologías, introducimos barras de acero que, ayudadas del uso de mortero, permiten conectarlos con la capa de compresión. Se realizará este procedimiento en todo el perímetro del forjado, con independencia de la dirección de las viguetas en forjados unidireccionales. Si se quiere mejorar el funcionamiento, cabe la posibilidad de que estas barras se prolonguen más allá del muro para generar los tramos continuos de los que hemos hablado anteriormente.



Figura 14: capa de compresión sobre bovedillas cerámicas y vigería de madera.

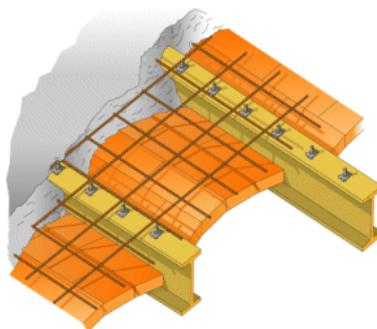


Figura 15: detalle de conectores sobre viga metálica para solidarizar la estructura mixta.

5. CASOS DE ESTUDIO MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

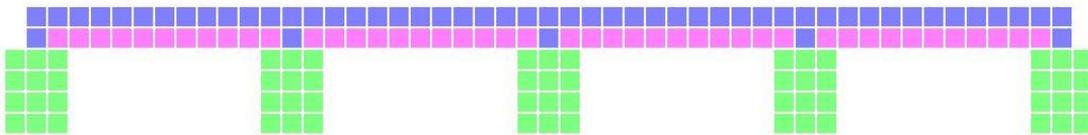
5.1. Geometrías utilizadas para la modelización

Vamos a partir de un forjado unidireccional de 5 metros de luz, con escuadrías de madera de 20x15 cm de sección, 60 cm de intereje y un tablero del mismo material de 5 cm de canto. Como ya hemos dicho, se tratará de una geometría que nos va a servir para obtener conclusiones en un problema de estas características, pero que serían totalmente inválidas en cualquier otro caso, para el cual deberíamos realizar un proceso similar. Hemos planteado 5 casos, desde el estado original con las cargas existentes hasta una serie de distintas técnicas de intervención que actuarán ante las nuevas solicitaciones planteadas.

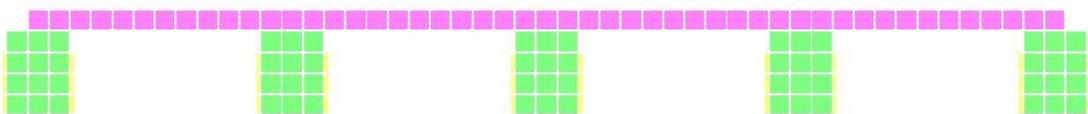
Caso 1 y 2: la geometría es la del edificio antiguo de la que acabamos de hablar. El primero soporta el estado de cargas originales mientras que el segundo hace frente al nuevo estado de cargas. Nos van a servir para ver los efectos en la estructura de un aumento de las solicitaciones:



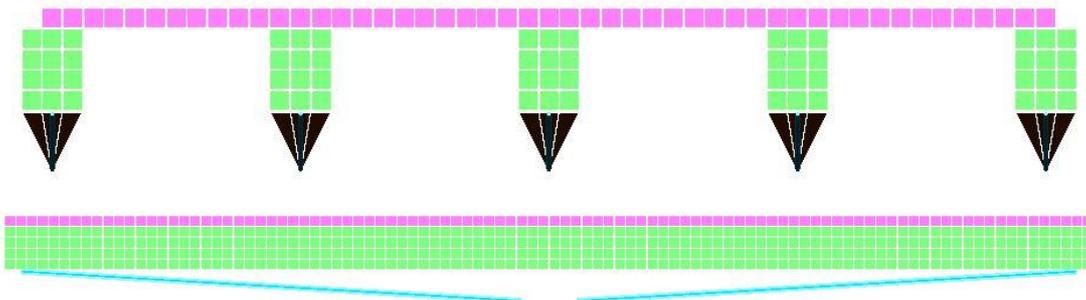
Caso 3: respecto al Caso 2, realizamos un refuerzo mediante el añadido de una capa de compresión de 5 cm de espesor (elementos azules). Así, al estar solidarizada con la estructura inicial, compartirá con ella los nodos en el modelo:



Caso 4: en esta intervención, se añaden unas pletinas de acero (color amarillo) de 1 cm de espesor en las caras laterales de las viguetas de madera. Al estar adosadas en toda la longitud de las mismas, colaboran respecto al flector positivo en su parte central y respecto al cortante en sus extremos, según la distribución clásica de esfuerzos:



Caso 5: planteamos un postesado por la cara inferior del forjado existente. De este modo, los cables (color cian) de 5 mm de diámetro aparecen como barras articuladas en sus extremos, y transmiten una fuerza vertical hacia un refuerzo que trabajará a compresión (color negro) bajo la parte central de cada vigueta:



Vista lateral del forjado con los cables situados en la parte inferior

5.2. Materiales, condiciones de contorno e hipótesis de cargas

En cuanto a los materiales, tomamos estas características para definirlos, pero entendiendo que podrían haber sido otras cualquiera en función del edificio a rehabilitar y su estado de conservación:

	ACERO	MADERA	HORMIGÓN
E (Pa)	2,10E+11	1,10E+10	2,70E+10
Poisson	0,28	0,25	0,2
G (Pa)	8,20E+10	4,40E+09	1,13E+10
Densidad (kg/m3)	7850	700	2500
Tensión (Pa)	2,75E+08	1,00E+07	2,50E+07

Respecto a las condiciones existentes en los apoyos, para estos cálculos hemos considerado que los extremos de las viguetas se encuentran empotrados, restringiendo el giro de sus cabezas. Sin embargo, en el caso de que estuviesen simplemente apoyadas, habría que plantearlas como articuladas.

En cuanto a las cargas, el peso propio (PP) del elemento lo calcula el programa a partir del valor de densidad que metemos y del volumen de los elementos modelados. Planteamos un estado inicial de carga permanente (CP) y de sobrecarga de uso (SU) que podría tener el edificio originalmente:

CARGAS VIEJAS	Tensiones (mayoradas)	Deformaciones (sin mayorar)
PP (Peso Propio)	13,2	9,8 m/s ²
CP (Carga Permanente)	1,4	1,0 KN
SU (Sobrecarga Uso)	1,5	1,0 KN

Coeficiente carga permanente = 1,35
Coeficiente carga variable = 1,5

Posteriormente, con un hipotético cambio de uso aumentaríamos dichas hipótesis de cargas para ver el efecto que tienen sobre la estructura:

CARGAS NUEVAS	Tensiones (mayoradas)	Deformaciones (sin mayorar)
PP (Peso Propio)	13,2	9,8 m/s ²
CP (Carga Permanente)	2,7	2,0 KN
SU (Sobrecarga Uso)	3,0	2,0 KN

Coeficiente carga permanente = 1,35
Coeficiente carga variable = 1,5

Así, a la hora del cálculo obtendremos las tensiones de Von Mises con estas cargas mayoradas, según el Estado Límite Último. Por el contrario, para las deformaciones (flecha) usaremos las cargas sin mayorar, según el Estado Límite de Servicio.

5.3. Comparativa de los resultados obtenidos

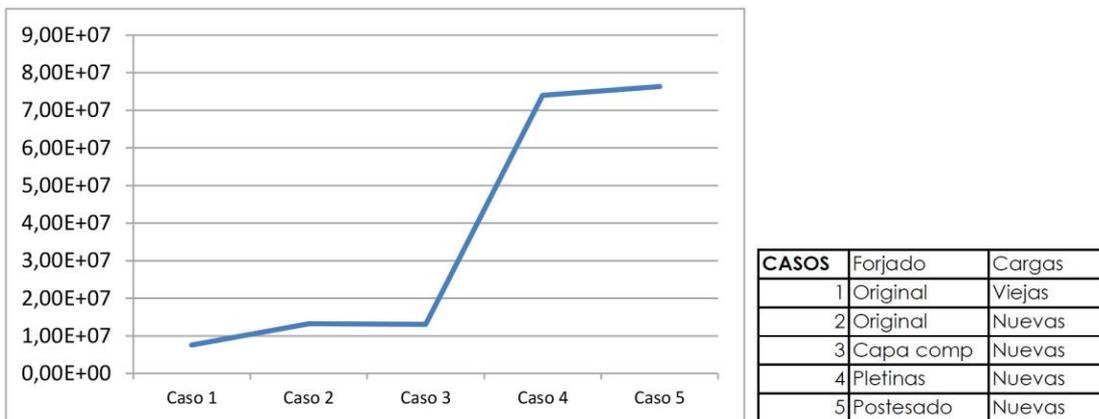
Una vez realizado el cálculo de cada uno de los casos a partir de todas las condiciones de las que acabamos de hablar, obtenemos un conjunto de datos para analizar. Aunque están todos ellos presentes en el Anejo II, extraemos los que nos van a interesar en la siguiente tabla:

RESUMEN	VM max (mayorado)	Flecha (sin mayorar)
Caso 1	7,56E+06 Pa	8,29E-04 m
Caso 2	1,32E+07 Pa	1,44E-03 m
Caso 3	1,31E+07 Pa	8,84E-04 m
Caso 4	7,40E+07 Pa	8,21E-04 m
Caso 5	7,63E+07 Pa	1,43E-03 m

De la misma, la conclusión más inmediata que podemos extraer sin entrar en profundidad es los cambios que ocurren al pasar del Caso 1 al Caso 2. Así, tratándose de la misma geometría, vemos que con este aumento de cargas la tensión de Von Mises máxima aumenta un 74,6%, mientras que la flecha lo hace en un 73,7%.

Ahora vamos a proceder a analizar la variación en las tensiones que se producen a raíz de la ejecución de cada una de las intervenciones de rehabilitación estructural, que vemos de manera clara en la siguiente gráfica:

VM max (mayorado)

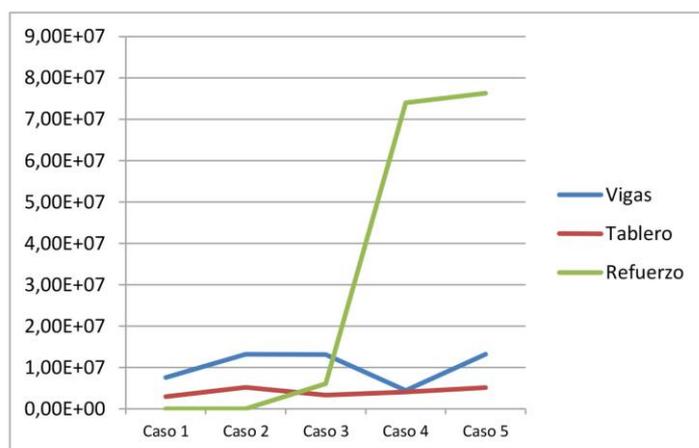


Observamos a primera vista un gran salto en el valor de la tensión de Von Mises que aparece en el global de la estructura en los cálculos del Caso 4 y del Caso 5, mientras que en el Caso 3 se mantiene prácticamente igual que con el planteamiento original. Para obtener más conclusiones, procedemos a estudiar estos mismos datos desglosados por elementos:

VM max (mayorado) por elementos

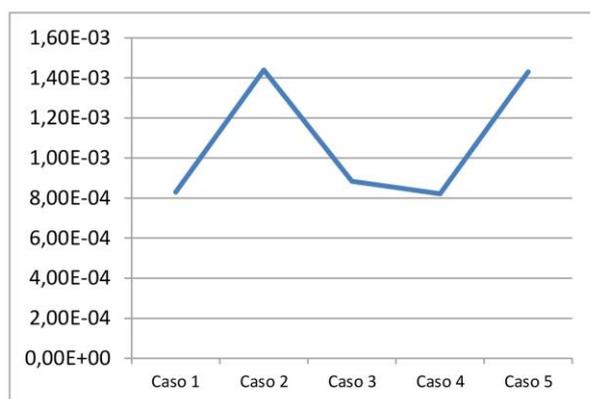
	Vigas	Tablero	Refuerzo
Caso 1	7,56E+06	2,97E+06	0,00E+00
Caso 2	1,32E+07	5,18E+06	0,00E+00
Caso 3	1,31E+07	3,33E+06	6,07E+06
Caso 4	4,46E+06	4,10E+06	7,40E+07
Caso 5	1,32E+07	5,16E+06	7,63E+07

De esta tabla, el aspecto más importante que extraemos es la notable reducción de la tensión que experimentan las vigas de madera en el Caso 4, concretamente en un 66,2%. Este fenómeno también se repetirá en el caso del tablero de madera, aunque en menor proporción, un 20,8%. Esto se debe a que las pletinas de acero asumirán una importante misión resistente. Sin embargo, vemos que en el Caso 5 la mejora respecto al estado sin rehabilitar es apenas imperceptible. Todo ello lo podemos ver en esta gráfica:



Finalmente, nos vamos a fijar en las deformaciones que aparecen para terminar de analizar las intervenciones. Concretamente nos interesará mirar la flecha, es decir, la deformada en el eje Y en nuestros modelos, y que podremos observar con mayor detalle en el Anexo III. A modo de resumen tendremos estas variaciones:

Flecha (sin mayorar)



CASOS	Forjado	Cargas
1	Original	Viejas
2	Original	Nuevas
3	Capa comp	Nuevas
4	Pletinas	Nuevas
5	Postesado	Nuevas

En relación al Caso 3, aunque no se producían mejoras en las tensiones obtenidas debido al considerable aumento de peso propio del hormigón, sí que se observa una disminución significativa de la flecha, de un 38,6%. Esto se debe a la gran rigidez que aporta esta capa debidamente conectada, al trabajar el conjunto de manera solidaria. Esta misma reducción en las deformaciones se producirá para el Caso 4.

Respecto al Caso 5, observamos que no supone apenas mejora en tensiones ni en deformaciones. Esto se debe a que nuestros cables entran en carga cuando lo hace el conjunto de la estructura, por lo que se empiezan a traccionar y alargarse a raíz de las deformaciones verticales del forjado, por lo que si éstas no son muy acusadas, el elemento no trabajará aprovechando el máximo de sus posibilidades. La solución cuando esto ocurra pasaría, como hemos visto anteriormente, en realizar un tesado previo sobre el cable que plantee una fuerza vertical hacia arriba sobre el forjado.

6. CONCLUSIONES

Una vez realizado este trabajo, confirmamos la importancia de la rehabilitación, no sólo en el contexto actual sino en todas las etapas de la historia vinculadas a la construcción. A posteriori, nos ha parecido acertado el análisis desde dos puntos de vista tan distintos pero a la vez complementarios como son el arquitectónico y propio de la ingeniería.

El ampliar nuestra capacidad de visión permite considerar la idoneidad de las distintas soluciones con una mayor eficacia, puesto que de otro modo habría muchos aspectos que nos dejaríamos sin tratar. Vamos a exponer a modo de ejemplo algunas situaciones que se nos han dado, en las que al resultado del cálculo estructural debemos añadirles el enfoque patrimonial y constructivo del que hablábamos en la introducción. Partiremos así de una evaluación cuantitativa previa que nos servirá para ver la eficacia de cada una de ellas.

En el caso del refuerzo mediante el añadido de una capa de compresión para conseguir un forjado más rígido y reducir con ello la flecha, cabe la posibilidad de que no se pueda realizar debido a una serie de circunstancias. Constructivamente, puede darse el caso de que el estado de conservación de las vigas no permita la instalación de conectores solidarizados con ellas. Respecto al punto de vista patrimonial, si nos encontramos con un pavimento catalogado que debemos conservar, va a ser imposible esta intervención realizada por la cara superior de la estructura.

Lo mismo sucede en el caso de las pletinas de acero o del postesado mediante cables, cuando disponemos de un artesonado en el techo sobre el que no se puede actuar por razones de protección. Constructivamente, serían también soluciones que requerirían una menor cantidad de material, aunque quizás su ejecución fuese más compleja en el caso de los cables. Por ello, habría que ver la viabilidad de cada caso en función de múltiples factores.

En este sentido, existen múltiples razones que nos hagan decantarnos por una solución u otra, como pueden ser la altura disponible, el estado constructivo de los apoyos o la posibilidad de acceder al lugar con el refuerzo elegido. Para ello, deberemos analizar los pros y las contras de cada una de las técnicas, pero siempre desde los tres puntos de vista para tratar de no dejar de lado ningún aspecto importante.

Con todo ello, desde una pequeña puesta al día de la situación actual de la rehabilitación, referida a conceptos, necesidades y normativas, hemos pasado a una explicación más detallada de algunas de las técnicas utilizadas. Estas intervenciones en rehabilitación estructural de vigas y forjados nos han permitido comprobar la realidad material con la que el proyectista se encuentra, apareciendo múltiples condicionantes en el día a día y comprobando que cada caso es digno de un estudio pormenorizado. Finalmente, planteamos una metodología de análisis de dichas técnicas, mediante el Método de Elementos Finitos, que nos han permitido evaluarlas desde el punto de vista de su funcionamiento estructural.

Creemos así que se han cumplido las expectativas de aprendizaje generadas desde el principio, siendo el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado el permitir al alumno acercarse hacia unos aspectos en los que no había profundizado con anterioridad a la realización de este estudio. De este modo, agradecer a los directores del mismo la labor de acompañamiento y asesoría, realizada durante el proceso de investigación y la posterior redacción del mismo, sin la cual no se podría haber llegado a este resultado.

7. BIBLIOGRAFÍA

ABASOLO, Andrés et al. *Tratado de rehabilitación. Tomo 3, Patología y técnicas de intervención: elementos estructurales*. Madrid: Munilla-Lería, 2008.

ADELL ARGILÉS, Josep María et al. *Tratado de rehabilitación. Tomo 1, Teoría e historia de la rehabilitación*. Madrid: Munilla-Lería, 1999.

ARCE, Ignacio et al. *Tratado de rehabilitación. Tomo 2, Metodología de la restauración y de la rehabilitación*. Madrid: Munilla-Lería, 1999.

ARNUNCIO PASTOR, JUAN CARLOS. "Aproximación metodológica a la intervención en el patrimonio arquitectónico en el medio urbano" en *El proyecto de restauración*. Madrid: Munilla-Lería, 2003.

BEINHAUER, Peter. *Atlas de detalles constructivos: Rehabilitación: con 199 ejemplos*. Barcelona: Gustavo Gili, 2013.

BRUFAU I NIUBÓ, Robert. *Rehabilitar con acero*. Madrid: Publicaciones APTA, 2010.

CALAVERA, José. *Curso de rehabilitación. Vol. 5: La estructura*. Madrid: Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1984.

DEPLAZES, Andrea (ed.). *Construir la arquitectura: del material en bruto al edificio: un manual*. Barcelona: Gustavo Gili, 2010.

GONZÁLEZ CAPITEL, Antón. "El tapiz de Penélope" en *Arquitectura*, 244, p. 24-34. Madrid, 1983.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, Antoni. "Restauración monumental: ¿el método en crisis?" en *Informes de la Construcción*, Vol. 64, p. 13-22. Madrid, 2012.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, Antoni. "Restaurar monumentos, una metodología específica" en *Informes de la Construcción*, Vol. 40, p. 25-31. Madrid, 1988.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, Antoni et al. *El proyecto de restauración*. Madrid: Munilla-Lería, 2003.

PÉREZ ARROYO, SALVADOR. "Restauo: nuevos problemas, nuevas oportunidades en un low-cost world" en *Informes de la Construcción*, Vol. 64, p. 35-43. Madrid, 2012.

VEGAS, Fernando y MILLETO, Camilla. *Aprendiendo a restaurar: un manual de restauración de la arquitectura tradicional de la Comunidad Valenciana*. Valencia: COAV, 2011.

Téctónica 18: Rehabilitación (I). 2005.

Téctónica 33: Rehabilitación: la arquitectura moderna. 2010.

ANEXOS

I. Proceso de modelización mediante I-DEAS

En relación a la rehabilitación, los problemas técnicos se ponen al servicio de la arquitectura, no son un fin en sí mismos sino una herramienta para alcanzar unos determinados objetivos. Así, antes de plantearnos una operación técnica de restauración conviene pensar acerca de la finalidad de la misma. Así, cada una de las intervenciones tendrá una manera distinta de acometerse en función del monumento al que se aplique.

Como ya hemos visto, vamos a hacer uso de I-DEAS, programa de cálculo estructural que hace uso del Método de Elementos Finitos (FEM). Este procedimiento trata la estructura como una malla compleja formada por un conjunto de elementos, de tal modo que obtiene los valores resultantes en cada uno de ellos.

Inicialmente debemos generar el mallado asociado (Meshing) a nuestra geometría. Para ello vamos a tratar de discretizar la estructura real existente en un modelo virtual compuesto de miles de elementos que simularán su comportamiento ante las condiciones que le apliquemos. Tendremos la opción de modelar entidades en una dimensión (barras), dos dimensiones (láminas) y tres dimensiones (sólidos)

En primer lugar procedemos a dibujar los nodos (Nodes) de nuestra estructura, puntos en el espacio con sus propias coordenadas asociadas que nos van a permitir dibujar el resto de nuestra estructura. Además, a la hora del cálculo podremos obtener las tensiones y las deformaciones asociadas a cada uno de ellos:

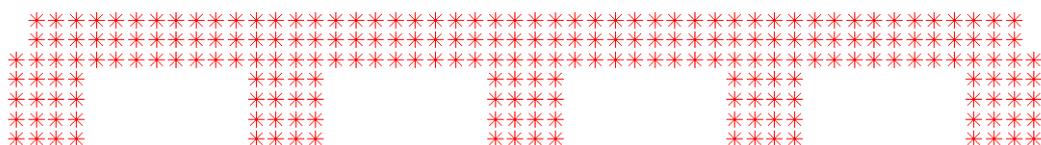


Figura 16: Conjunto de nodos existentes en nuestra sección.

El siguiente paso va a consistir en crear elementos a partir de estos nodos. En nuestro caso vamos a usar las láminas (Thin Shell), que nos permiten modelizar nuestra estructura a partir de entidades formadas por 4 nodos cada una. Así, como aparecen nodos que comparten varias de ellas, logramos generar una malla continua para nuestro modelo:

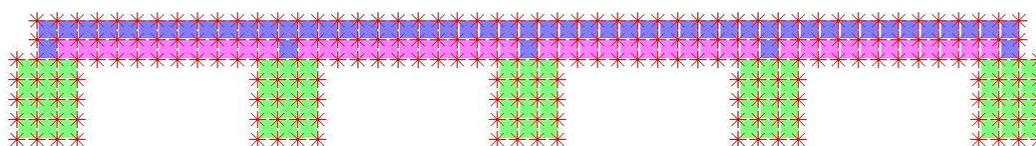


Figura 17: Elementos lámina organizados en grupos a partir de su color.

Posteriormente, vamos a extruir nuestra sección, convirtiendo éstas láminas en elementos más complejos como son los sólidos (Solid). En este caso deberemos eliminar los Thin Shell originales, ya que en caso contrario duplicaremos el material en esas zonas. Conseguimos con ello un modelo en las tres dimensiones del espacio:

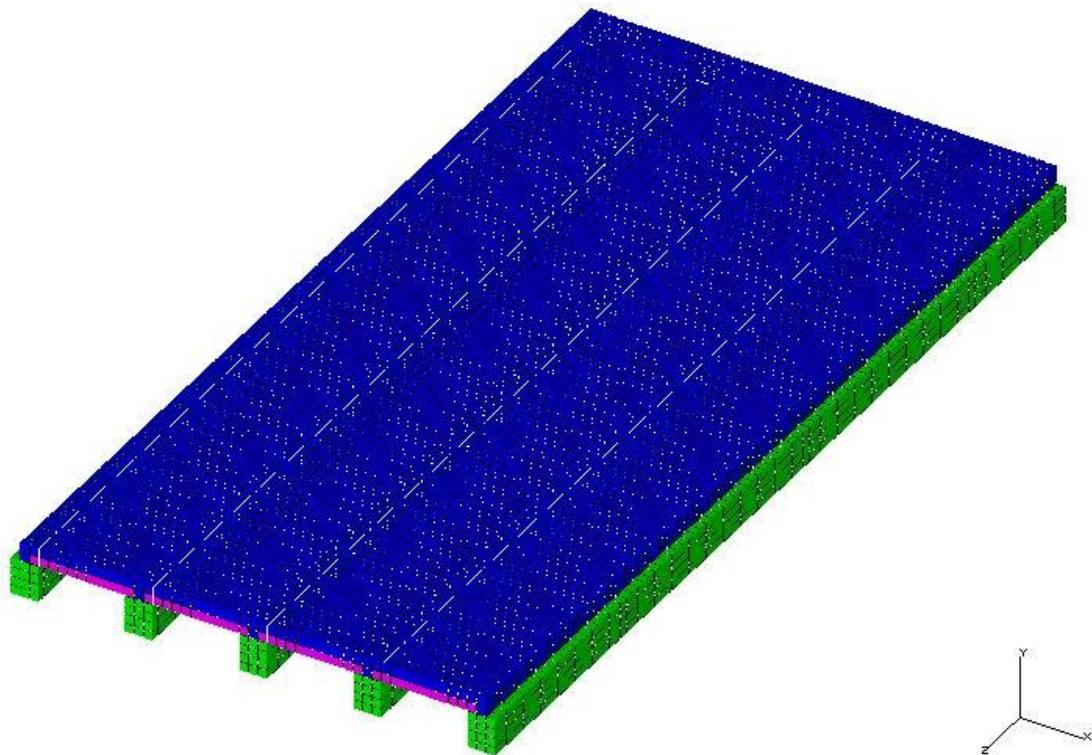


Figura 18: Modelo a analizar a través de elementos sólidos.

Vamos a continuar con el establecimiento de las condiciones de contorno (Boundary Conditions), habiendo asociado antes a cada elemento un material, que definiremos a través de su Módulo de Young, su Coeficiente de Poisson y su densidad. Configuraremos los apoyos en función del planteamiento estructural que tenga en la realidad, restringiendo o liberando desplazamientos y giros en los distintos nodos. Del mismo modo, aplicaremos las hipótesis de cargas que consideremos, ya sean puntuales (Force) aplicadas a nodos, o superficiales (Pressure) que afecten a las caras de nuestros elementos:

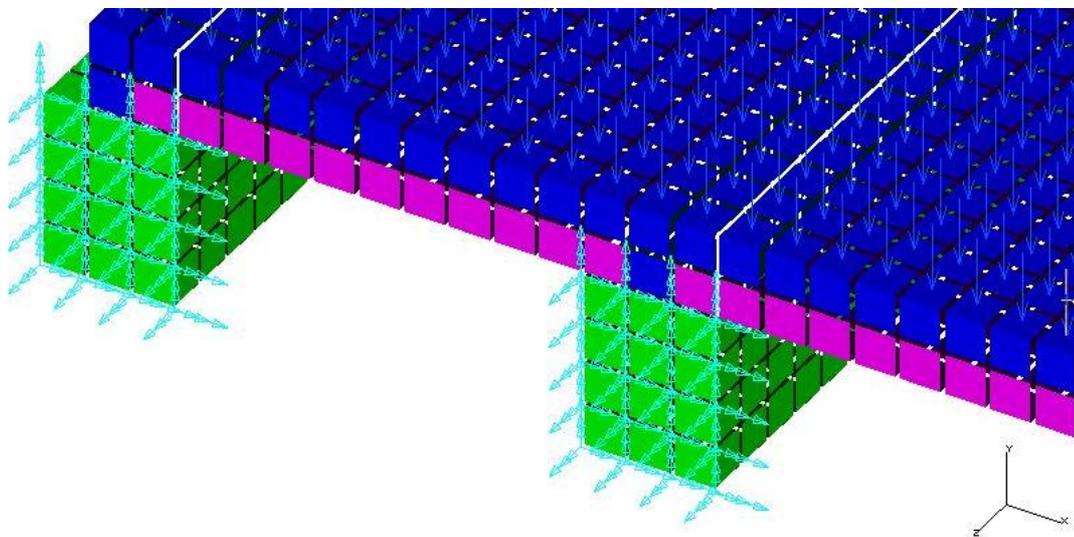


Figura 19: Condiciones de contorno y cargas presentes en nuestra geometría.

Con todo ello, plantearemos el problema (Model Solution) teniendo en cuenta las condiciones anteriores, eligiendo las que consideremos en función de lo que queramos calcular. Es en este momento en el que el programa procede a resolver todas las ecuaciones generadas a raíz de los nodos y elementos creados:

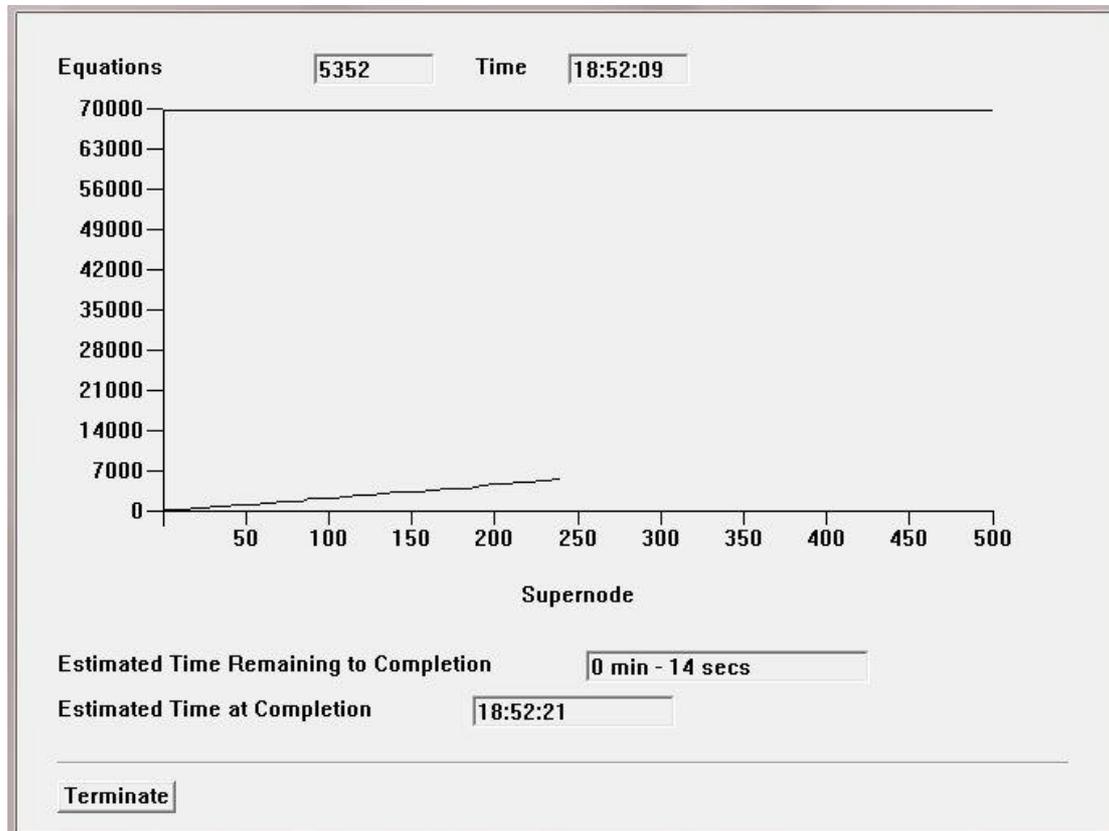


Figura 20: Gráfica que nos muestra las ecuaciones existentes en el problema.

Finalmente, podemos ver en la opción de Post Processing todos los resultados obtenidos en el cálculo realizado. En nuestro caso, nos interesarán las tensiones, las deformaciones y los esfuerzos de nuestro modelo, cuyos mapas podremos ver más adelante en el Anexo III.

Cabe mencionar que en algunos de nuestros modelos pueden aparecer elementos con otras características. Así, en el caso de los cables los modelaremos mediante barras (Beams) a las que asociaremos una sección. Respecto a las placas, volveremos a hacer uso de las láminas (Thin Shell), configurando el espesor de las mismas.

Con todo ello, buscamos aproximarnos en la medida de lo posible al comportamiento real de la estructura, a través de las características que conocemos y del estudio de su comportamiento. Sin embargo, somos conscientes de que nunca va a ser posible alcanzar un resultado exacto, y mucho menos en tareas de rehabilitación estructural. Por tanto, todo el rigor y buen hacer que desempeñemos servirá para minimizar este error inevitable.

II. Conjunto de valores obtenidos en el cálculo

	CÁLCULO MAYORADO						CÁLCULO SIN MAYORAR					
	TENSION VON MISES			DEFORMACION Y			TENSION VON MISES			DEFORMACION Y		
	MIN	MAX		MIN	MAX		MIN	MAX		MIN	MAX	
CASO 1												
Viga madera	7,50E+03	7,56E+06	-1,16E-03	5,12E-06			4,57E+03	5,38E+06	-8,29E-04	3,65E-06		
Tablero madera	7,50E+03	7,56E+06	-1,16E-03	3,83E-06			4,57E+03	5,38E+06	-8,27E-04	2,74E-08		
	2,02E+04	2,97E+06	-1,16E-03	5,12E-06			1,48E+04	2,11E+06	-8,29E-04	3,65E-06		
CASO 2												
Viga madera	2,71E+04	1,32E+07	-2,04E-03	8,95E-06			1,90E+04	9,34E+06	-1,44E-03	6,34E-06		
Tablero madera	2,71E+04	1,32E+07	-2,03E-03	6,43E-08			1,90E+04	9,34E+06	-1,44E-03	4,57E-08		
	3,23E+04	5,18E+06	-2,04E-03	8,95E-06			2,27E+04	3,67E+06	-1,44E-03	6,34E-06		
CASO 3												
Viga madera	2,01E+04	1,31E+07	-1,24E-03	9,88E-06			1,44E+04	9,33E+06	-8,84E-04	7,07E-06		
Tablero madera	2,01E+04	1,31E+07	-1,24E-03	0,00E+00			2,71E+04	9,33E+06	-8,84E-04	0,00E+00		
Capa hormigón	2,53E+04	6,07E+06	-1,24E-03	8,95E-06			1,81E+04	4,34E+06	-8,84E-04	6,41E-06		
CASO 4												
Viga madera	6,80E+03	7,40E+07	-1,16E-03	6,52E-06			4,85E+03	5,26E+07	-8,21E-04	4,63E-06		
Tablero madera	6,80E+03	4,46E+06	-1,14E-03	1,26E-06			4,85E+03	3,17E+06	-8,12E-04	8,96E-07		
	1,39E+04	4,10E+06	-1,16E-03	6,52E-06			1,02E+04	2,91E+06	-8,21E-04	4,63E-06		
Pletina acero	3,53E+04	7,40E+07	-1,14E-03	2,02E-06			2,54E+04	5,26E+07	-8,13E-04	1,43E-06		
CASO 5												
Viga madera	2,76E+04	7,63E+07	-2,03E-03	8,92E-06			1,93E+04	5,63E+07	-1,43E-03	6,31E-06		
Tablero madera	2,76E+04	1,32E+07	-2,02E-03	6,11E-08			1,93E+04	9,31E+06	-1,43E-03	4,35E-08		
Apoyo acero	3,15E+04	5,16E+06	-2,03E-03	8,92E-06			2,21E+04	3,65E+06	-1,43E-03	6,31E-06		
Cable acero	4,51E+05	7,61E+05	-2,02E-03	-1,57E-03			3,20E+05	5,39E+05	-1,43E-03	-1,11E-03		
	7,63E+07	7,63E+07	-2,01E-03	0,00E+00			5,63E+07	5,63E+07	-1,43E-03	0,00E+00		

III. Mapas de tensiones y deformaciones en cada caso de estudio

CASO 1: Estructura completa

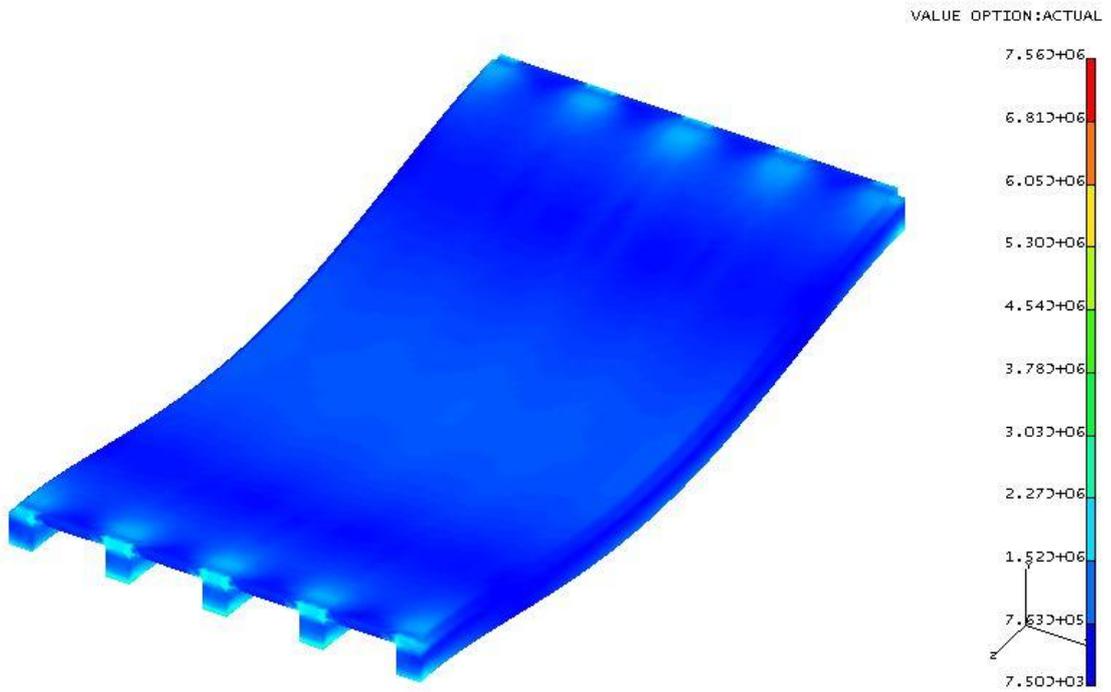


Figura 21: Mapa de tensiones

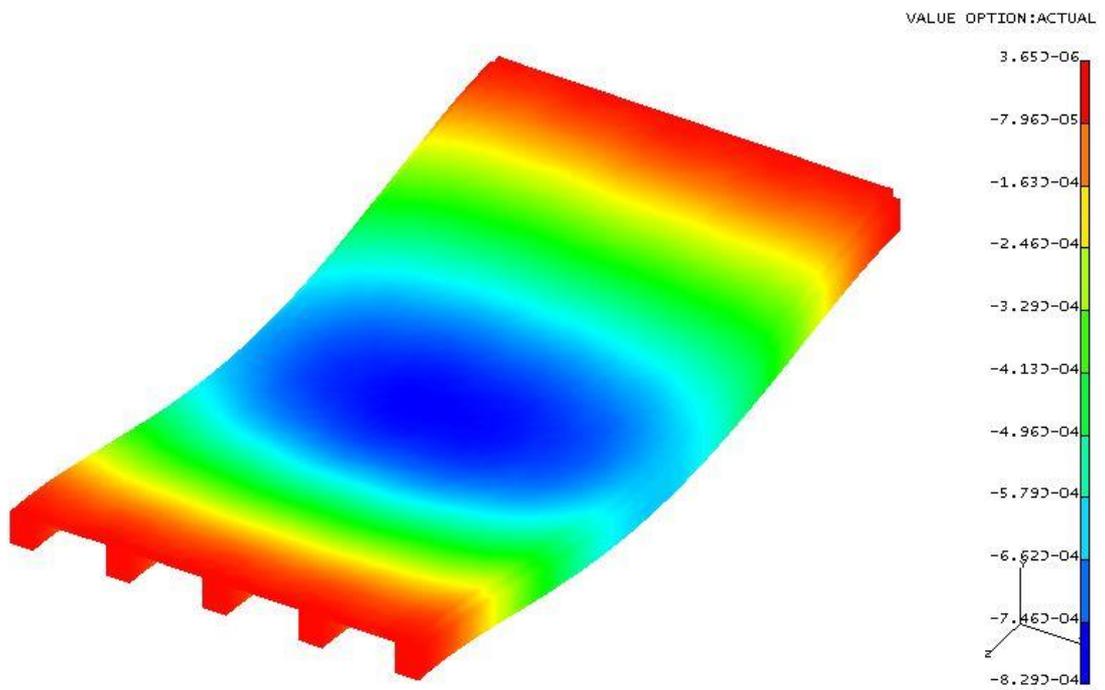


Figura 22: Mapa de deformaciones

CASO 1: Vigas de madera

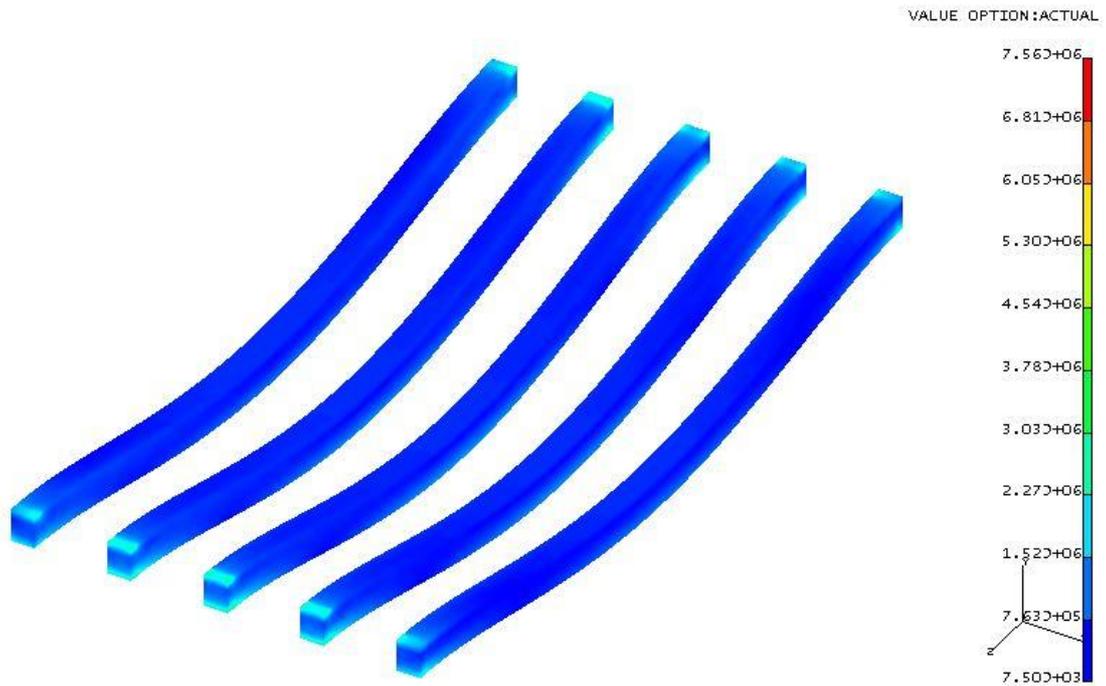


Figura 23: Mapa de tensiones

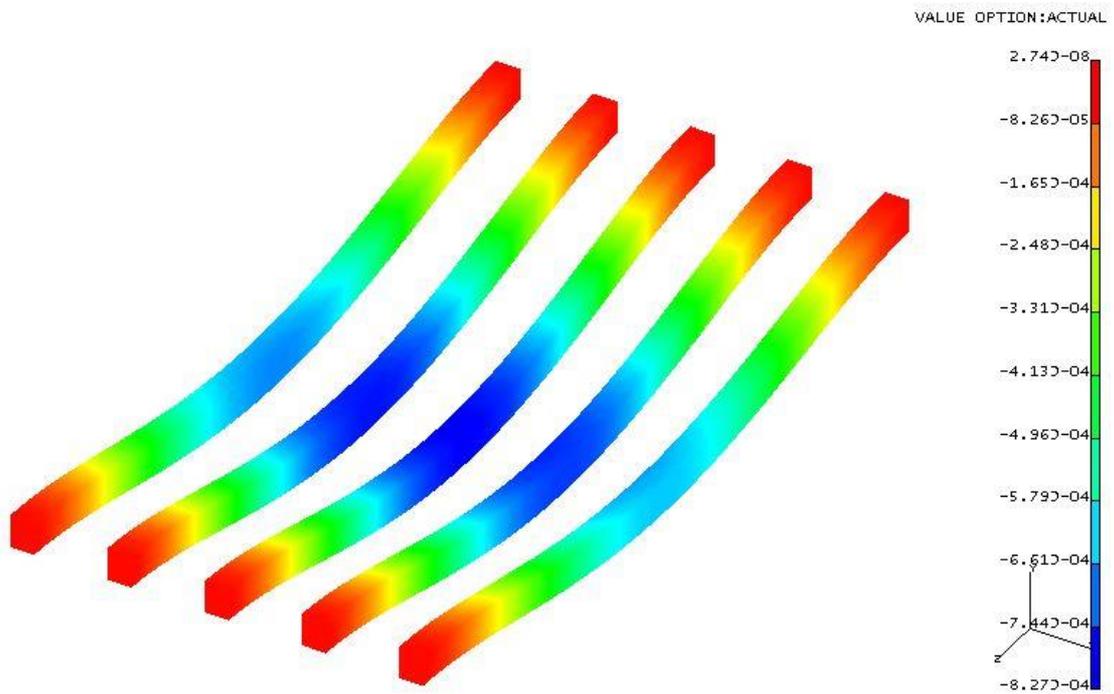


Figura 24: Mapa de deformaciones

CASO 1: Tablero de madera

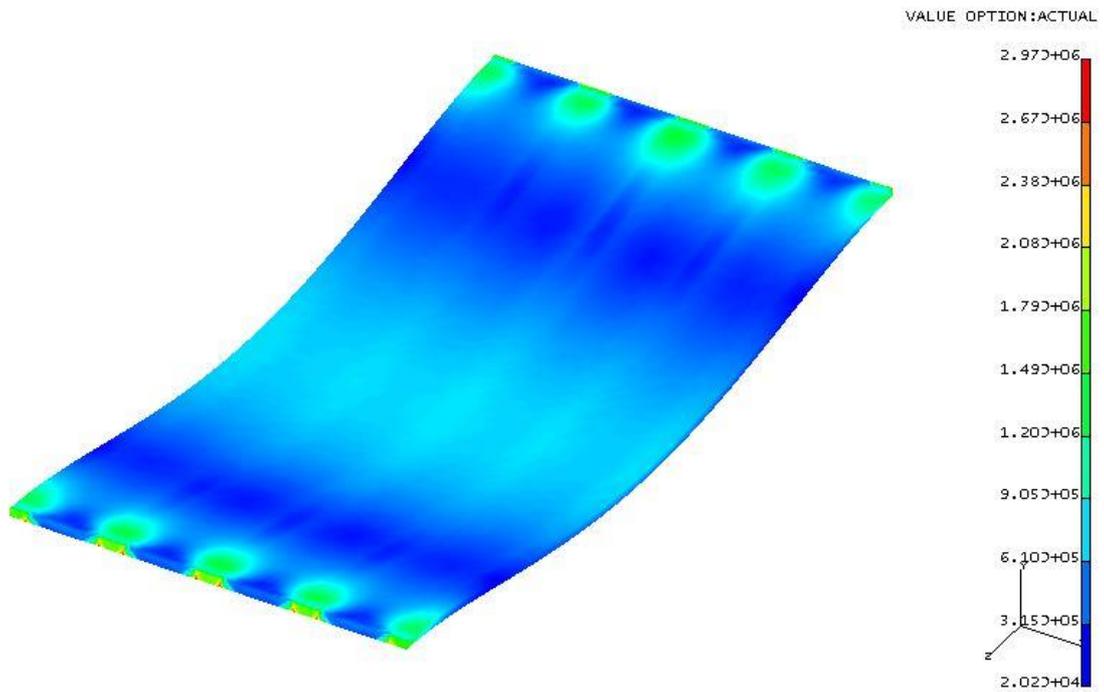


Figura 25: Mapa de tensiones

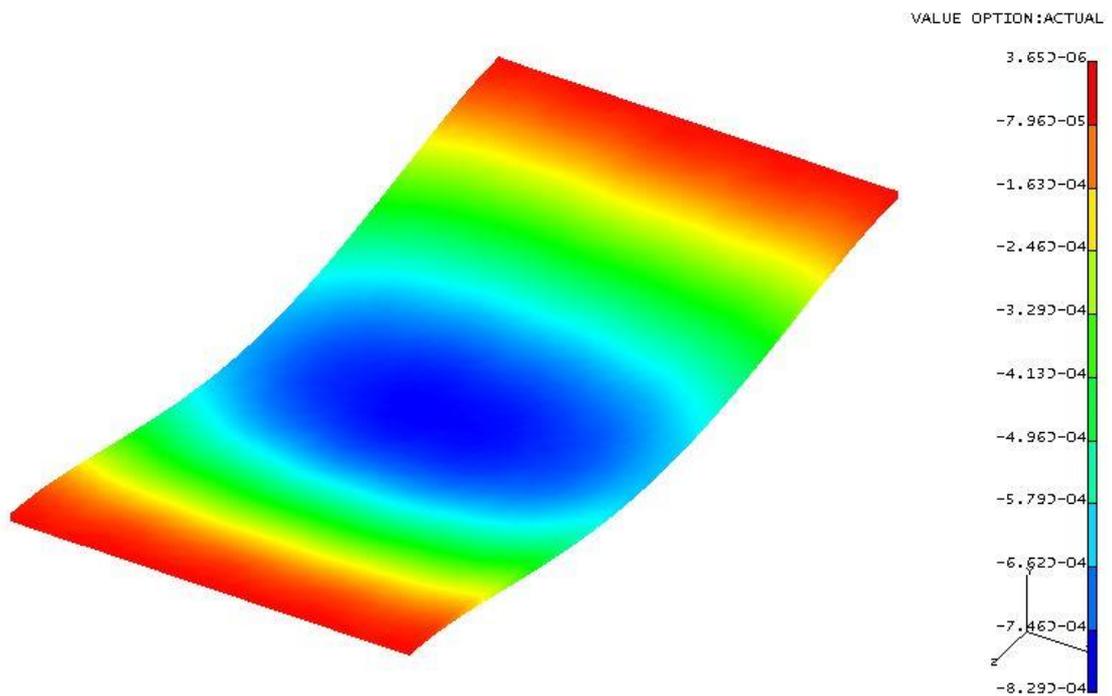


Figura 26: Mapa de deformaciones

CASO 2: Estructura completa

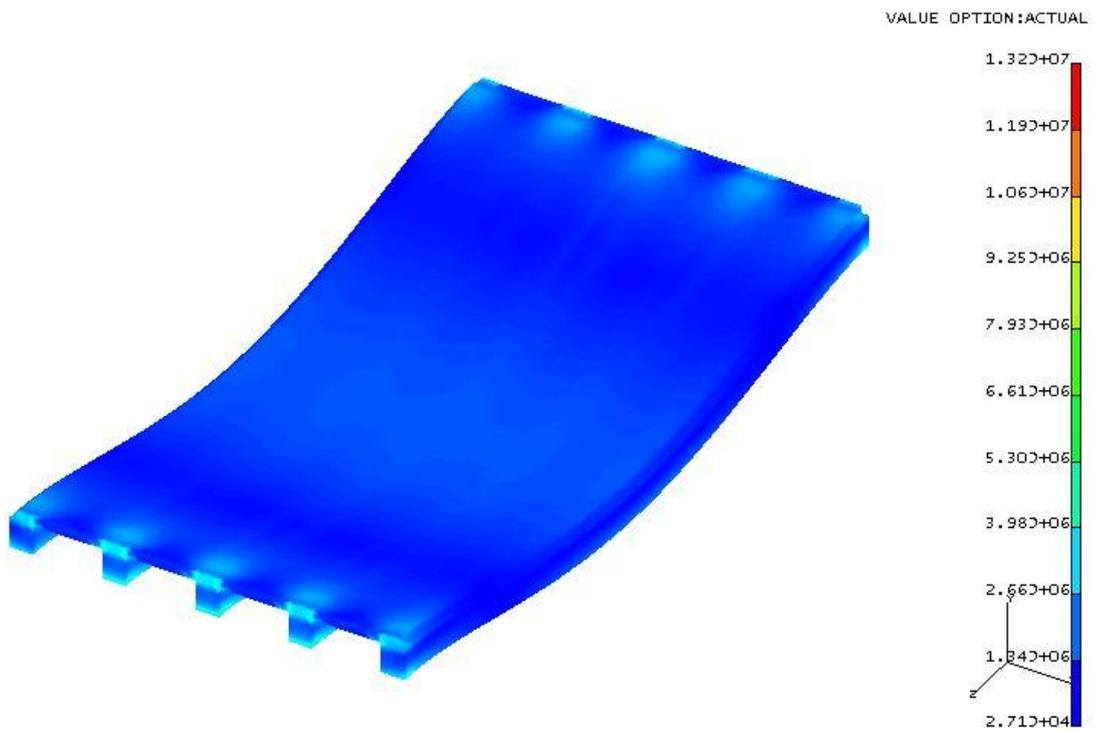


Figura 27: Mapa de tensiones

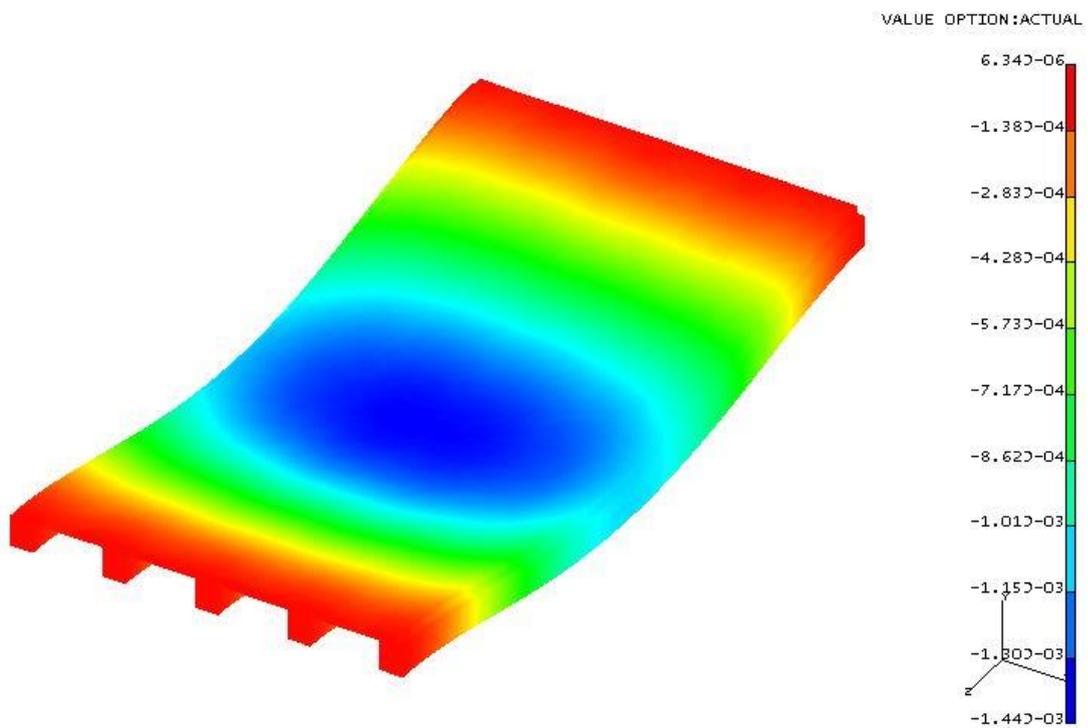


Figura 28: Mapa de deformaciones

CASO 2: Vigas de madera

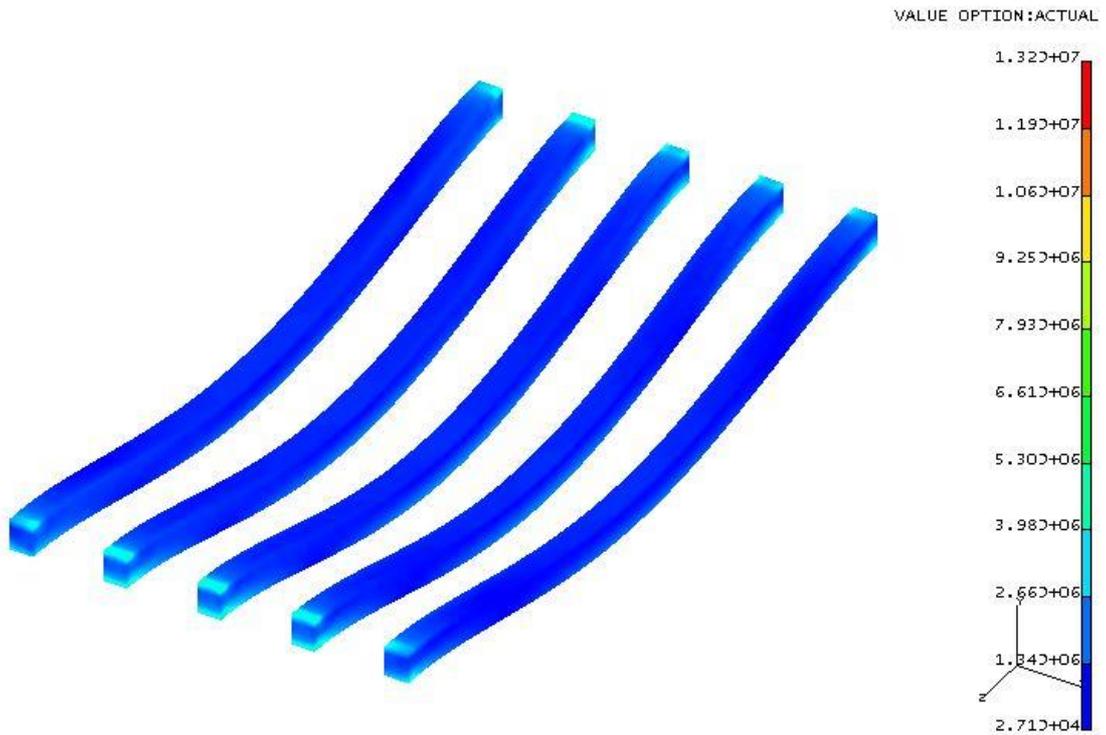


Figura 29: Mapa de tensiones

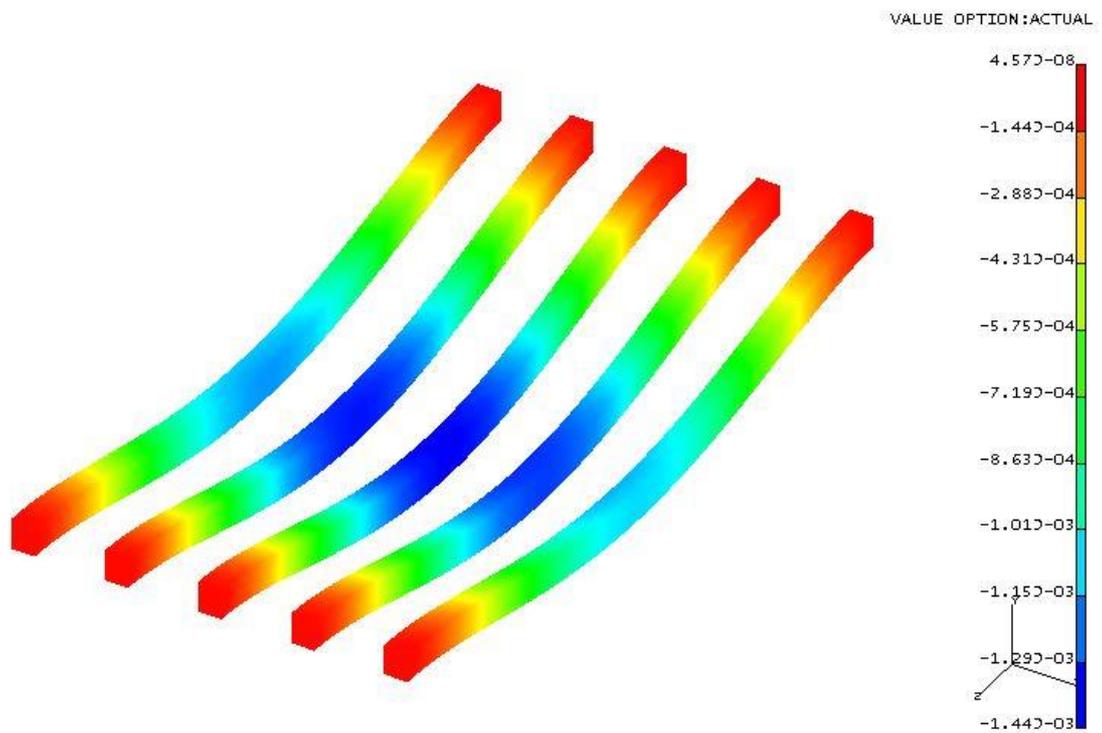


Figura 30: Mapa de deformaciones

CASO 2: Tablero de madera

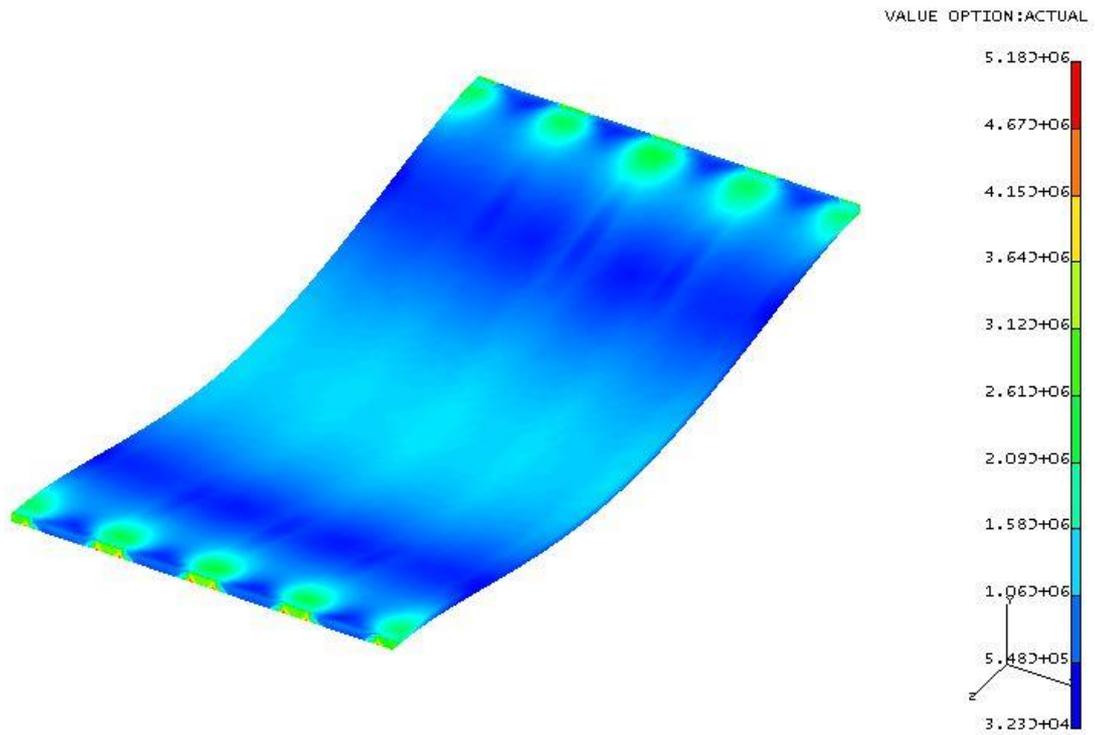


Figura 31: Mapa de tensiones

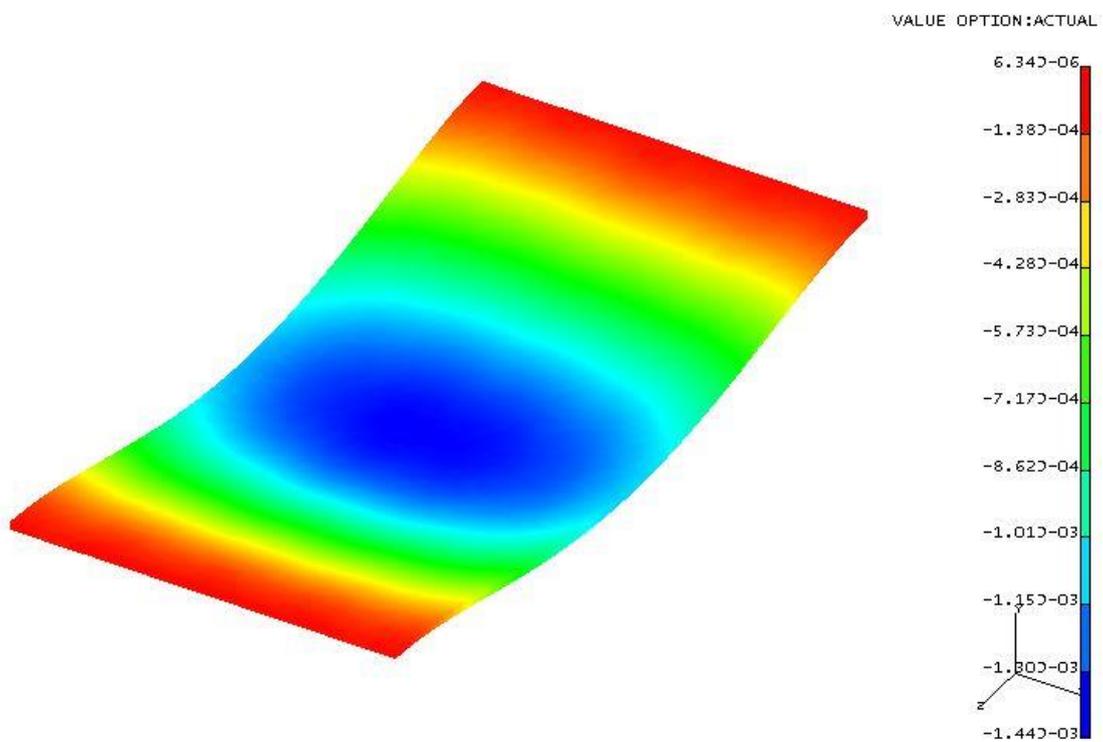


Figura 32: Mapa de deformaciones

CASO 3: Estructura completa

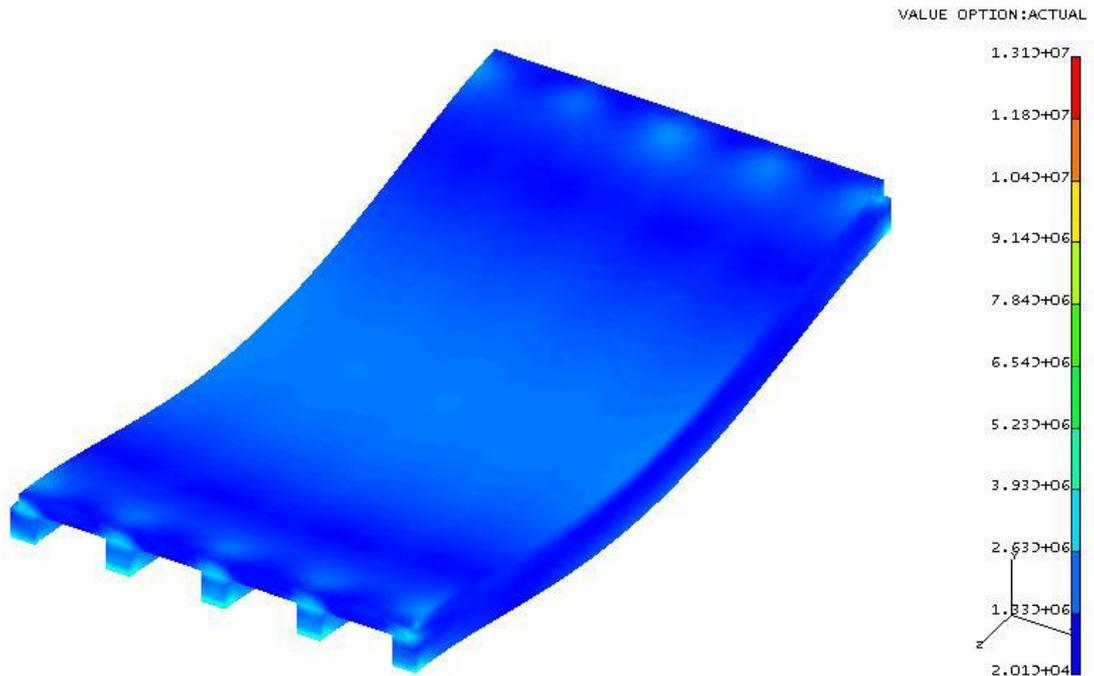


Figura 33: Mapa de tensiones

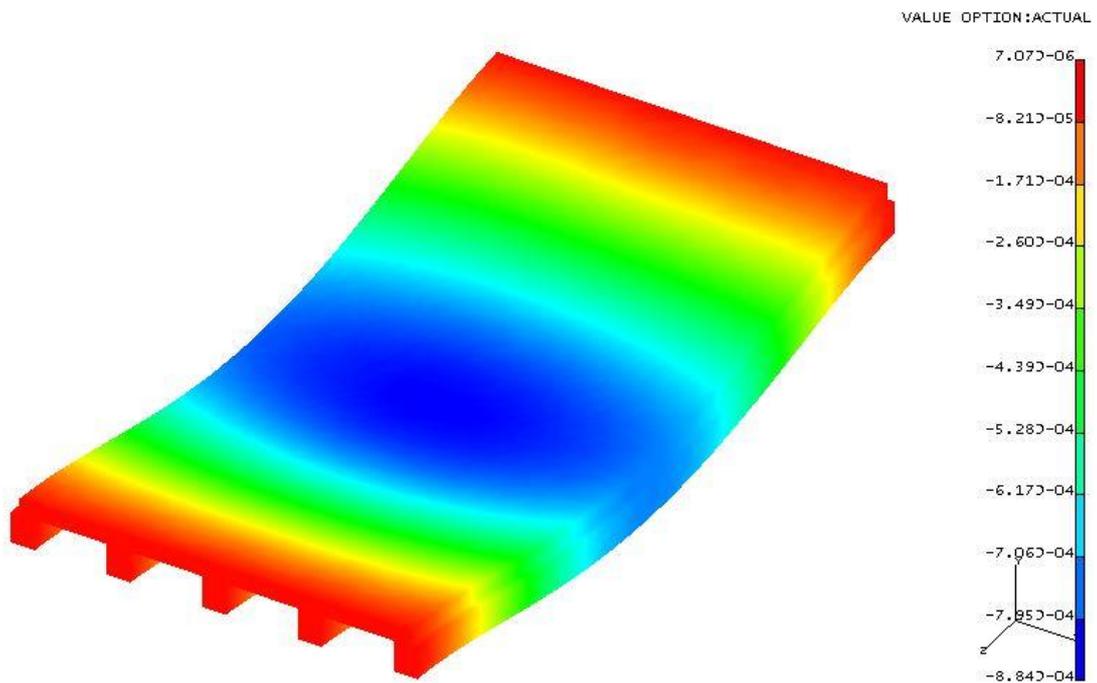


Figura 34: Mapa de deformaciones

CASO 3: Vigas de madera

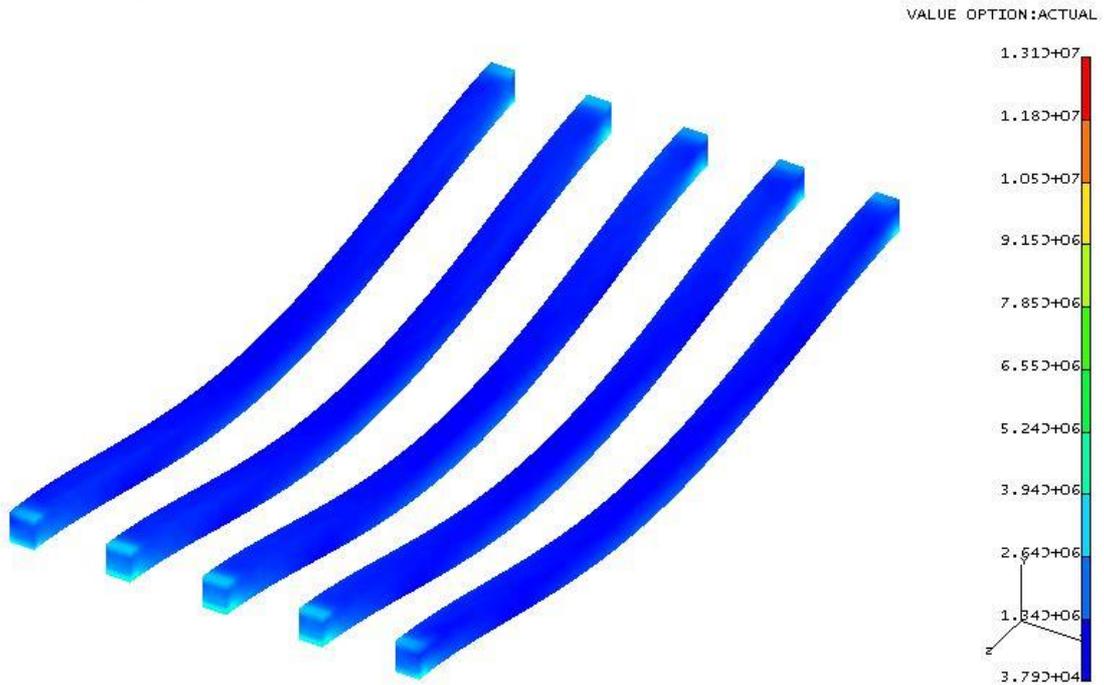


Figura 35: Mapa de tensiones

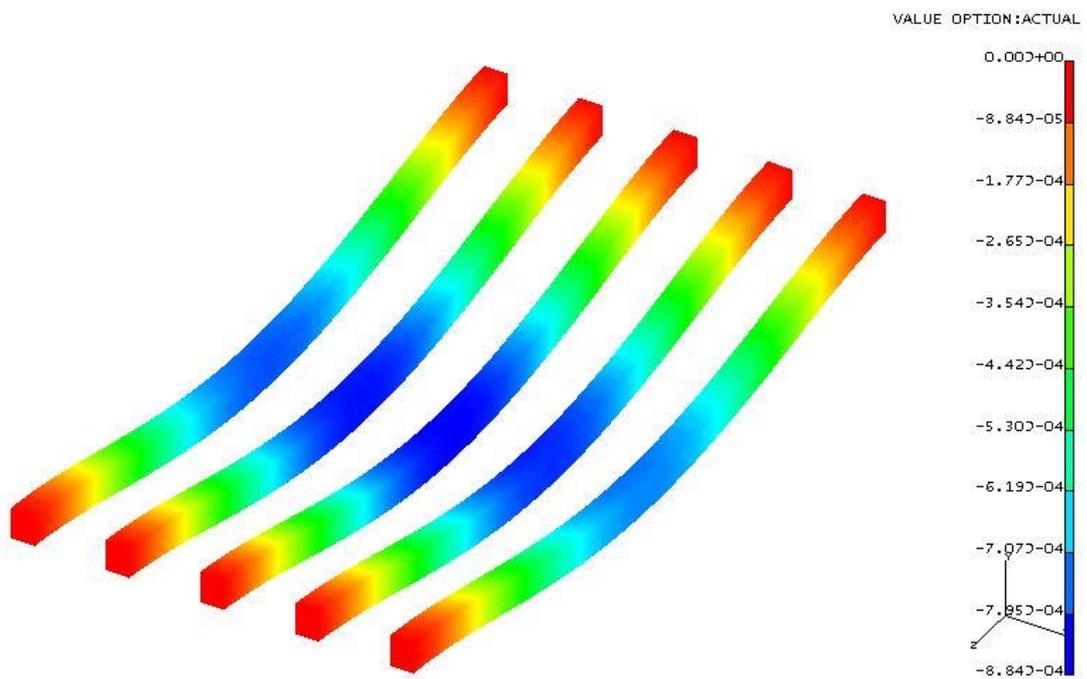


Figura 36: Mapa de deformaciones

CASO 3: Tablero de madera

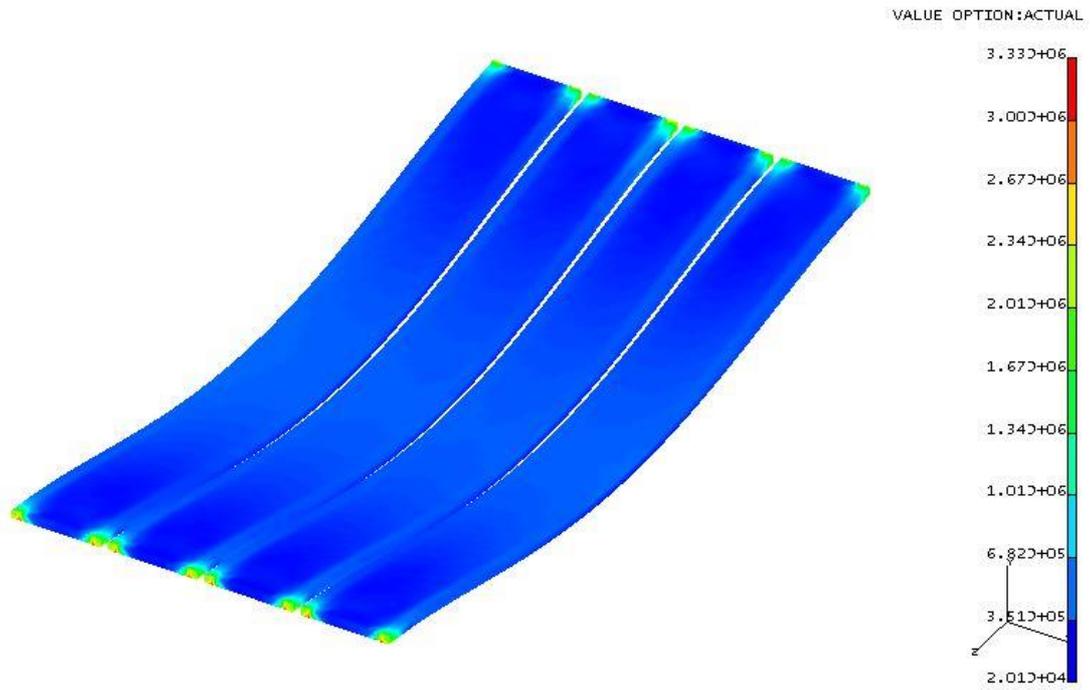


Figura 37: Mapa de tensiones

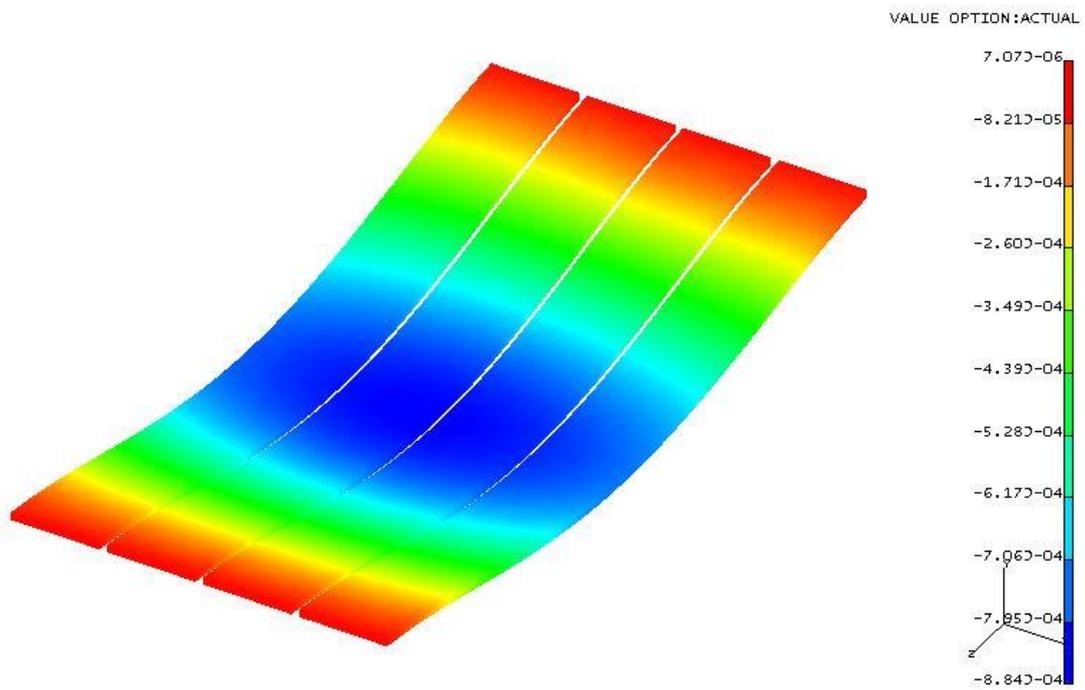


Figura 38: Mapa de deformaciones

CASO 3: Capa de hormigón

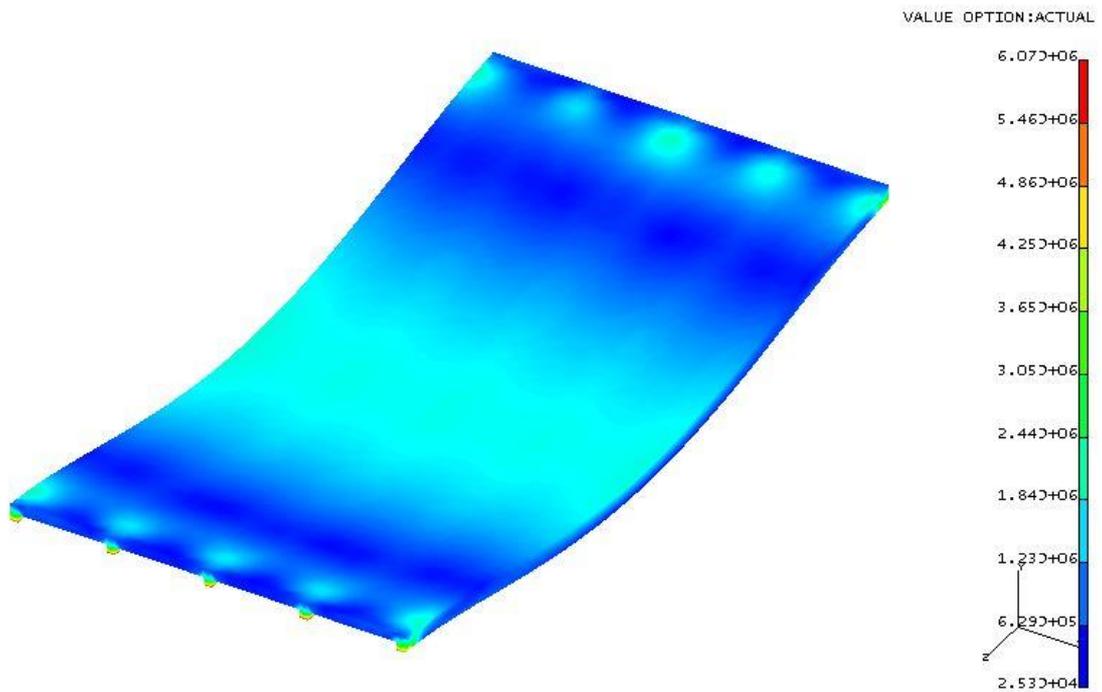


Figura 39: Mapa de tensiones

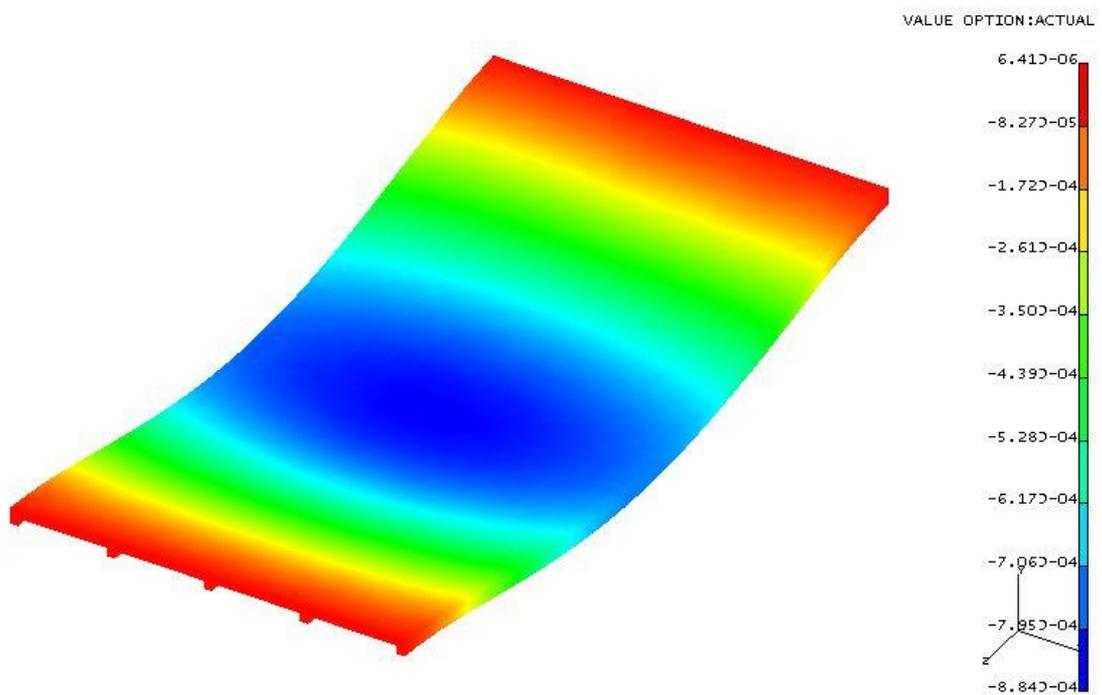


Figura 40: Mapa de deformaciones

CASO 4: Estructura completa

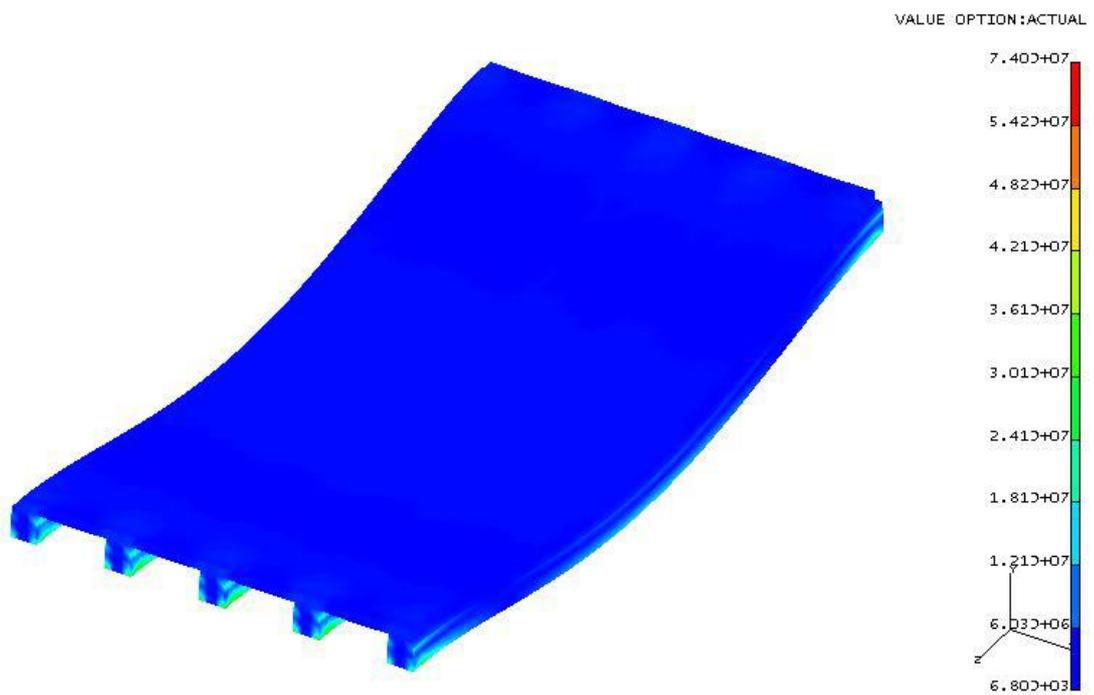


Figura 41: Mapa de tensiones

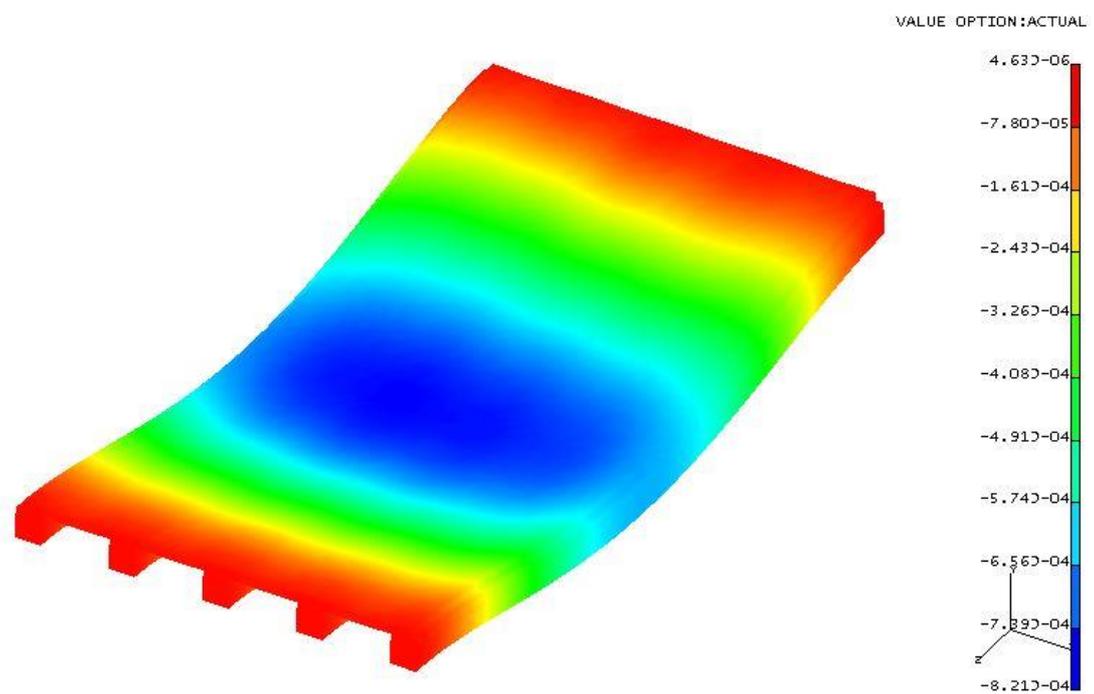


Figura 42: Mapa de deformaciones

CASO 4: Vigas de madera

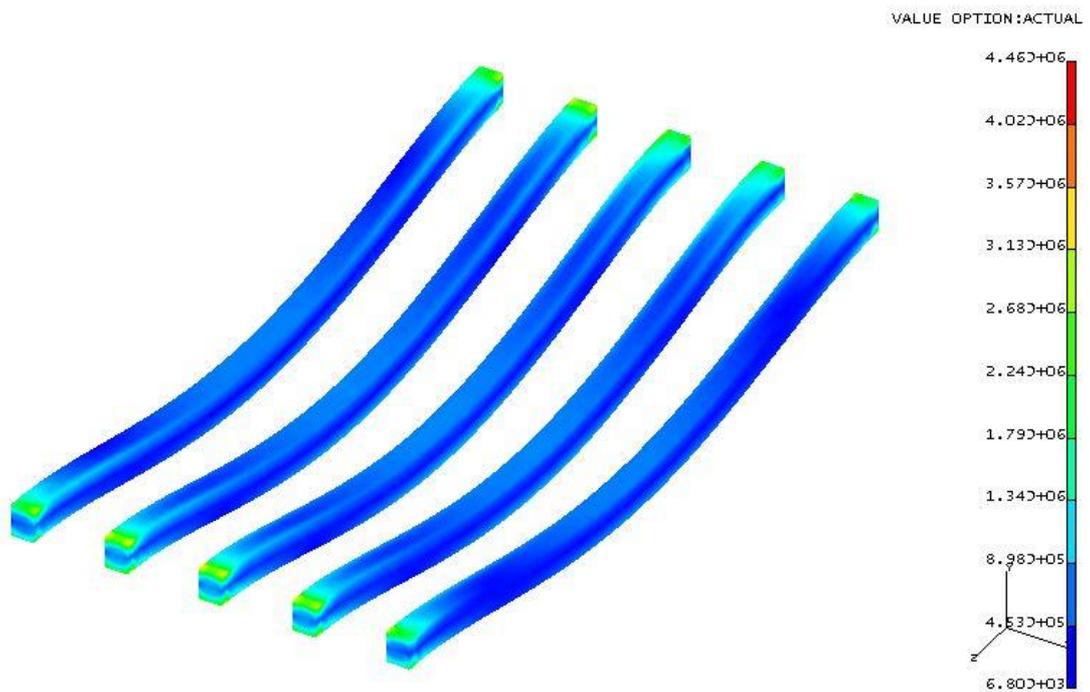


Figura 43: Mapa de tensiones

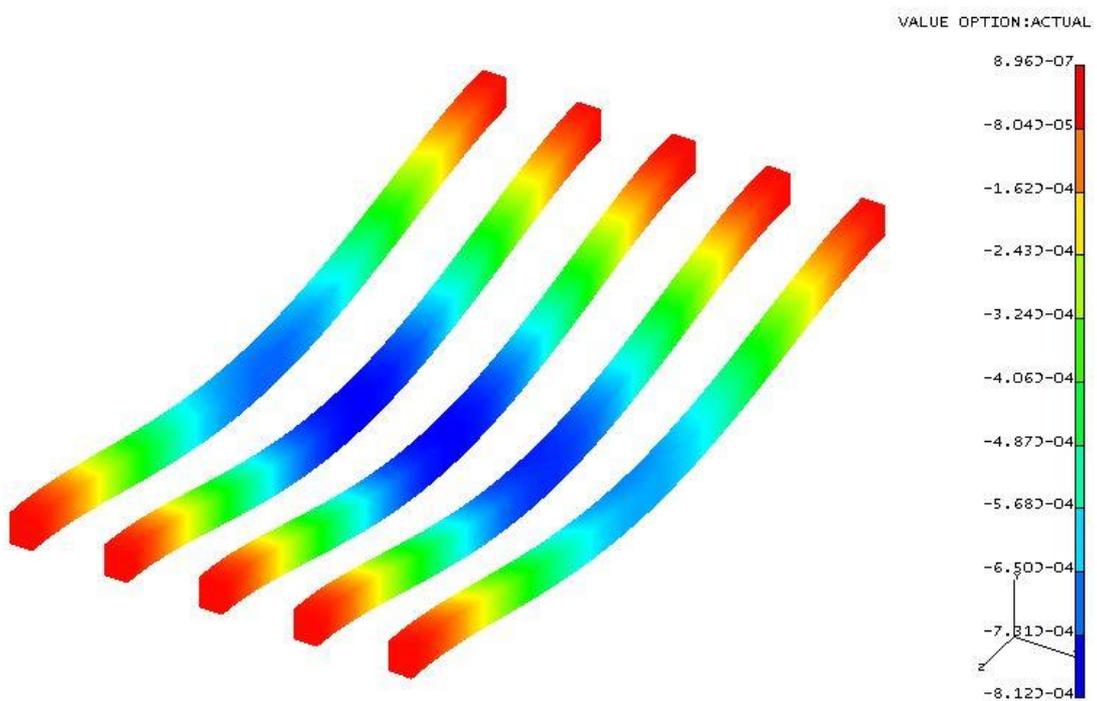


Figura 44: Mapa de deformaciones

CASO 4: Tablero de madera

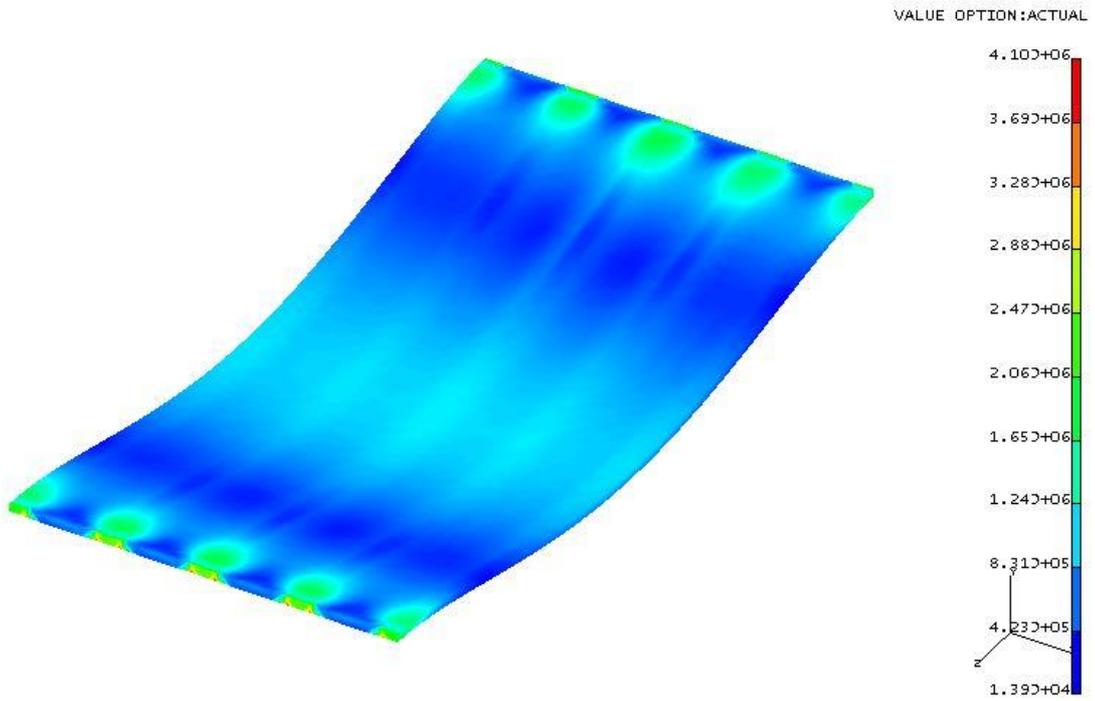


Figura 45: Mapa de tensiones

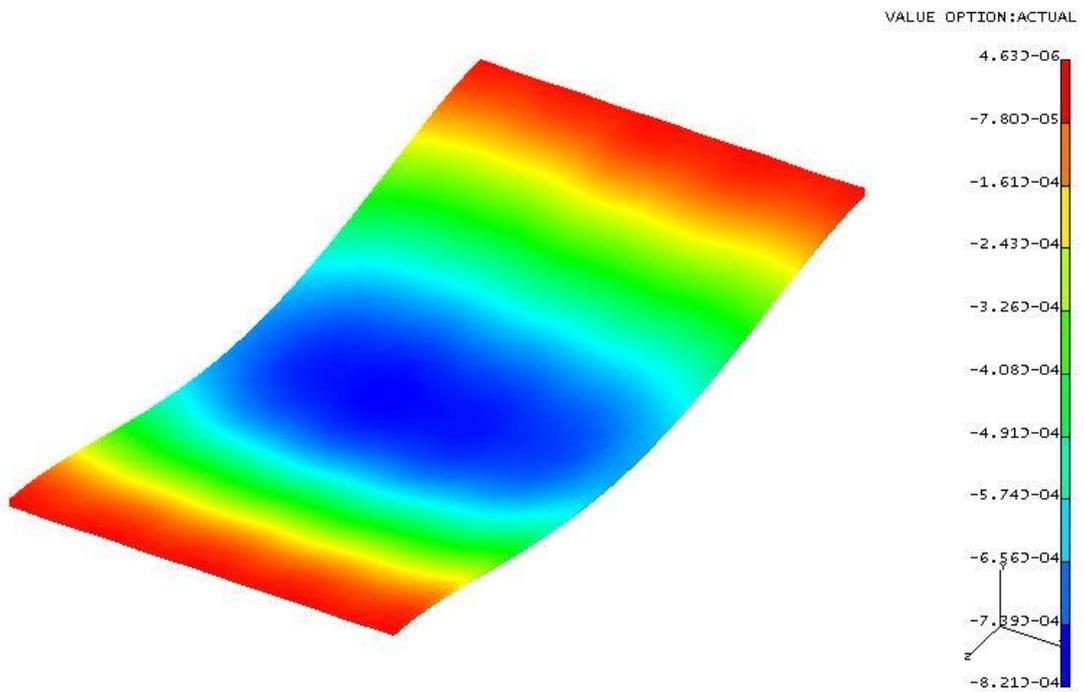


Figura 46: Mapa de deformaciones

CASO 4: Pletinas de acero

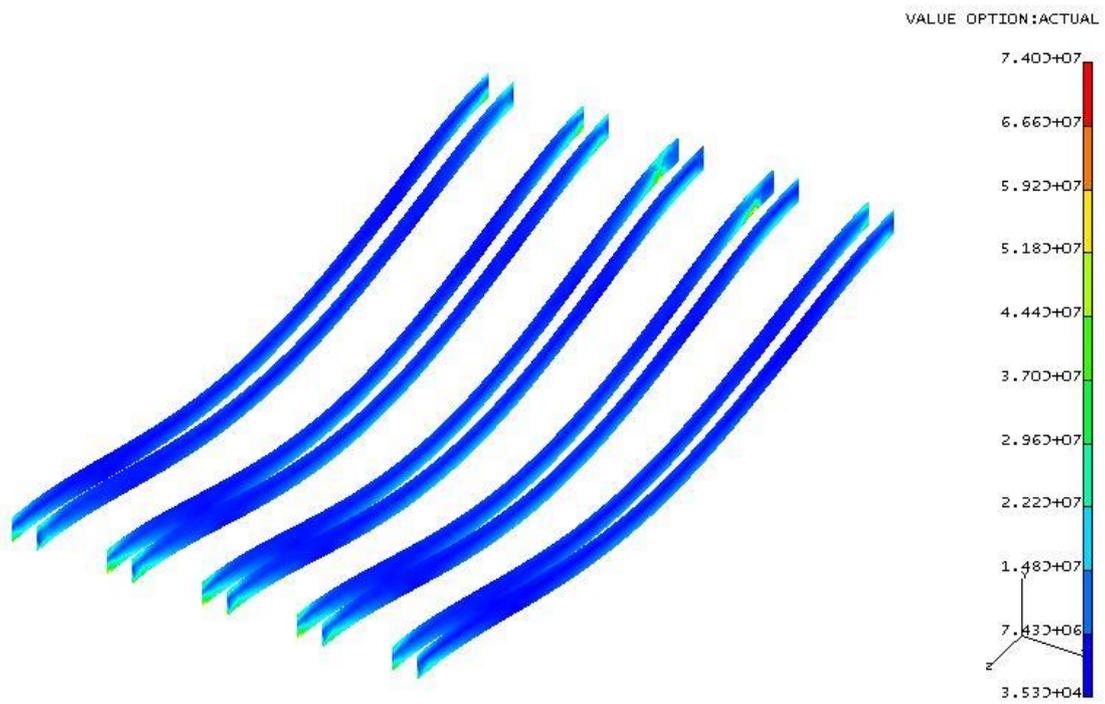


Figura 47: Mapa de tensiones

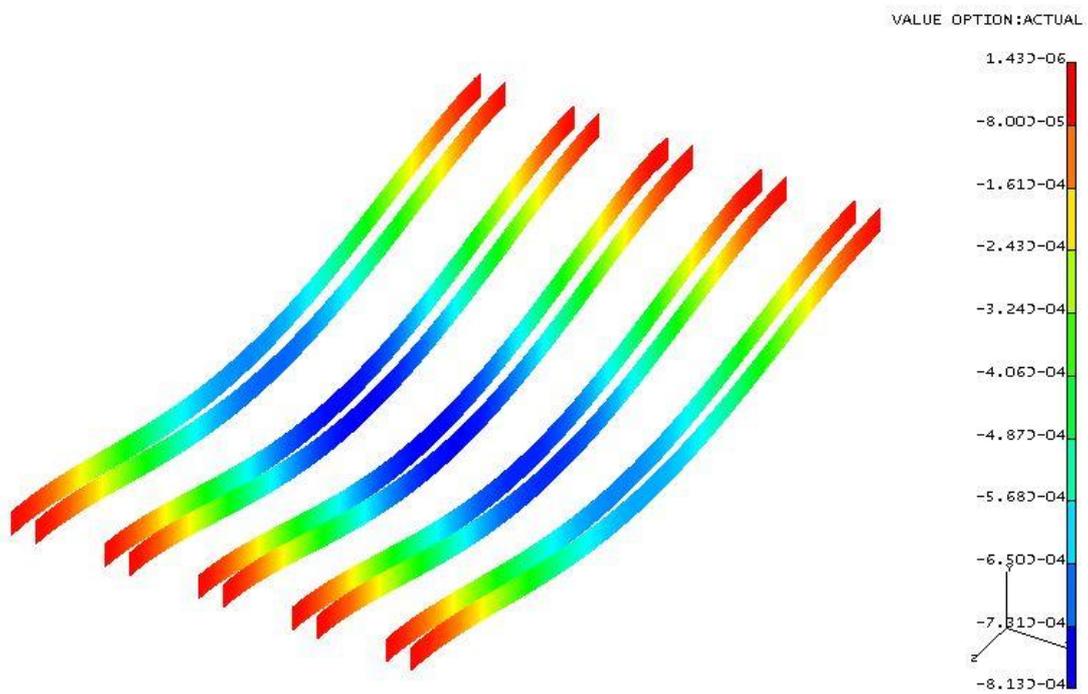


Figura 48: Mapa de deformaciones

CASO 5: Estructura completa

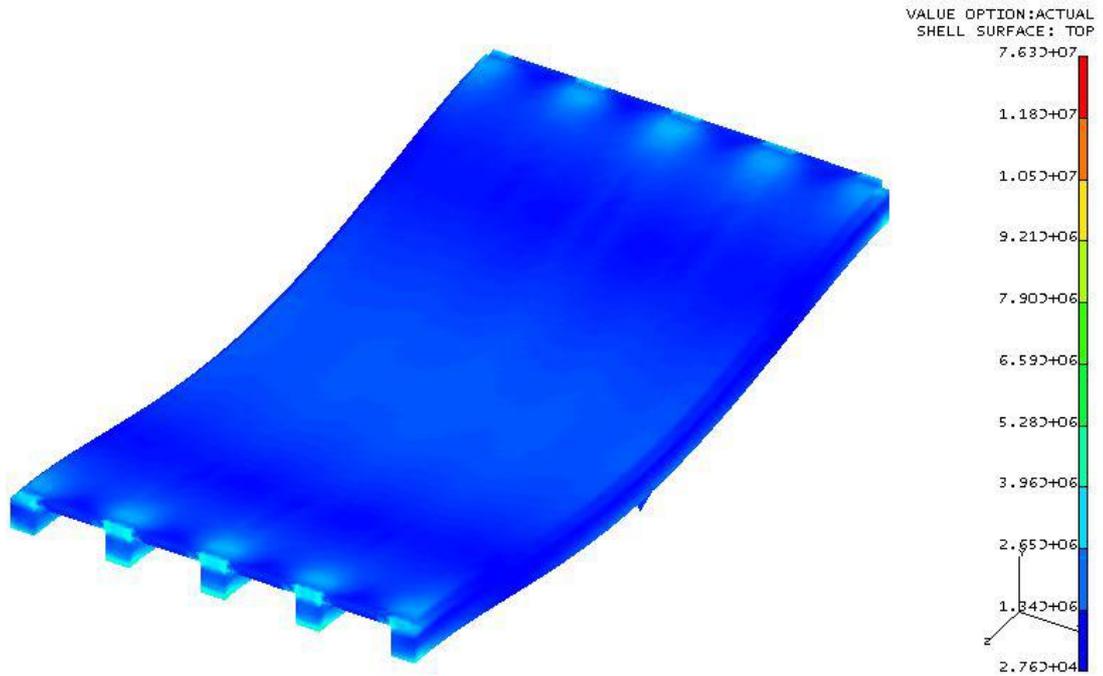


Figura 49: Mapa de tensiones

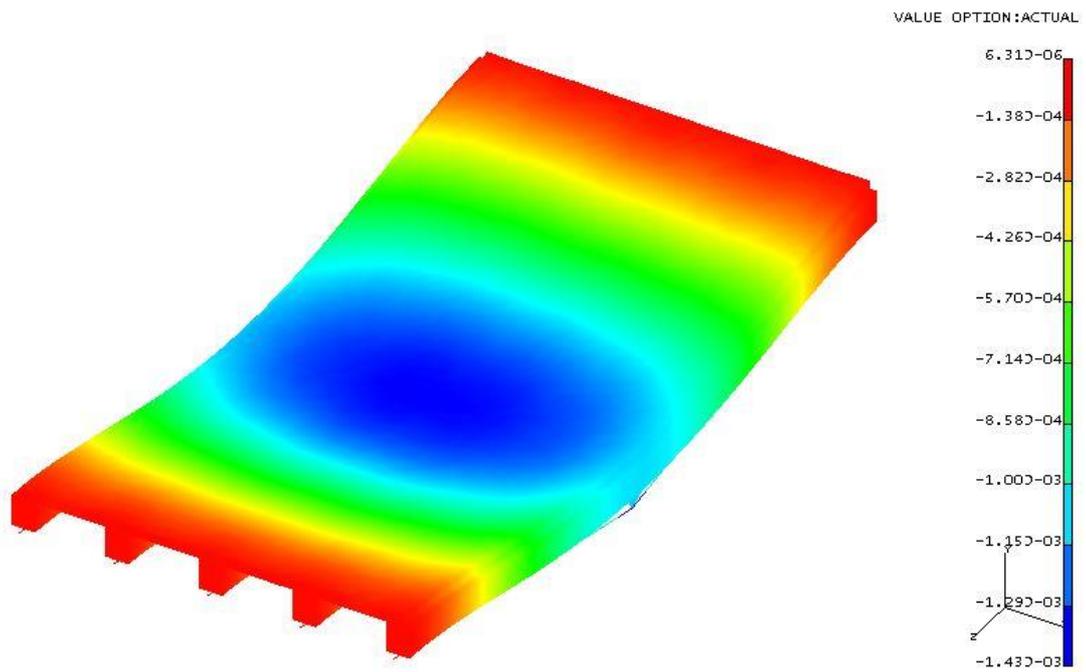


Figura 50: Mapa de deformaciones

CASO 5: Vigas de madera

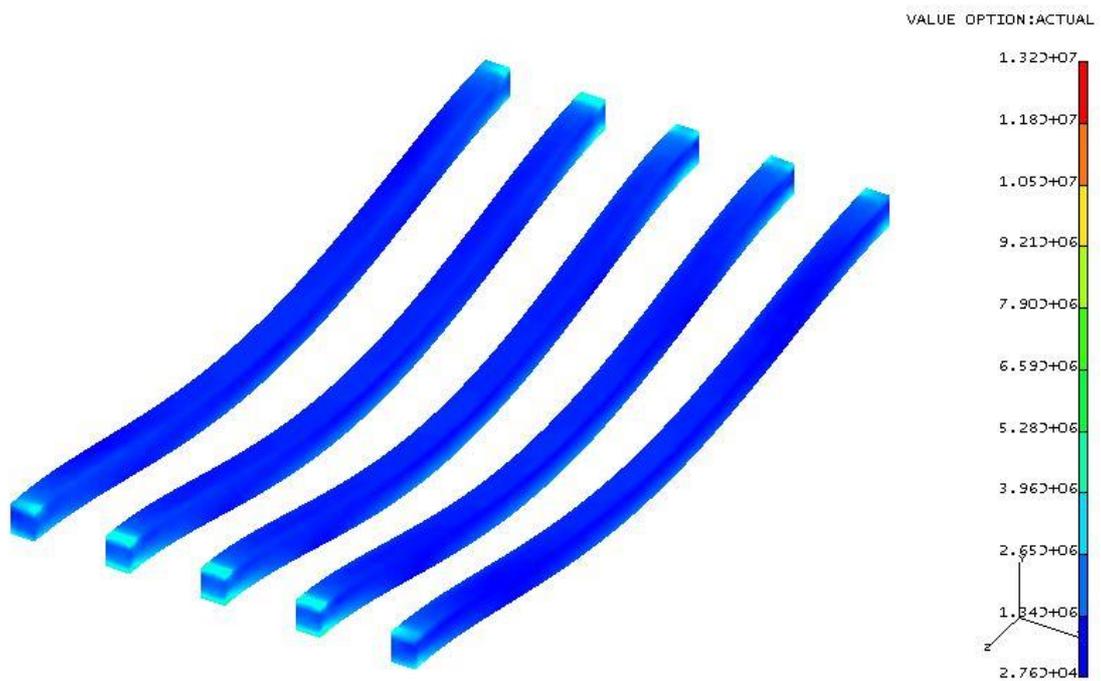


Figura 51: Mapa de tensiones

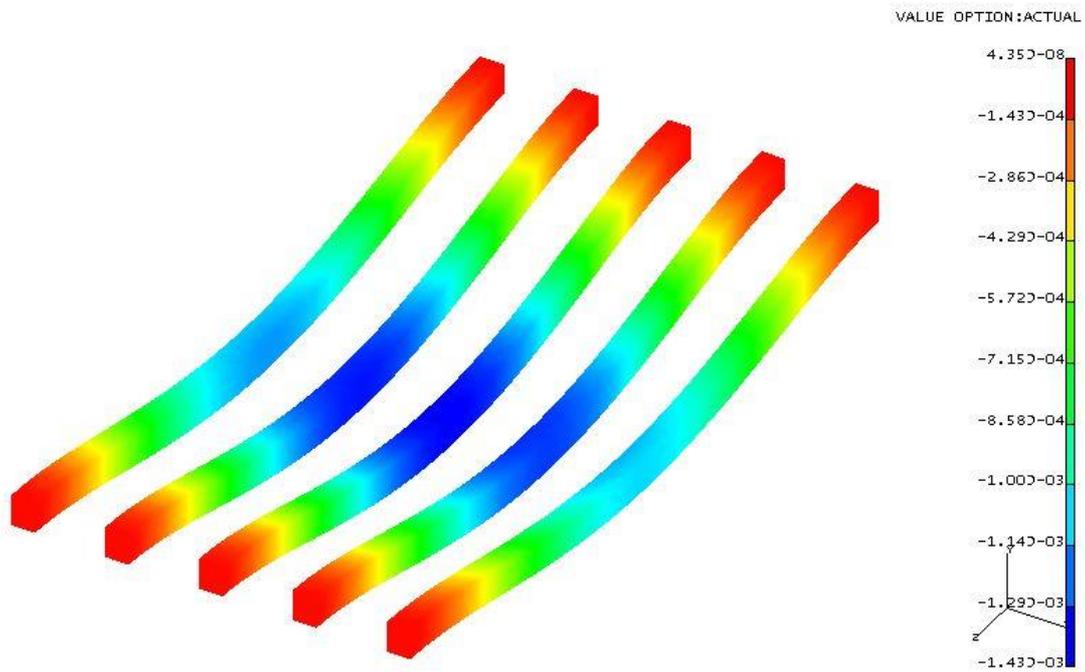


Figura 52: Mapa de deformaciones

CASO 5: Tablero de madera

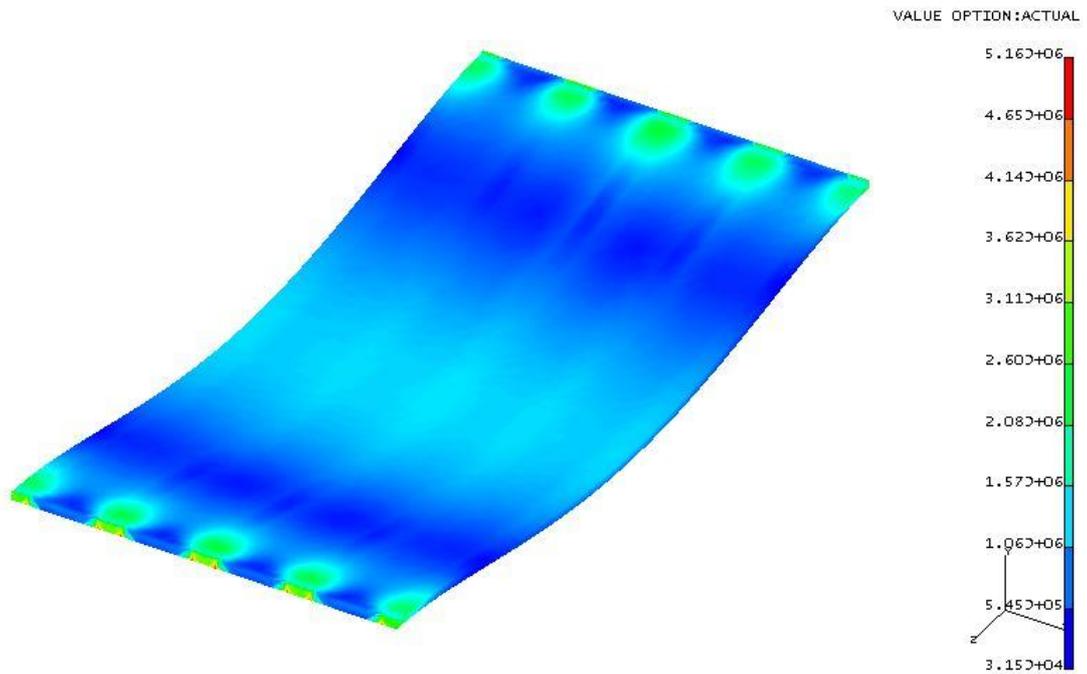


Figura 53: Mapa de tensiones

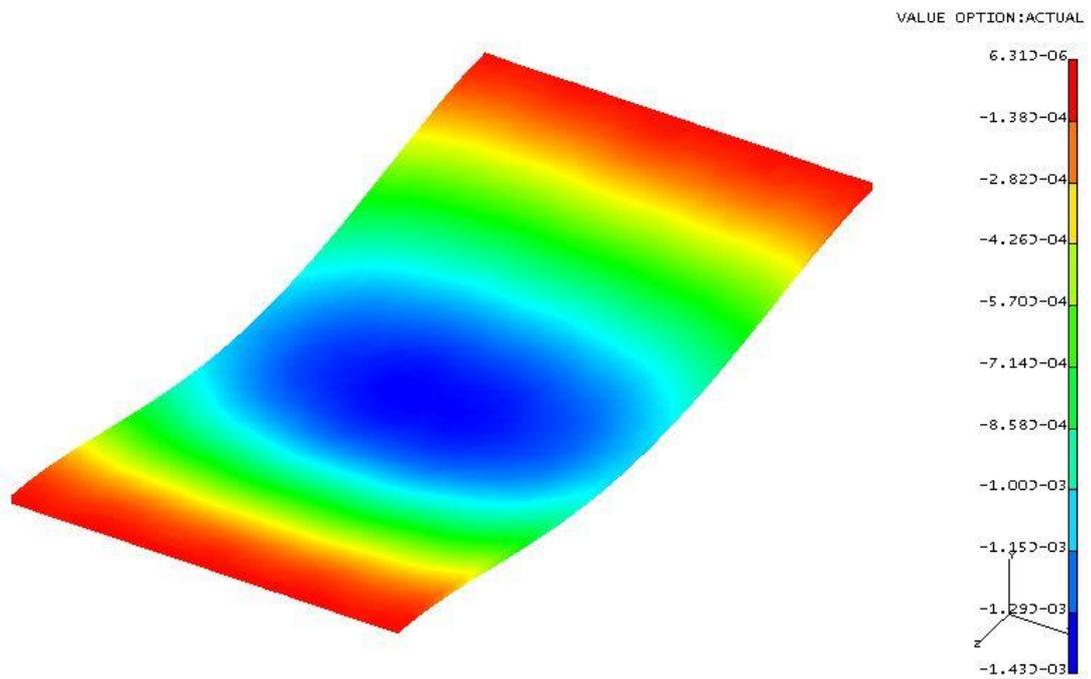


Figura 54: Mapa de deformaciones

CASO 5: Montantes de acero

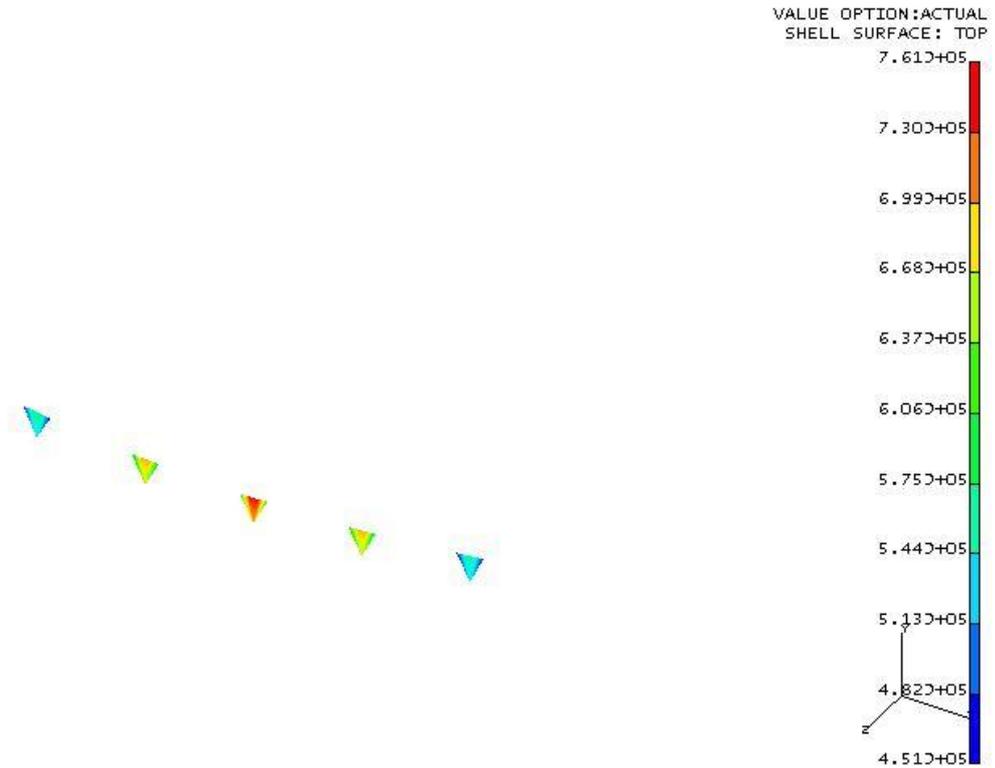


Figura 55: Mapa de tensiones

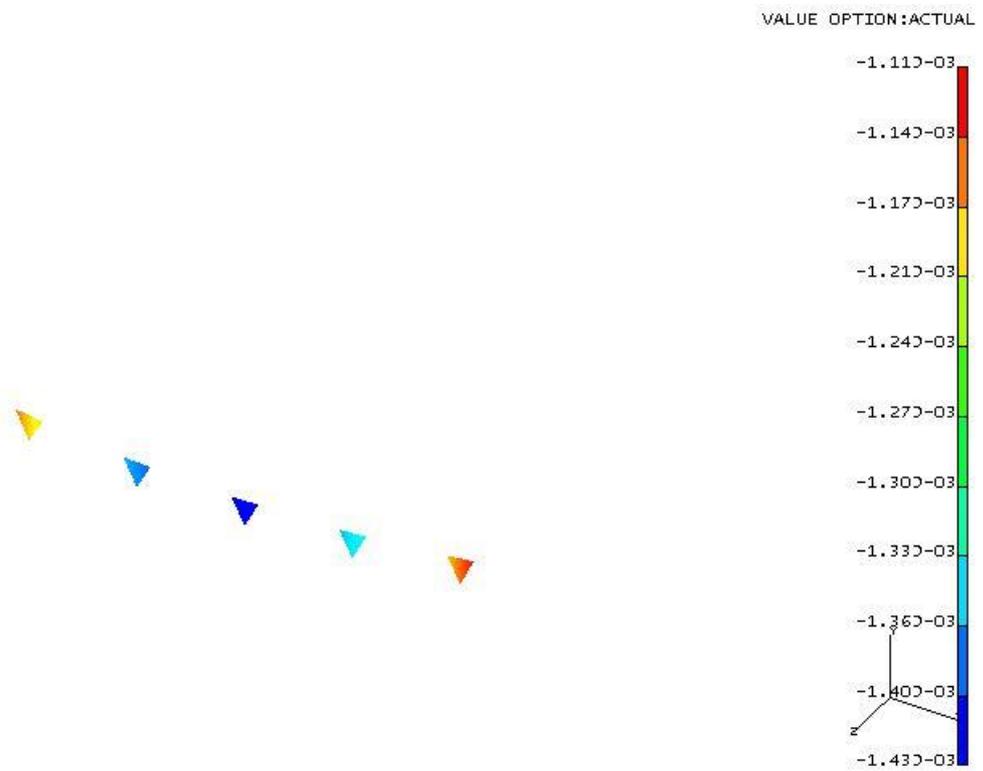


Figura 56: Mapa de deformaciones

CASO 5: Cables de acero

Data component: VON MISES STRESS at maximum point
Maximum amplitude = 76289736.0

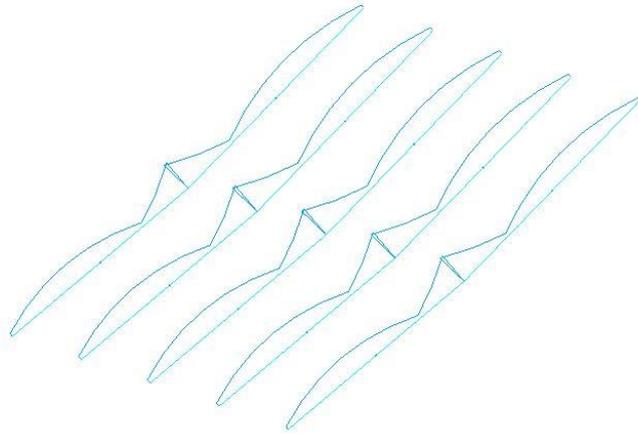


Figura 57: Mapa de tensiones

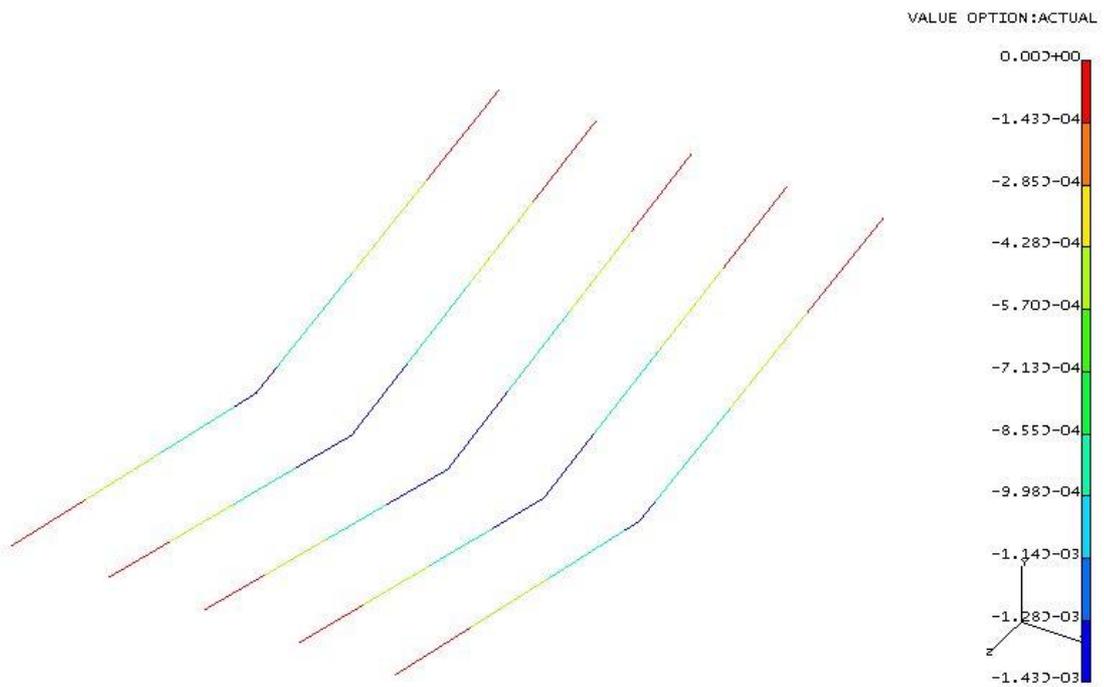


Figura 58: Mapa de deformaciones