

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
RESISTENTE DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DE VIDRIO, BAJO
ESFUERZOS DE FLEXION***

Alumno: <Urrutia, Gorostiaga, Josu>

Director 1: < Borinaga, Treviño, Roque>

Director 2: <Roji, Chandro, Eduardo>

Curso: <2018-2019>

Fecha: <20/06/2019>

ÍNDICE

ÍNDICE	1
3. INTRODUCCIÓN.....	7
4. CONTEXTO.....	8
4.1. Definición	8
4.2. Propiedades.....	10
4.3. El vidrio en la construcción	12
5. ALCANCE/OBJETIVOS	13
5.1. Alcance	13
5.2. Objetivos	14
6. BENEFICIOS DEL PROYECTO	15
7. ESTADO DEL ARTE	16
7.1. Propiedades mecánicas.....	16
7.2. Vidrios estructurales	19
7.3. Aplicaciones.....	24
7.4. Pantallas horizontales	35
8. Metodología.....	43
8.1. Definición de condiciones de carga.....	43
8.2. Fase de cálculo	47
8.3. Resultados	49

9. TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT	51
9.1. Tareas	51
9.2. Cronograma.....	53
.....	53
10. DESCARGO DE GASTOS	54
10.1. Costes de recursos humanos	54
10.2. Coste de amortizaciones	54
10.3. Coste de recursos materiales	55
10.4. Costes indirectos	55
10.5. Descargo de gastos final.....	55
11. CONCLUSIONES	57
11.1. Conclusiones.....	57
11.2. Líneas futuras	58
12. Referencias.....	59
12.1. Bibliografía	59
12.2. Web-grafía.....	60
13. Anexo I (Código técnico)	61
14. Anexo II (Resultados ANSYS).....	63
14.1. Sección de las vigas	63
14.2. Pantallas de vidrio	65
14.3. Vigas	66

RESUMEN TRILINGUE

Título del trabajo: Estudio del comportamiento resistente de elementos estructurales de vidrio, bajo efectos de flexión.

Resumen: El uso del vidrio en la construcción ha ido en aumento en los últimos años, pero todavía hay elementos estructurales en los que no es muy utilizado. Debido a las dificultades que supone, el vidrio se usa rara vez en elementos a flexión, como las vigas, y el desarrollo de estos elementos podría aportar mejoras sensibles en el ámbito de la edificación. Por ello, en este trabajo se estudia su viabilidad y se sientan las bases para que, en un futuro, tras más investigación, puedan ser implementadas regularmente.

Izenburua: Flexioaren ondoriozko portaera erresistentearen azterketa, beirazko egitura elementuetan.

Laburpena: Eraikuntzan, beiraren erabilera gero eta handiagoa izan arren, oraindik badaude egitura elementuak non ez den asko erabiltzen. Hainbat arazo direla eta, flexioan lan egiten duten elementuetan, gutxi erabiltzen da, eta elementu horien garapena, hobekuntza nabarmenak ekar ditzake eraikuntzaren esparruan. Hori dela eta, lan honetan, bere bideragarritasuna aztertuko da eta etorkizunean, ikerketa gehiago burututa, inplementatu ahal izateko oinarriak ezarriko dira.

Title: Study of the resistant behavior of structural glass elements, under bending effects.

Abstract: The use of glass in construction has been increasing in recent years, but there are still structural elements in which it is not widely used. Due to the difficulties involved, the flexural elements are the ones in which it is more rarely use, and the development of these elements could bring about significant improvements in the field of construction. For this reason, in this work its feasibility is studied and the foundations are laid down so that, in the future, after more research, they can be implemented regularly.

LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS

Figuras

Figura 2.1 Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos. Pág. 10. [3]

Figura 2.2 Grafico que muestra la resistencia al choque térmico de distintos materiales. Pág. 11. [3]

Figura 5.1 Distribución de tensiones en una lámina de vidrio templado. Pág. 20. [3]

Figura 5.2 Muestra de vidrio laminado. Pág. 21. [21]

Figura 5.3 Comparativa del comportamiento de los polímeros a diferentes temperaturas. Pág. 22. [5]

Figura 5.4 Comparativa de la resistencia entre varios tipos de vidrio. Pág. 23. [5]

Figura 5.5 Edificio con fachada de vidrio. Pág. 25. [20]

Figura 5.6 Barandilla de vidrio. Pág. 26. [13]

Figura 5.7 Sujeciones de una barandilla de vidrio. Pág. 27. [14]

Figura 5.8 Barandillas fijadas a través. Pág. 27.

Figura 5.9 Muestra de muro cortina. Pág. 28. [22]

Figura 5.10 Muro cortina con perfiles metálicos. Pág. 29. [23]

Figura 5.11 Acristalamiento estructural exterior. Pág. 30. [1]

Figura 5.12 Araña de cuatro brazos. Pág. 31. [1]

Figura 5.13 Botón utilizado para fijar. Pág. 32. [1]

Figura 5.14 Unión mecánica por fuerza. Pág. 32. [1]

Figura 5.15 Muestra de las distintas juntas de dilatación. Pág. 33. [1]

Figura 5.16 Tipos de fijaciones para fachadas. Pág. 34. [1]

Figura 5.17 Distintas posibilidades de fijación. Pág. 34. [1]

Figura 5.18 Glacier skywalk en Columbia. Pág. 35. [17]

Figura 5.19 Salida de la estación de metro Internacional de Tokio. Pág. 36. [1]

Figura 5.20 Escaleras de la tienda de Apple de la quinta avenida de Nueva York. Pág. 37. [18]

Figura 5.21 Puente con suelo de vidrio en Zhangjiajie. Pág. 38. [19]

Figura 5.22: Esquema del estado de tensión de una viga pretensada. Pág. 39. [10]

Figura 5.23: Imagen conceptual de una unión metálica entre dos vigas vítreas. Pág. 39. [6]

Figura 5.24: Cobertizo de invernadero en The Hage. Pág. 40. [6]

Figura 5.25: Modelo de las vigas usadas en el ensayo. Pág. 41. [2]

Figura 6.1: Distribución tensional en la viga de sección cuadrada. Pág. 45.

Figura 6.2: Distribución tensional en la viga de sección doble T. Pág. 45.

Figura 6.3: Muestra de cómo se ha aplicado la presión sobre las vigas. Pág. 47.

Figura 7.1: Diagrama de Gantt. Pág. 52.

Anexo II: Figuras que muestran la distribución de tensiones y las deformaciones en las vigas probadas.

Tablas

Tabla 6.1: Valores de la presión aplicada.

Tabla 6.2: Propiedades mecánicas de los materiales usados.

Tabla 6.3: Resultados de las vigas con luz de 5 metros.

Tabla 6.4: Resultados de los cálculos para obtener la luz máxima.

Tabla 8.1 Partida de costes de recursos humanos.

Tabla 8.2 Partida de costes de amortizaciones.

Tabla 8.3 Partida de costes de gastos.

Tabla 8.4 Partida total de descargo de gastos.

Anexo I: Tablas extraídas del código técnico.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se expone el Trabajo de Fin de Grado (TFG) titulado “Estudio del comportamiento resistente de elementos estructurales de vidrio, bajo efectos de flexión” realizado para la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

El documento consiste en un análisis sobre la viabilidad de elementos estructurales de vidrio que estén bajo efectos de flexión.

Primero se definirá el vidrio y sus propiedades con objetivo de crear un contexto para posteriormente abordar su uso en la construcción.

Una vez introducido el vidrio, se define el alcance y los objetivos del trabajo, sin olvidar los beneficios que se esperan conseguir con el desarrollo del TFG.

Posteriormente, se desarrolla un estado del arte sobre vidrio estructural, en el que se empieza exponiendo las configuraciones más utilizadas, detallando en cada una la responsabilidad estructural en la que se encuentra. Para posteriormente, acercar el tema hacia el punto focal de nuestro estudio (los elementos a flexión). Para concluir, se expondrán las diferentes alternativas que se han encontrado a la hora de constituir elementos a flexión.

A continuación, a todas estas alternativas se les hará un análisis estructural preliminar para determinar los pros y los contras que cada una de ellas tendrá, determinando así también su viabilidad. Para ello, se utilizará el programa de elementos finitos ANSYS.

Este estudio también incluye un desglose de los gastos derivados del trabajo y una planificación, representada en un diagrama de Gantt, que muestra la duración de todas las tareas realizadas durante la realización del trabajo.

Por último, se exponen las conclusiones extraídas a través del estudio de los resultados obtenidos y se explica la repercusión que pueda tener.

2. CONTEXTO

El vidrio es un material duro, frágil, transparente y amorfo, que existe desde que la corteza terrestre se solidificó, y es formado tras la fusión de las rocas como resultado de las altas temperaturas creadas por fenómenos tales como erupciones volcánicas y rayos.

El uso que los humanos le han dado a este material ha ido avanzando desde el periodo neolítico hasta hoy en día. Pasando de ser utilizado para fabricar joyas, decoraciones y armas hasta los muchos usos que se le da en la actualidad.

2.1. Definición

La amplia denominación de vidrios o de cuerpos vítreos engloba a una gran variedad de sustancias que, aunque a temperatura ambiente aparentan ser cuerpos sólidos, no pueden considerarse como tales, ya que carecen de la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido.

Aunque por su estabilidad puedan parecerse a los sólidos, su estructura interna tiene una mayor semejanza a la de los líquidos. Este hecho, hace que no sea posible categorizar a los cuerpos vítreos como sólidos ni líquidos, pero se puedan considerar como líquidos de viscosidad infinita.

La dificultad para encuadrar adecuadamente a los cuerpos vítreos dentro de uno de los tres estados de la materia dio lugar a que se pensara independizar a los vidrios integrándolos en un cuarto estado: el estado vítreo. Esta categorización nunca llegó a ser aceptada generalmente.

Una particularidad de los vidrios es su comportamiento frente a la solidificación, la cual es diferente a la de un material cristalino. Los vidrios carecen de un verdadero punto de fusión que sólo presentan los sólidos cristalinos (ver figura 4.1) y que es la temperatura a la cual la fase cristalina coexiste en equilibrio con la fase fundida. Los cuerpos vítreos pasan de un modo reversible de su forma fundida en estado líquido, la cual es plástica y elástica, al estado rígido sin la aparición de ninguna nueva fase en el sistema.

Si se parte de un concepto de cuerpo sólido que prescindiera de la cristalinidad y se base exclusivamente en determinadas propiedades físicas, podría aplicarse a los vidrios el nombre de sólidos amorfos, con tal de que esta denominación se reservara para bajas temperaturas. La mayor objeción contra ella surgiría si se intentara aplicar también a las temperaturas en que aquéllos se vuelven plásticos. Por otra parte, se ha comprobado que los vidrios presentan mayor grado de ordenación estructural que los cuerpos amorfos.

Por lo tanto, como sus características se asemejan tanto a los sólidos como a los líquidos, es difícil conjugar una definición completa de los vidrios.

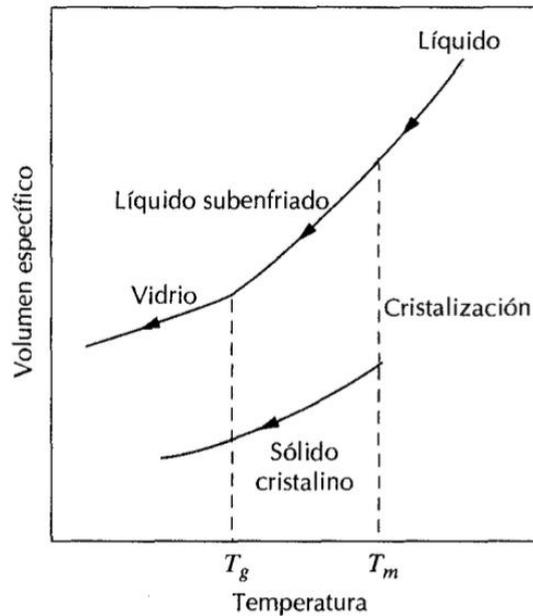


Figura 2.1: Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos. [3]

2.2. Propiedades

Las propiedades del vidrio lo han hecho un material muy utilizado en la actualidad, por su versatilidad y la facilidad de obtener los materiales para crearlo. Presenta cualidades como la transparencia, la resistencia química, la dureza, el brillo y la sonoridad. A continuación, se van a detallar las propiedades más relevantes de este material.

2.2.1. Propiedades químicas

La viscosidad, es la resistencia que presenta un líquido a fluir y como ya se ha comentado antes, el vidrio se puede considerar como un líquido de viscosidad infinita. Esta propiedad es relevante, porque es la propiedad responsable de que el vidrio obtenga el estado de líquido subenfriado y por lo tanto llegue a un estado sólido sin pasar por la cristalización. Además, toma un papel relevante a la hora de determinar la eficacia de los tratamientos térmicos, factor que será importante en el momento de estudiar el vidrio como material estructural.

Otra propiedad a tener en cuenta, es su gran resistencia a la corrosión. Aunque existen varias sustancias que consiguen romperlo.

2.2.2. Propiedades térmicas

En lo que respecta a sus propiedades térmicas, las más relevantes son la dilatación térmica y la resistencia al choque térmico, ya que estas dos son las que más limitan su aplicación.

La dilatación térmica, es la dilación relativa que sufre un material cuando se cambia su temperatura. Esta afecta directamente a la otra propiedad comentada.

El vidrio, generalmente no tiene una buena resistencia al choque térmico (ver figura 4.2). Cuando se expone a una fuente de calor (o frío) intensos, como su conductividad térmica es pequeña, se crean grandes gradientes térmicos en su interior, lo que provoca dilataciones dispares entre su parte exterior y la interior, con lo que se crean tensiones. Como el vidrio no tiene una gran resistencia a tracción, rompe con suma facilidad.

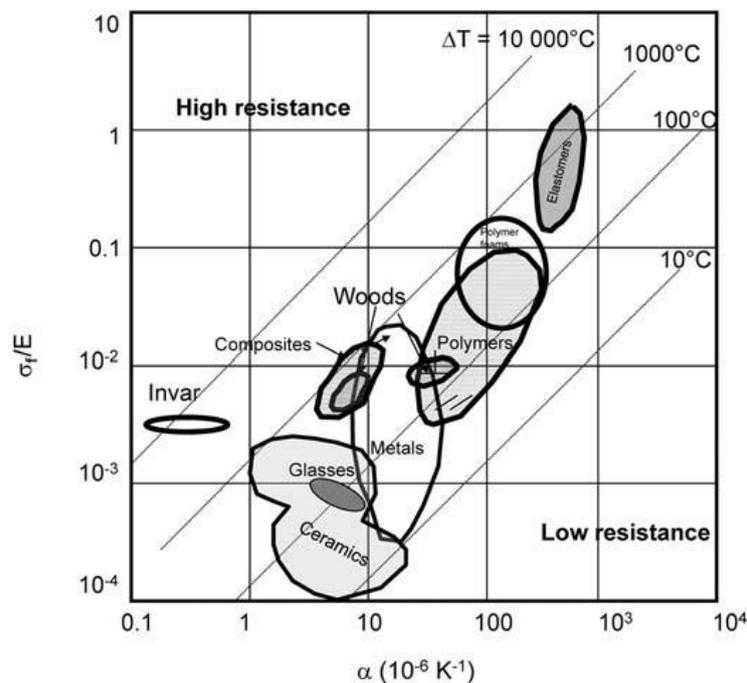


Figura 2.2: Grafico que muestra la resistencia al choque térmico de distintos materiales. [3]

2.2.3. Propiedades mecánicas

La respuesta del vidrio frente a esfuerzos mecánicos (tracción, compresión, flexión, torsión...) limitan su uso como material estructural.

Aunque teóricamente se obtengan unos valores altos de resistencia mecánica (1GPa a compresión), la cantidad de factores indeterminables a la hora de fabricarlo, hacen que su valor real sea menor y por lo tanto difícilmente aplicable en muchos ámbitos.

Por otro lado, aunque su dureza lo haga un material muy atractivo para varios escenarios su gran fragilidad también limita mucho su uso.

Todo esto, hace necesario su refuerzo mecánico con el propósito de expandir su uso. Todo lo contado anteriormente, se tratará con más profundidad en el transcurso del trabajo.

2.2.4. Propiedades eléctricas

La resistividad eléctrica del vidrio (muy alta) lo hacen uno de los mejores aislantes eléctricos conocidos. Es muy utilizado en las torres que sostienen las redes eléctricas de transporte, para aislar las distintas fases entre sí.

2.2.5. Otras propiedades

Este material, tiene también otras propiedades como las ópticas, físicas o las magnéticas, que no son de alguna importancia para el trabajo que desarrollamos, por lo que no se van a tratar de forma profunda. Aun así, estas propiedades nombradas, son de utilidad para distintas aplicaciones distintas a la estructural, donde el vidrio suple un papel fundamental.

2.3. El vidrio en la construcción

El vidrio, junto con el acero y el hormigón, es uno de los materiales más empleados en la construcción, siendo ya utilizado en época de los romanos como elemento de lujo en el cubrimiento de huecos de fachada.

Sus propiedades únicas le han convertido en un material prácticamente imprescindible en la iluminación de interiores y su enorme versatilidad le ha permitido adaptarse a innumerables aplicaciones.

Aunque sus aplicaciones en construcción sean tan extensas, este trabajo se centra en su uso como elemento estructural. Se define el vidrio estructural como un vidrio capaz de sostener las sobrecargas y esfuerzos mecánicos a los que se le someta a la estructura durante su vida útil. Se conforma de diferente manera para que sea capaz de soportar todo tipo de cargas, actuando como elemento estructural tal como los pilares, las vigas o el suelo.

El uso de este material como material estructural no es ninguna novedad, ya que, en la actualidad, sin tener que hacer una búsqueda exhaustiva, somos capaces de encontrar muchas construcciones que ya lo utilizan de esta manera.

El vidrio utilizado en construcción está compuesto casi por un 75% sílice (SiO_2), la cual está presente en gran medida en la corteza terrestre en forma de arena de cuarzo. Éste, toma generalmente el nombre de vidrio de sílice.

El objetivo de este trabajo, es tratar de delimitar su uso y mostrar las posibilidades del vidrio como material estructural, siempre mostrando en que ámbitos aún se debe de explorar su uso.

3. ALCANCE/OBJETIVOS

3.1. Alcance

En este trabajo se tratará de obtener una clara idea de la viabilidad que tiene el uso del vidrio en los elementos estructurales sometidos a flexión. Para ello se recurrirá al programa de elementos finitos ANSYS, con el que se calcularán las tensiones que soporten los elementos.

Se calculará los coeficientes de seguridad que aportan los distintos tipos de vigas en una situación estándar de carga y se obtendrán las luces máximas que puedan aportar, con esa misma carga.

Los resultados que se obtengan, no serán directamente aplicables a la construcción de estos elementos. Esto se debe a que el uso del vidrio como material estructural requiere del estudio de más factores. Por ejemplo, es necesario hacer ensayos que ratifiquen los resultados y añadan más información sobre su comportamiento a flexión.

Aun así, este trabajo sentará una base que será aprovechable para futuras investigaciones, que exploren más ampliamente este tema. De hecho, en un futuro TFM se podría llegar a desarrollar más ampliamente el estudio hecho a día de hoy.

3.2. Objetivos

Seguidamente, se van a detallar los objetivos principales de este trabajo de fin de grado:

1. Calcular las luces y los coeficientes de seguridad máximos que podríamos obtener de las distintas vigas constituidas tanto parcial como totalmente de vidrio.
2. Proporcionar un estudio base que recopile los ensayos que sean necesarios para el desarrollo de esta tecnología.
3. Comprensión de la situación actual del vidrio como material estructural en el ámbito de la construcción.
4. Profundizar en el uso de los programas de elementos finitos.

4. BENEFICIOS DEL PROYECTO

El mayor beneficio que puede aportar este trabajo es el de facilitar una base que ayude a fijar directrices a la hora de estudiar estos elementos. Los resultados obtenidos marcarán el camino a seguir para desarrollar completamente esta tecnología, que todavía se encuentra en un estado muy primario. Lógicamente el estudio que se debe de llevar a cabo con este propósito es tan amplio que en un futuro deberá ser complementado con más estudios.

La transparencia que caracteriza al vidrio haría que, en caso de que esta tecnología se implantarse, se produjese un gran ahorro energético. El consumo eléctrico derivado del uso de luz artificial podría disminuir y esto, tendría beneficios tanto económicos como ambientales. El hecho de que dispongamos de más luz natural en interiores, beneficiaría la salud y haría que estuviésemos más activos durante el día.

Como el vidrio es altamente reciclable la construcción de estas vigas tendría un efecto menos negativo en el medio ambiente del que tiene la fabricación de otros tipos de viga como las hechas de hormigón y acero.

El desarrollo de esta tecnología podría hacer que se destinen más recursos al estudio de los sistemas de fabricación de este material que llevaría a una optimización mejor. Esto acarrearía beneficios económicos, energéticos y sociales.

Por último, todo lo anteriormente dicho, podría hacer que los patrones de diseño estructural variasen.

5. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, el vidrio ha tomado un papel fundamental en la edificación, gracias al interés de obtener mayor transparencia y liviandad. Todo esto, ha derivado en que su uso se haya ampliado llegando a tener responsabilidades estructurales. Sus aplicaciones son amplias, abarcando desde fachadas, que soportan principalmente cargas de viento, hasta pilares y vigas, donde su función principal es soportar cargas.

Cada una de las aplicaciones comprendidas, requiere de un estudio propio donde se analicen las necesidades resistentes. Hecho el estudio y vistas las necesidades, se seleccionará el material y los tratamientos adecuados para lograr los parámetros de seguridad necesarios.

5.1. Propiedades mecánicas

A continuación, se expondrán las propiedades mecánicas del vidrio, mostrando cuales son las limitaciones del mismo en el ámbito estructural.

5.1.1. Elasticidad

El término elasticidad designa la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

El vidrio, siendo un material frágil, presenta un comportamiento cercano al de un material elástico perfecto, con lo que la deformación que sufre es linealmente proporcional a la carga que es expuesto, como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Este comportamiento, es continuo hasta que se sobrepasa el límite elástico, a partir del cual, el material falla espontáneamente de forma frágil. También, se ve drásticamente reducido con cargas prolongadas o si el área de aplicación es muy reducida (puntual).

La fragilidad del vidrio se debe a la escasa velocidad a la que son capaces de relajar las tensiones mecánicas aplicadas, porque en estado sólido no presenta ninguna deformación plástica que sea capaz de absorber las tensiones.

Es necesario destacar también, la diferencia que existe entre su resistencia a tracción y la de compresión. Mientras que, a compresión, su resistencia mecánica es de 1000 MPa, a tracción solo es capaz de soportar 45 MPa, siendo alrededor de 22 veces menor a la anterior.

No es de extrañar que, a la hora de soportar cargas de flexión, falle por la parte que soporta la tensión a tracción.

5.1.2. Dureza

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones físicas como la penetración, la abrasión y el rayado. En la actualidad la definición más extendida aparte de los minerales y cerámicas sería la resistencia a la deformación plástica localizada.

Esta propiedad tiene una relación directa con la resistencia mecánica que ofrece un material y da a entender el grado de rigidez estructural que tiene el mismo.

En el vidrio, esta propiedad es medida usando el ensayo de vickers. En este ensayo, se ejerce fuerza sobre un indentador cónico de diamante y se mide la deformación lograda, para posteriormente calcular la dureza. La dureza del vidrio oscila entre los 2 y 11 GPa dependiendo de su composición.

Esta propiedad se ve reducida al aumentar la temperatura, disminuyendo la viscosidad y con ello también la rigidez estructural del material.

5.1.3. Resistencia mecánica

Se define a la resistencia mecánica de un material, como la resistencia que el mismo opone contra las fuerzas aplicadas sobre él, sin romperse. En el caso particular del vidrio, la resistencia teórica difiere mucho de la experimental. Esto se debe a las imperfecciones que se adquieren en el proceso de fabricación del mismo, donde muchas variables son inabarcables.

La gran dispersión en los resultados experimentales, ha sido marco de muchos estudios, donde se ha concluido que la resistencia mecánica varía enormemente dependiendo en las imperfecciones superficiales. Estas imperfecciones, actúan como concentradores de tensiones provocando un peor y más impredecible comportamiento mecánico.

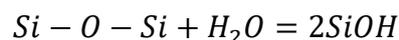
Muchas veces los desperfectos son microscópicos y, por lo tanto, muy difíciles de detectar en el proceso de producción. Todo lo anteriormente comentado, hace que el uso de este material se vea muchas veces reducido a elementos estéticos o sin mucha participación estructural.

Aun así, existen varios procedimientos (tanto térmicos como mecánicos) con los que se mejora su comportamiento mecánico, convirtiéndolo en un material con posibles usos en situaciones de carga.

5.1.4. Fatiga estática

La resistencia del vidrio, generalmente, disminuye con el tiempo en ambientes con condiciones normales. Este efecto, conocido como fatiga estática, se debe a la interacción del vidrio con la atmósfera circundante, lo que resulta en el crecimiento de grietas bajo carga constante.

La fatiga de los vidrios de silicato, se atribuye generalmente al estrés aumentado por la reacción del agua con la red de silicato en la punta de la grieta, según lo expresado por la reacción:



Esta reacción entre la red de silicato y las moléculas de agua resulta en el afilado de la punta de la grieta en lugar de alargar la grieta. Por lo tanto, un aumento en la humedad provoca también un aumento en la tasa de fatiga, debido a que, al proporcionar una mayor concentración del reactivo la reacción se produce en mayor cantidad.

El modelo simple ofrecido aquí, explica el comportamiento de fatiga estática en el vidrio, pero no explica algunos de los detalles del proceso. Durante años, se han ofrecido otros modelos más complejos para explicar la fatiga del vidrio. Un modelo propuesto por Michalske y Freiman aborda directamente el mecanismo de la reacción química.

Su modelo, predice la fatiga estática en presencia de otras moléculas como el amoníaco, mientras se explica simultáneamente por qué la fatiga no se produce en la presencia de N₂ o CO. Otra teoría propuesta, que es conocida como cuña química, sugiere que las moléculas que reaccionan en realidad no llegan a la punta de la grieta. La acción de

acuñamiento de estas moléculas, aumenta la tensión en la punta de la grieta, causando la ruptura de los enlaces Si-O-Si.

5.1.5. Choque térmico

El choque térmico es un problema grave en lo que concierne al vidrio y es necesario estudiarlo para que el uso que se le da a este sea el correcto y no se den situaciones peligrosas.

Cuando se expone al vidrio a un cambio de temperatura amplio, como su conductividad térmica es baja, se crea un gradiente térmico que crea una diferencia de expansión a lo largo del mismo. Esto crea tensiones, que en caso extremo pueden llegar a dar una rotura frágil. Este fenómeno, es únicamente dependiente de la temperatura, la conductividad térmica y el calor específico del material y del coeficiente de expansión térmica. Si la diferencia de temperatura es suficientemente amplia, las tensiones de origen térmico podrían provocar la rotura del material aun estando descargado.

El vidrio no puede soportar una diferencia grande de temperatura, por lo que no sería conveniente utilizarlo en situaciones que están expuestas a cambios de temperatura grandes o rápidos.

5.2. Vidrios estructurales

Como se acaba de explicar, el vidrio necesita de procesos mecánicos, térmicos o químicos para lograr la resistencia y la seguridad necesaria como para que pueda ejercer como material estructural. A continuación, se expondrán los procesos utilizados.

5.2.1. Vidrios templados

Como ya se ha explicado, el vidrio tiene una resistencia mucho mayor a compresión que a tracción y normalmente las roturas se deben a una acumulación de tensiones de tracción, provocadas por los defectos superficiales originados durante el proceso de enfriamiento. Por lo tanto, si se consigue que el vidrio tenga naturalmente tensiones de compresión en la superficie se obtiene un vidrio más resistente y seguro.

Para lograr esto, se somete al vidrio a un tratamiento térmico conocido como templado. En este, se calienta el material hasta aproximadamente los 600°C para posteriormente enfriarlo bruscamente hasta temperatura ambiente.

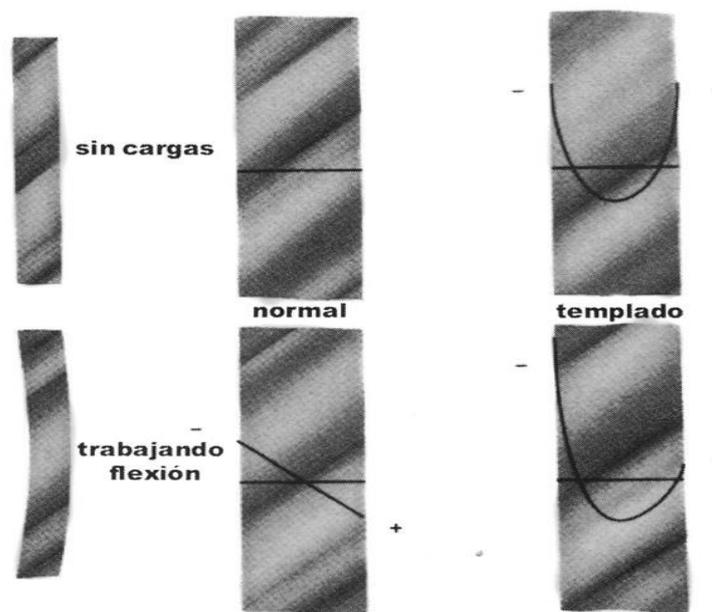


Figura 5.1: Distribución de tensiones en una lámina de vidrio templado. [3]

La diferencia de velocidad en el enfriamiento entre la superficie y el interior de la lámina, crea la diferencia de tensión que se observa en la figura 7.1. Como se puede observar, en estado libre de carga la superficie sufre compresión, lo que hace que aumente su resistencia a flexión, que crean cargas a tracción en una de las superficies de la lámina.

Una ventaja añadida, es que las tensiones acumuladas en un vidrio templado hacen que cuando se rompe, se formen cubos de pequeño tamaño menos peligrosos que los fragmentos de un vidrio convencional.

Sin embargo, el vidrio templado no admite, por las tensiones internas, transformaciones posteriores. Lo que si permitirán son fijaciones para su sujeción. El vidrio templado asumirá con facilidad tensiones superficiales muy superiores que las de un vidrio común. Este tipo de vidrio se encuentra regulado por la norma UNE-EN 12150-2:2005.

5.2.2. Vidrios laminados

El vidrio laminado se consigue de la unión de varias láminas de vidrio de cualquier grosor, mediante películas intermedias realizadas con materiales plásticos translúcidos (figura 7.2). Con esto se dota a la ventana de una mejora en el aislamiento acústico y también en la seguridad.

En el vidrio laminado, el objetivo no es mejorar la resistencia mecánica, ya que tiene menor resistencia que un vidrio de la misma sección, sino que se trata de la seguridad en caso de rotura, evitando que la rotura frágil suponga el colapso del elemento y se pueda proyectar ocasionando cortes y otras lesiones.

Esto último es debido a que, si por cualquier motivo se rompe el vidrio, los trozos de cristal no se caen y quedan esparcidos por el suelo, sino que continúan pegados al resistente polímero. Además, obtienen una resistencia mecánica residual que puede ser determinante en diversas situaciones.

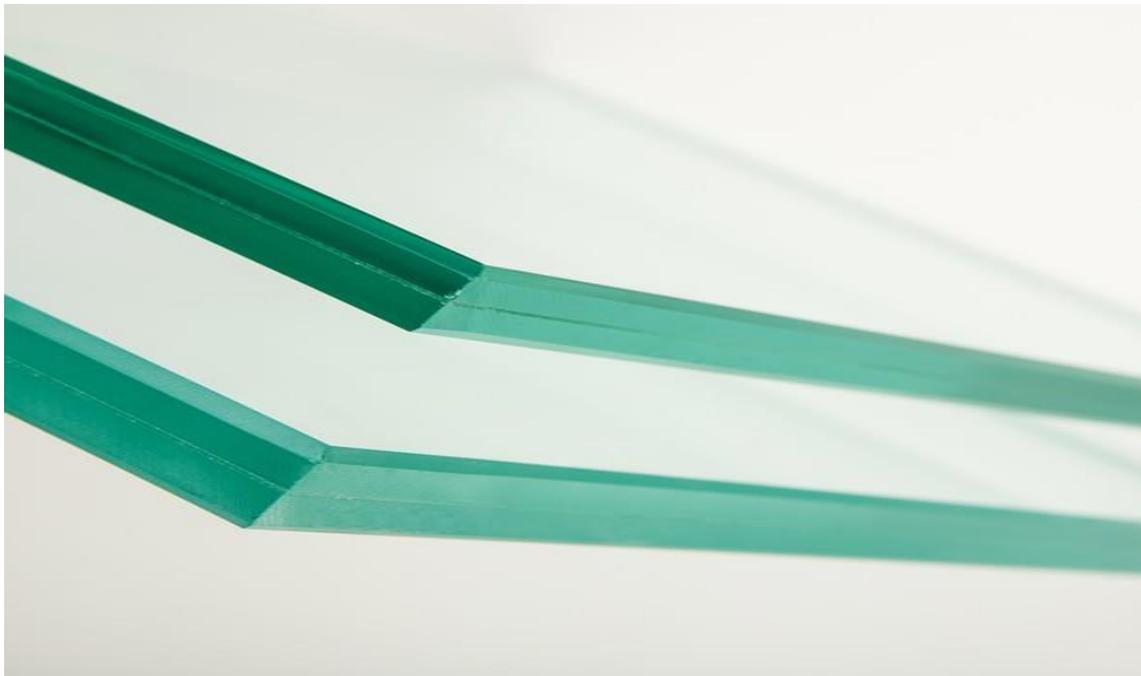


Figura 5.2: Muestra de vidrio laminado. [21]

El polímero más utilizado en este tipo de vidrio es el PVB (butiral de polivinilo), pero recientemente se está investigando el uso de diferentes polímeros que mejoren sus

características y así poder aumentar su ámbito de uso, pudiendo darle una importancia estructural mayor manteniendo la seguridad necesaria.

Un ejemplo de lo que se ha expuesto es el compuesto llamado SGP (Sentryglass Plus), que mejora la resistencia mecánica respecto al PVB acercándose a los valores de un vidrio sólido del mismo grosor. Además, mantiene sus características mejor a medida que aumenta la temperatura. En las comparativas siguientes (provenientes de un ensayo de flexión) se puede observar todo lo narrado.

Como se puede observar en la figura 7.3, el módulo de Young que presenta el SGP no desciende de forma significativa hasta que se alcanzan los 50°C, que comparándolo con el PVB (que desciende drásticamente a partir de los 20°C) consigue mantener una mayor rigidez a medida que la temperatura asciende, llegando a ser 100 veces más rígido.

El valor de la rigidez de la capa intermedia polimérica es de vital importancia, porque determina la distribución de tensión en el vidrio, y esto tiene un efecto directo en la capacidad resistiva del vidrio.

Como ya se ha comentado antes, la resistencia mecánica que obtiene el vidrio laminado con capas de SPG es mucho mayor que si se usa el PVB. Como se puede observar en la figura 7.4, los valores llegan a ser muy similares a los de un vidrio sólido del mismo grosor.

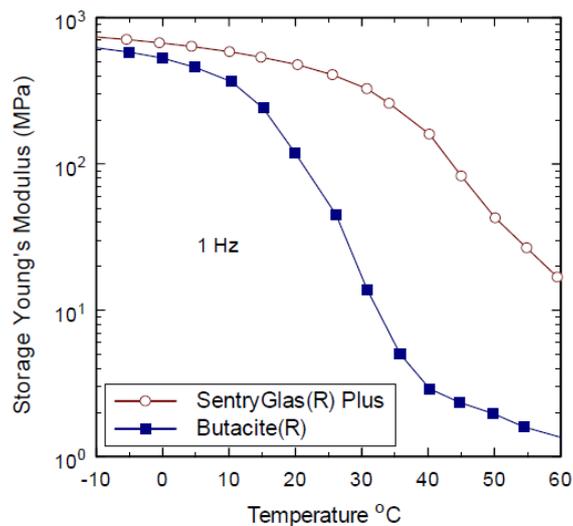


Figura 5.3: Comparativa del comportamiento de los polímeros a diferentes temperaturas. [5]

Teniendo en cuenta que contamos también con los tratamientos térmicos antes comentados podemos conseguir un tipo de vidrio de alta resistencia y seguridad con muchas aplicaciones estructurales posibles. Este tipo de vidrio es denominado vidrio laminado templado y se tratará de forma más extensa más adelante.

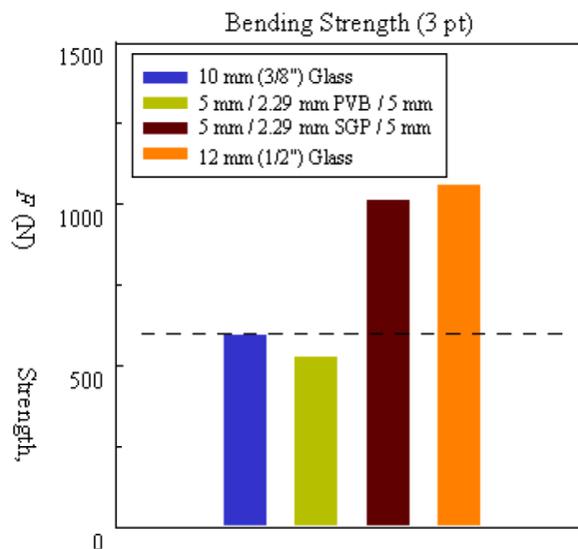


Figura 5.4: Comparativa de la resistencia entre varios tipos de vidrio. [5]

5.2.3. Vidrio templado laminado

Se considera, por tanto, como solución óptima, la constituida por un vidrio laminado formado por varios vidrios templados. Se aúna así la mayor resistencia de los vidrios templados con las ventajas de seguridad de los laminados.

La mayor desventaja de este vidrio reside en su coste puesto que supera en un 40 % al del vidrio laminado convencional. Además, la posible rotura de todas las láminas de vidrio que constituyen el laminado lo convierte en una especie de tela blanda a la que quedan adheridos los pequeños cubos formados por la rotura del templado. La falta de tensión residual en la rotura, hace que la seguridad sea menor en comparación con los vidrios laminados normales.

Por tanto, una correcta elección del vidrio a emplear, aunque su costo sea elevado, permitirá ahorrar en otros aspectos y será solución a problemas de:

- Aislamiento acústico
- Ahorro energético

- Mayor seguridad
- Resistencia mecánica estructural
- Aislamiento térmico
- En caso de rotura, minimiza los daños a las personas

5.3. Aplicaciones

En la actualidad, el mayor uso del vidrio en la construcción es el que se le da para formar pantallas verticales en las fachadas, como las ventanas que son habituales en todas las fachadas de edificios de viviendas. Pero recientemente gracias a las características ópticas del vidrio se ha buscado utilizarlo en aplicaciones con una mayor carga estructural.

En los siguientes puntos se expondrán las diferentes ocupaciones en las que se utiliza actualmente el vidrio; como vigas pretensadas, pantallas horizontales y verticales y vidrios postesados; que formarán parte de sistemas estructurales más complejos como edificios, puentes, pórticos, etc.

5.3.1. Pantallas verticales

Como ya se ha comentado, la función principal que se le da al vidrio sería la de formar grandes pantallas verticales que se utilizan como cerramiento tanto en la parte exterior de los edificios (fachada) como en el interior (mayormente en el exterior).

Ya que el vidrio es más que capaz de soportar su peso propio, el mayor reto a la hora de diseñar estos componentes será el que imponga la fuerza horizontal asociada al viento (que creará flexión) y el pandeo dependiente de su esbeltez.

Tomando en cuenta todo lo anterior, las pantallas de vidrio verticales se subdividen en tres modos de posicionamiento: pantallas de vidrio apoyado y pantallas de vidrio colgado.

Vidrio apoyado

La forma más sencilla de fijar una pantalla vertical de vidrio, es la fijación del mismo al suelo mediante algún mecanismo que impida su vuelco. Esto se dará solo, cuando se disponga de una única altura vertical de pantallas. La razón detrás de esto es que, al apilar varias pantallas verticales, haría falta alguna otra fijación que garantizase que las

pantallas se mantuvieran en su sitio y una estructura externa que soporte las demás cargas.

Por esto, este tipo de disposición es mayormente utilizado a la hora de crear barandillas, o elementos similares, que no requieran de una gran altura. A pesar de ello, también se dan casos en los que se utiliza como fachada en edificios de una planta (se puede observar en la figura 7.5), en los que aparte de las fuerzas horizontales (que mayoritariamente soportan estos vidrios) también soportan el peso del techo y de todo lo que se almacene encima (como la nieve y la lluvia).



Figura 5.5: Edificio con fachada de vidrio. [20]

A la hora de diseñar una barandilla de vidrio, el factor con mayor importancia es que garantice la seguridad de las personas que vayan a utilizarlo. Para ello, la elección del tipo de vidrio y los tratamientos empleados es de vital importancia. Será necesario utilizar un vidrio de seguridad, pero no bastará con un vidrio templado, porque a la hora de la rotura este no mantendría ninguna tensión residual que impida que la persona caiga, por lo que tendremos que utilizar un vidrio laminado. La elección del grosor y cantidad de láminas utilizadas en él, dependerá de la situación en la que se coloque este.

Existen varios mecanismos para lograr este anclaje al suelo, pero el más utilizado es el que se ve en la figura 7.6, que consiste en una rendija en el suelo en la que se empotra el vidrio. La parte exterior de la estructura de anclaje esta normalmente compuesta de algún metal, y entre el vidrio y el compuesto metálico se coloca un polímero que impide que los otros dos materiales tengan contacto directo.



Figura 5.6: Barandilla de vidrio. [13]

También existen otro tipo de fijaciones, como las que se utilizan (principalmente) en las barandillas de las escaleras que están hechas de vidrio. En estas, la pantalla es fijada en unos puntos concretos por las fijaciones que se ven en la figura 7.7. donde, al igual que en la otra, se coloca una lámina de un polímero para evitar contacto entre el metal y el vidrio, ya que esto puede derivar en numerosos problemas.



Figura 7.7: Sujeciones de una barandilla de vidrio. [14]

Otra forma de fijarlas sería la que se muestra en la figura 7.8, donde las pantallas se colocan en voladizo fijadas en unas pinzas que son ancladas al suelo.



Figura 5.8: Barandillas fijadas a través. [14]

Vidrio colgado

Como ya se ha expuesto, el vidrio tiene una gran resistencia a compresión y, por lo tanto, puede sostener fácilmente el peso de apilar varias pantallas. Pero al diseñar este tipo de

grandes superficies verticales de vidrio, nos tendremos que enfrentar con un gran problema llamado pandeo, que se puede dar en consecuencia de su esbeltez. Esto disminuye significativamente la resistencia a la compresión del vidrio y hace que la construcción de este tipo de muros no sea la más indicada.

Otro problema que tienen este tipo de disposiciones, es que al apoyarse unas sobre las otras sin ningún otro tipo de soporte externo, en caso de que se produjera la rotura de una de ellas, todas las que estén colocadas encima se caerían y por lo tanto la estructura colapsaría.



Figura 5.9: Muestra de muro cortina. [22]

Para evitar esta situación se recurre a pantallas de vidrio colgadas que forman grandes muros cortina, para los que se utilizan diversas sujeciones que se explicaran más adelante. De este modo el único esfuerzo que el vidrio debe soportar es el que producen el viento y la lluvia en el plano horizontal que, en condiciones normales es fácilmente aguantado.

Existen dos formas de crear un muro cortina, la más utilizada es en la que las pantallas de vidrio se colocan en una estructura constituida por perfiles metálicos (normalmente de aluminio extruido) donde esta soporta la mayoría de las cargas y el vidrio solo tiene que soportar las anteriormente descritas.

Esta forma de hacerlas, tiene un impacto visual en la fachada del edificio donde, entre las pantallas, se puede observar el perfil ya descrito (figura 7.10). Con el fin de aliviar este impacto, se puede optar por una estructura interior que pueda sostener las

pantallas y que el cerramiento se haga con un adhesivo, dejando así una fachada más uniforme (figura 7.9).



Figura 5.10: Muro cortina con perfiles metálicos. [23]

Sea uno o el otro el método utilizado, en los dos casos se requieren distintos tipos de fijaciones. Estas se detallarán a continuación.

Fijaciones

Sea cualquiera de las dos la forma en la que se estructure la fachada, el vidrio requerirá de distintas fijaciones para adherirse a la estructura metálica que soportará la mayoría de las cargas estructurales, dejando así al vidrio, solo a su peso propio y las creadas por el viento y la lluvia.

En el caso de las estructuras de perfiles metálicos, para la unión entre el vidrio y el metal se utiliza silicona estructural que, además de sellar correctamente y proporcionar buena estanqueidad, permite que las cargas se transmitan correctamente a la estructura principal.



Figura 5.11: Acristalamiento estructural exterior. [1]

En la actualidad, también se utilizan los perfiles metálicos en sistemas estructurales como el que se ve en la figura 7.11, donde los perfiles crean una estructura interior que se une al vidrio mediante la silicona antes mencionada. Este tipo de estructura, tiene una ventaja estética respecto a la de las pantallas enmarcadas.

Es importante la correcta elección del sellante estructural y prestar especial atención a parámetros como la tensión de adhesión y la recuperación elástica del sellante.

Muchas veces en vez de utilizar fijaciones lineales, se utilizan fijaciones puntuales en las que las pantallas son fijadas, tanto con adhesivos como mecánicamente, en puntos concretos. Las más utilizadas, son las denominadas arañas.

Este tipo de unión es capaz de unir varias pantallas de vidrio con una sola fijación. Existen arañas de dos, tres y cuatro brazos, pudiendo así unir hasta cuatro pantallas. En la figura 7.12, se puede observar, una araña unida por un adhesivo estructural a cuatro pantallas. Estas arañas van posteriormente unidas a una estructura interior, que es la responsable de soportar las cargas de las que es relevado el vidrio.



Figura 5.12: Araña de cuatro brazos. [1]

A parte de las fijaciones basadas en adhesivos, también podemos encontrar uniones mecánicas en las que se agujerea el vidrio de distintas formas para crear una unión mecánica entre el vidrio y la estructura. Es importante tener en cuenta que, si el vidrio que vamos a utilizar tiene que ser tratado térmicamente, los agujeros deben de ser hechos antes del tratamiento para que el interior del agujero consiga también la mejora de su resistencia.

La más sencilla entre ellas sería el abotonamiento, donde se hace un agujero cilíndrico por el que se pasa un tornillo que tiene como propósito mantener presionados dos platos circulares (uno exterior y otro interior) produciendo así una unión en la que la tensión se transfiere a través de estos platos. (ver figura 7.13).

Estos botones suelen estar conectados directamente a los brazos de las arañas que ya se han comentado, pudiendo fijar hasta cuatro pantallas por este método.



Figura 5.13: Botón utilizado para fijar. [1]

Como las arañas son una manera muy eficaz de fijar varias pantallas a la vez, normalmente todas las fijaciones mecánicas (a la hora de construir muros) se utilizan de este modo.

La siguiente fijación es parecida al abotonado pero el elemento exterior tiene cierta forma cónica, que concuerda inversamente con la forma del agujero en la lámina exterior del vidrio, creando una unión de forma como la que se observa en la figura 7.14.

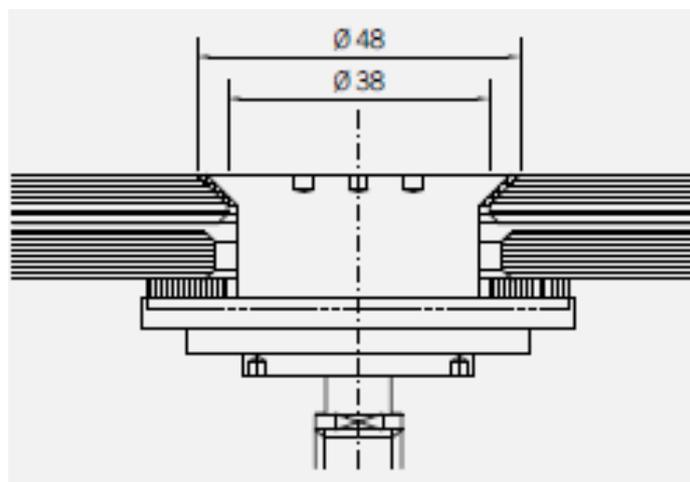


Figura 5.14: Unión mecánica por fuerza. [1]

Entre estos dos tipos de fijaciones se considera la última como la menos segura en situaciones de mayor estrés, por lo que únicamente se usara en paneles que estén sobre el nivel de uso humano donde no pueda estar expuesto a sobrecargas que estos mismos puedan crear.

Al usar estas uniones puntuales, es de vital importancia tener en cuenta que en determinadas ocasiones se crearan concentraciones de tensiones alrededor de las fijaciones. Como el vidrio es un material frágil hay que controlar especialmente las tensiones máximas de tracción que se puedan producir y así evitar roturas en los bordes.

Para evitar este tipo de situaciones, se opta por hacer agujeros que permitan al vidrio expandirse y tener un ligero movimiento. Por lo tanto, los agujeros no se ajustan perfectos a la fijación, sino que dejan un poco de espacio extra, como se ve en la figura 7.15. El espacio dejado dependerá de las dimensiones de los paneles y del tipo de vidrio utilizado, pero como estándar se considera que la distancia extra utilizada es de 2 mm.

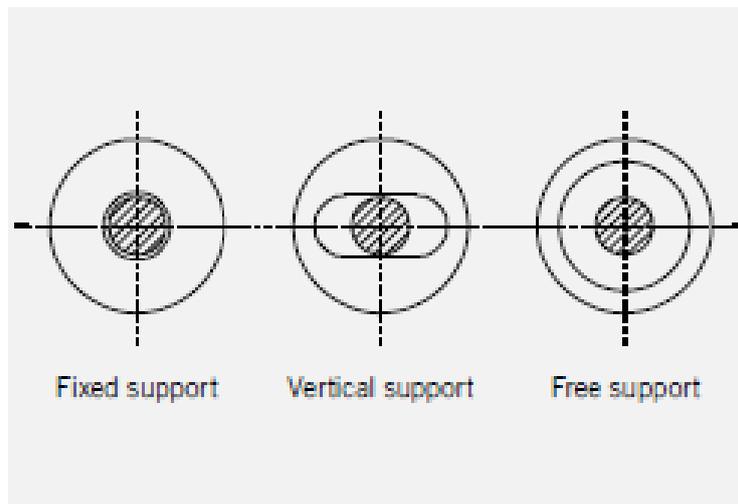


Figura 5.15: Muestra de las distintas juntas de dilatación. [1]

Para asegurar la estanqueidad de la unión y el contacto entre la fijación y el vidrio, se suele recurrir a una resina que rellene el hueco dejado entre los dos. La resina constituirá una fase intermedia entre los dos, que transmitirá las tensiones de una a otra. Gracias a su elasticidad, también se reducirán las concentraciones de tensión que se puedan producir.

Por último, los vidrios apoyados y los enmarcados, son fijados mediante pinzas de presión. Estas pueden abarcar desde bordes enteros hasta pequeñas áreas repartidas por todo el panel.

Por lo tanto, teniendo en cuenta como se transmite la fuerza, las conexiones de una fachada flotante, se pueden clasificar en tres grupos: sistemas con silicona estructural, con sujeción mecánica, y por fuerza o presión (ver Figura 7.16).

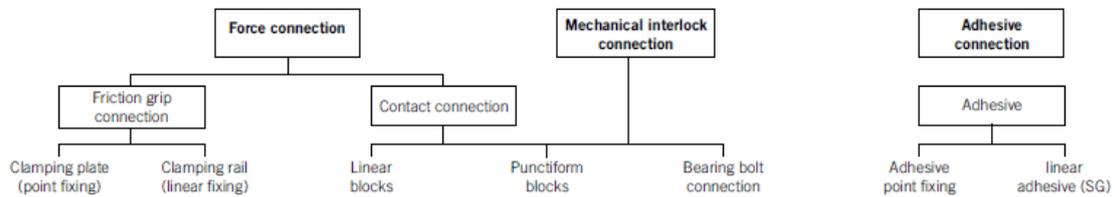


Figura 5.16: Tipos de fijaciones para fachadas. [1]

Con la explicación anterior, ha quedado claro que es posible unir las pantallas tanto puntual como linealmente. En la figura 7.17. se muestran muchas de las posibles de una forma gráfica.

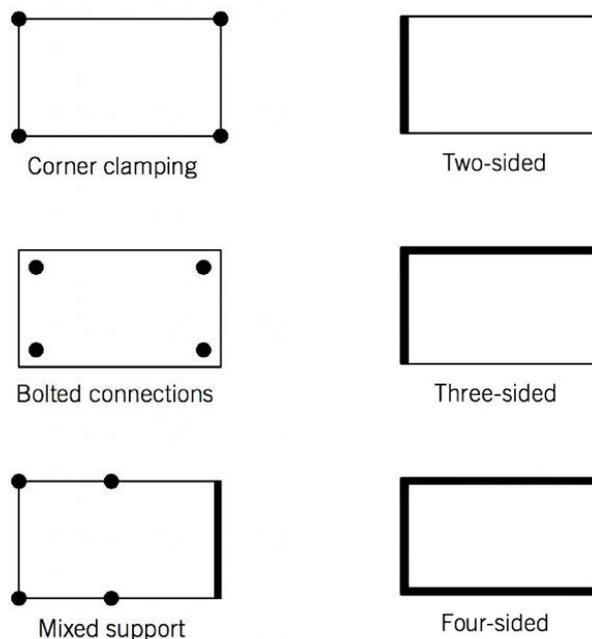


Figura 5.17: Distintas posibilidades de fijación. [1]

5.4. Pantallas horizontales

A parte de los muros cortina ya descritos, el vidrio se usa en ámbitos más exigentes, como las pantallas horizontales, que tienen que trabajar con mayores cargas de flexión.

Debido a su peso propio y su resistencia a flexión, el uso de las pantallas de gran tamaño con propósito de cubrir amplios espacios es inviable. La distancia mayor que se puede cubrir es de unos 3 metros, a menos que se recurra a pantallas de un gran grosor.

Debido a eso, la disposición más común es la de usar pantallas de menor tamaño, sostenidas por diferentes tipos de estructuras auxiliares. La solución más utilizada, suele ser la de colocar jácenas que ayuden a disminuir y distribuir las tensiones que tiene que soportar la pantalla horizontal. Este método es utilizado tanto en suelos (o pasarelas) como en techos. Una muestra de ello son las pasarelas de varios observatorios (figura 7.18) construidos recientemente que, se ayudan de esto para dar una mejor visión del para en el que están.



Figura 5.18: Glacier skywalk en Columbia. [17]

Aunque en situaciones de gran tensión, sea necesario utilizar estructuras auxiliares metálicas (como la figura 7.18), el uso del vidrio en el desempeño de este papel es muy

atractivo en cuanto a la estética se refiere. En la figura 7.19. se ve como es llevado a cabo este tipo de estructura, en la que se utiliza mayoritariamente el vidrio.

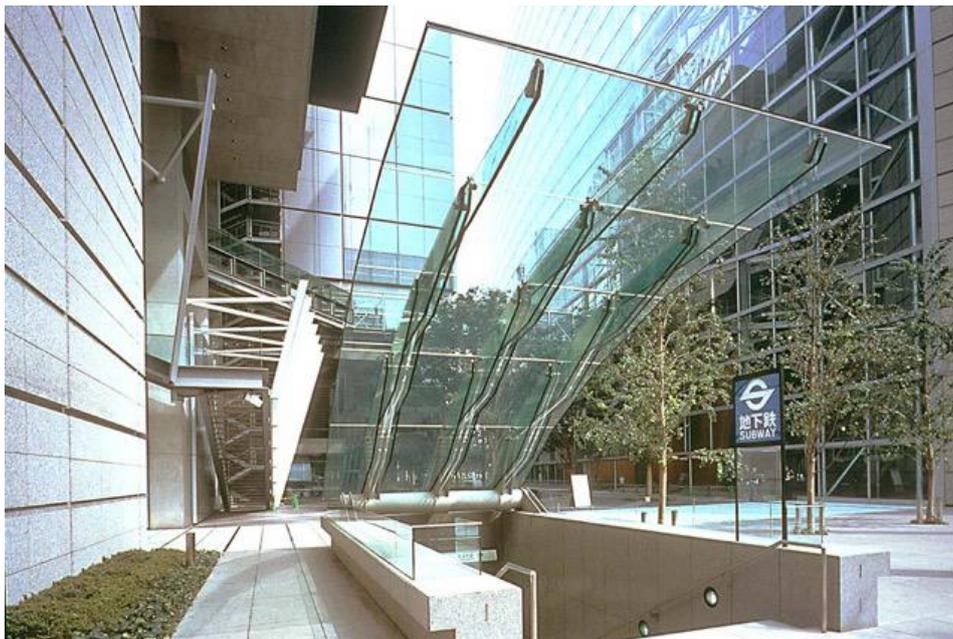


Figura 5.19: Salida de la estación de metro Internacional de Tokio. [1]

Otra manera en la que se utilizan las pantallas horizontales, es la de construir escaleras de vidrio. En estas, los soportes de las láminas, son distintos que en el caso anterior, porque dos de las aristas tienen que estar libres para posibilitar el paso humano.

Normalmente, van abotonadas perimetralmente, en las barandillas que les rodea (figura 7.20).



Figura 5.20: Escaleras de la tienda de Apple de la quinta avenida de Nueva York. [18]

El uso del vidrio en suelos y techos está cada vez más extendido, y ya se empiezan a ver construcciones de gran tamaño, en las que no acostumbramos a ver este material. El más espectacular podría ser, el puente que se terminó de construir el año pasado en parque natural de Zhangjiajie (China), donde todo el suelo es de vidrio laminado (ver figura 7.21).

Los paneles utilizados en esta estructura, tienen tres capas de vidrio y el vidrio es de un grosor muy superior al habitual.



Figura 5.21: Puente con suelo de vidrio en Zhangjiajie. [19]

5.4.1. Vigas

Como ya se ha explicado, el vidrio no es capaz de resistir grandes fuerzas flexoras y si se quiere utilizar en una viga (que principalmente soporta flexión) hay que buscar métodos para solventar este problema.

Los esfuerzos de flexión presentan internamente un tramo de compresión y otro de tracción, con valores ascendentes desde la fibra neutra hasta el extremo del área donde da su máximo valor.

Como el vidrio no es capaz de soportar bien los esfuerzos a tracción, se busca desplazar la posición de la fibra neutra hacia el borde de máxima tracción, consiguiendo así disminuir esta misma. Para ello, una opción, es comprimir la viga por el eje longitudinal (tanto total como parcialmente) consiguiendo el efecto deseado (Figura 7.22).

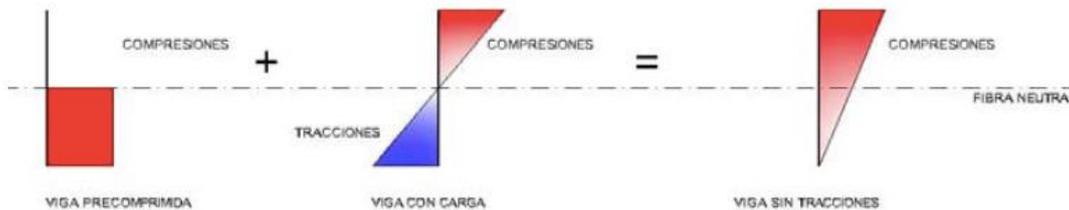


Figura 5.22: Esquema del estado de tensión de una viga pretensada. [10]

A pesar de que este tipo de soluciones aumenta la carga que las vigas puedan soportar también aumenta la influencia del pandeo, que hasta ahora no era un factor limitante (a causa de que la resistencia a tracción lo era más).

Respecto a este problema, se hizo un estudio sobre la posibilidad del uso de formar vigas de mayores luces, utilizando uniones metálicas para acoplar vigas de menor tamaño. Gracias a la elasticidad del acero utilizado en las uniones, la posibilidad de que el pandeo afecte se ve reducida (figura 7.23.). A parte de esto último, se consigue que las vigas logren tener tensión residual al fracturarse, creando una fractura más segura y así mejorar las posibilidades en el uso de este elemento. Esto se debe a que el acero tiene capacidad de deformarse plásticamente y crea, en la viga, un estadoseudoplástico posterior a la fractura.

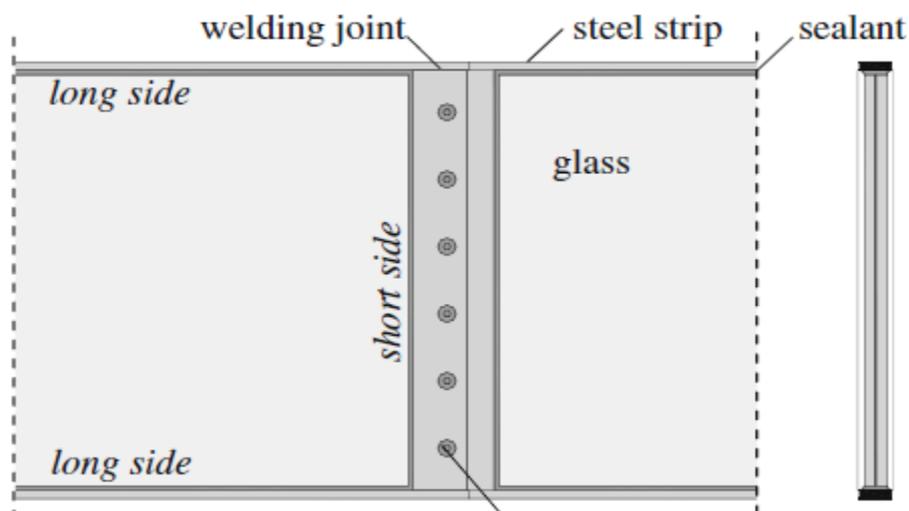


Figura 5.23: Imagen conceptual de una unión metálica entre dos vigas vítreas. [6]

En el estudio mencionado, también se llegó a la conclusión de que la calidad de los apoyos y su posicionamiento tienen mucha importancia en la aparición del pandeo.

Gracias a este estudio, ya se está empezando a implementar en entornos donde la carga es relativamente pequeña, como en el cobertizo que se muestra en la figura 7.24.



Figura 5.24: Cobertizo de invernadero en The Hage. [6]

Como el uso de vigas hechas exclusivamente de vidrio tiene tantas complicaciones y limitaciones, durante los últimos años se han llevado a cabo investigaciones en las que se buscan conseguir vigas mixtas, que usen más de un material (siendo uno de ellos el vidrio), que pueda mantener, en gran medida, las características que hacen al vidrio un material atractivo para la construcción, y a la vez tengan un mejor comportamiento mecánico.

Los materiales utilizados para complementar al vidrio son principalmente el acero, la madera y el GFRP. Dependiendo de la aplicación y las exigencias que suponga, será utilizado un material u otro.

A parte de los materiales que compongan la viga, el tipo de viga y el adhesivo utilizado para unirlos son cuestiones a considerar, ya que, cualquiera de estos factores afecta directamente a el rendimiento de la misma.

Entre los distintos estudios hechos acerca de este tema, los tipos de viga utilizados son principalmente las vigas en I y las que utilizan el material de refuerzo en el tramo de tracción.

En las vigas en forma de I los materiales de refuerzo se utilizan en las fibras externas dejando así al vidrio únicamente en la fibra central para intentar conseguir que la viga tenga la mayor transparencia posible.

En los ámbitos en los que se quiera que estas vigas tengan que soportar cargas considerables los materiales que se usaran serán el acero y el GFRP, debido que la madera no tiene tampoco una gran resistencia a tracción y la variabilidad de esta (debido a que es un elemento natural) es grande.

En cuanto al GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer), el estudio desarrollado por Joao R. Correia [3] hizo una comparativa entre los distintos tipos de viga que se ven en la figura 7.25 donde se concluyó que la viga en I mostraba unos resultados ampliamente mejores que las dos otras (4 veces mejores que la S y 2 veces superior a la R).

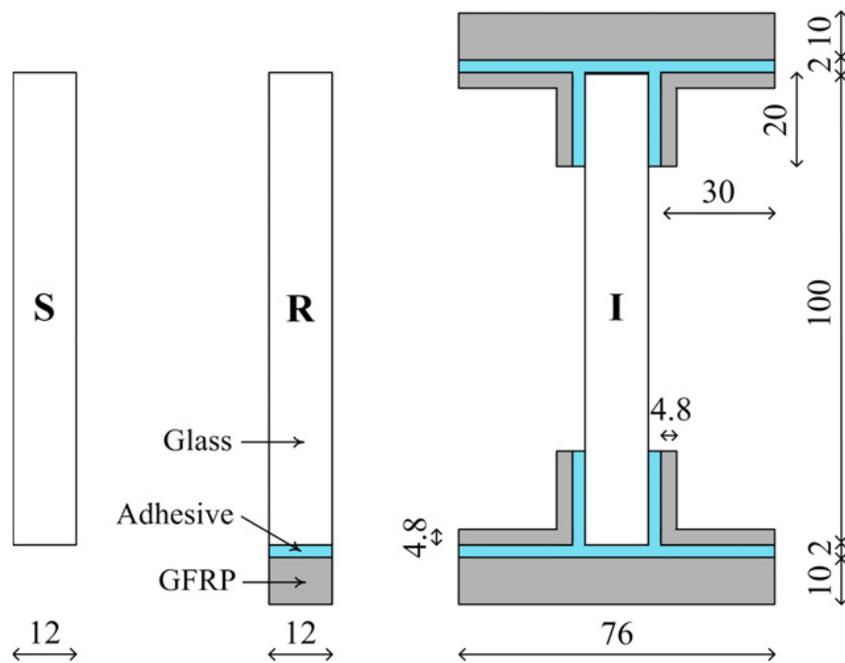


Figura 5.25: Modelo de las vigas usadas en el ensayo. [2]

También se pudo observar, que la creación de vigas de este tipo, tiene una mejora en cuanto a seguridad respecto a las que son de vidrio únicamente ya que a la hora de fracturarse conservan una cierta tensión residual que consigue que no colapse

instantáneamente. A este comportamiento se le podría apodar como pseudo-ductilidad y en el caso de las vigas de I se logró que la tensión residual después de fractura fuese similar a la capacidad de carga máxima.

En cuanto al acero, las conclusiones que se obtienen son similares a las del GFRP. Se obtiene mejor resistencia y una fractura que consigue retener algo de la resistencia inicial de la viga, evitando así, una fractura frágil. Este comportamiento mejora cuanto más parte de la sección sea compuesta por acero.

La madera es un material anisótropo (sus propiedades varían dependiendo de la dirección), dado que está compuesta por fibras con orientación, y esto la diferencia de los dos otros materiales descritos. La resistencia y el módulo de elasticidad que se obtiene en el sentido paralelo a las fibras es entre 30 y 70 veces mayor que en el sentido perpendicular.

Al ser un material que se obtiene de la naturaleza, dependiendo completamente de las condiciones de crecimiento que se den, y no puede ser fabricado, la variabilidad en los valores resistentes que se obtienen de ella no es controlable. Esto hace que cuando se utilice en ámbitos estructurales, el factor de seguridad que se tendrá que aplicar será mayor que en los otros dos materiales.

El hecho de que la madera en la naturaleza tenga que, principalmente, resistir esfuerzos de flexión (viento, lluvia...) hace que su rendimiento en este ámbito sea notable (sobre todo respeto de su peso), logrando valores entre 14 y 30 MPa.

Esta variabilidad que se da con los valores responden a que existen muchas especies de maderas, y aun limitándolas a las que son útiles en este ámbito, sigue habiendo diferencias visibles entre ellas.

6. Metodología

En el anterior apartado se han mostrado las diferentes posibilidades que ofrece el vidrio como material estructural y el uso que se le ha dado en este ámbito hasta ahora. En particular, las vigas son uno de los elementos estructurales en el que menos uso se ha hecho y el desarrollo de un estudio que defina la viabilidad del uso de este material sería interesante.

A partir de toda la información adquirida en los estudios que se han encontrado, se han definido las posibilidades máximas que puede dar el material para esta aplicación.

6.1. Definición de condiciones de carga

El diseño de las vigas será particular en cada caso de uso y por eso para comparar y hacer ver las posibilidades que estos elementos tienen, se utilizarán varias situaciones de carga normalizadas, dando así una comparativa suficientemente precisa.

De forma natural el vidrio es un material frágil y por lo tanto su uso en aplicaciones donde soporte grandes cargas, no aporta seguridad suficiente. Para compensar esto, se podría sobredimensionar, dándole así un coeficiente de seguridad muy alto, dejando de ser una opción válida porque perdería su principal atractivo estético, la liviandad.

Por eso, se recurre normalmente al vidrio laminado que, a costa de la pérdida de algo de su resistencia consigue una tensión residual que consigue un estado pseudoplástico posterior a la fractura.

Para este tipo de análisis lo más adecuado sería utilizar un programa que utilice el método de elementos finitos para hacer un cálculo aproximado y posteriormente, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, hacer ensayos en probetas para garantizar que lo obtenido es aplicable a la realidad. Sobre todo, en el caso del vidrio, hacer ensayos

es muy importante, dada la variabilidad que se obtiene dependiendo de pequeños cambios en la fabricación. Además, la mayor parte de las roturas en el vidrio se deben a las concentraciones de tensiones que se producen por causa de defectos superficiales que no son simulables en el programa.

Al no tener suficientes recursos para esto último, en este trabajo se llevará a cabo únicamente el cálculo por elementos finitos, dando comienzo a un análisis que se podría extender en un futuro.

Para esto se ha utilizado la licencia de estudiante del programa ANSYS que establece limitaciones a su uso permitiéndonos utilizarlo sin coste a cambio. Estas limitaciones han hecho que los resultados obtenidos tengan cierto error, pero por la simplicidad de las situaciones de carga no supondrán ningún problema en el resultado general.

Para hacer los cálculos con composites se ha tenido que utilizar la licencia teaching que ha sido facilitada por parte de la universidad, porque la licencia de estudiante no permitía hacer cálculos con este material.

Además, en el análisis no se ha tomado en cuenta la viabilidad económica, porque el objetivo es ver hasta dónde podría llegar este tipo de tecnología.

En el estudio se ejecutarán dos fases de cálculo. En la primera se obtendrán y compararán los coeficientes de seguridad que aporten las diferentes vigas con una luz de 5 metros (una luz estándar) y en el segundo se tratará de maximizar la luz obtenible con cada una de ellas, en cada una de las condiciones de carga. En la segunda fase, se optará por un coeficiente de seguridad del 1,5, que sabiendo que todos los tipos de viga que se van a probar, en caso de fractura caen en un estado con tensión residual, parece suficiente.

Además de lo anterior, independientemente del caso el material que se utilice para las vigas, para las pantallas horizontales, que soportaran las vigas, se utilizará también el vidrio, ya que, sino el uso de este tipo de elemento perdería todo el sentido. Lo que buscamos con esto es crear una estructura que, en la medida de lo posible, deje pasar la mayor cantidad de luz posible y sea lo más homogénea posible.

6.1.1. Geometría

La primera prueba que se hará será para determinar que sección será la mejor. Tras hacer varias pruebas, se ha determinado que las vigas en doble T, aportan los resultados más óptimos utilizando la menor cantidad de material

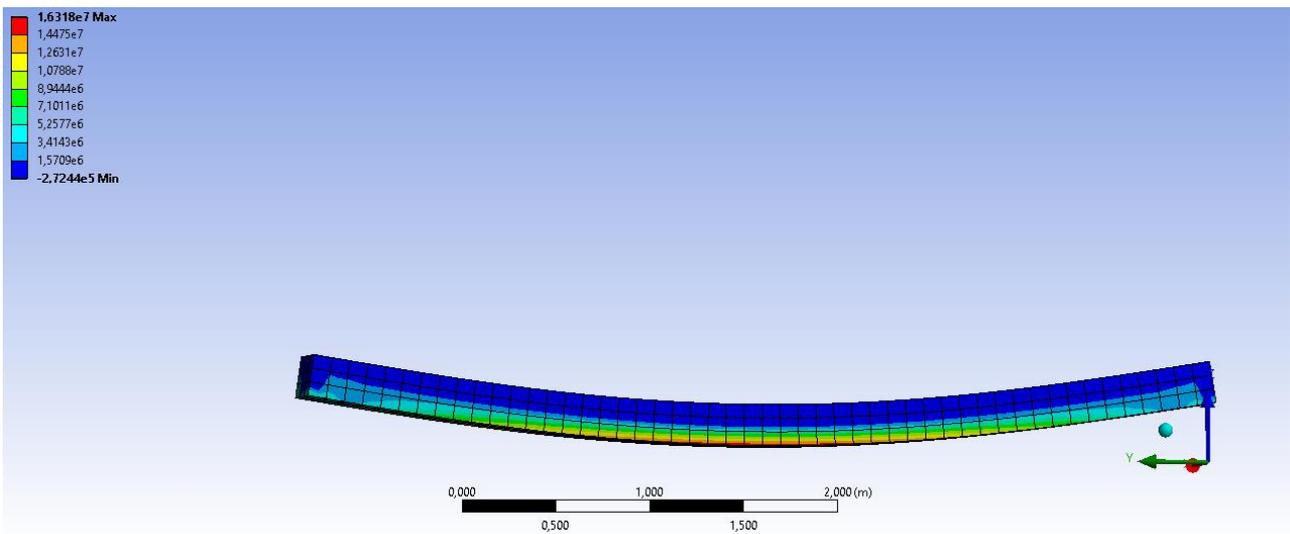


Figura 6.1: Distribución tensional en la viga de sección cuadrada.

En las siguientes imágenes (figuras 8.1 y 8.2) se puede ver, la diferencia entre las tensiones máximas que se dan en las dos vigas cargadas con la misma carga. La tensión es menor en la de sección cuadrada (lógicamente) pero como la diferencia no es suficientemente amplia, la viga en doble T será la utilizada. También, se ha tenido en cuenta que, a la hora de crear vigas mixtas, es más fácil hacerlo con este tipo de vigas.

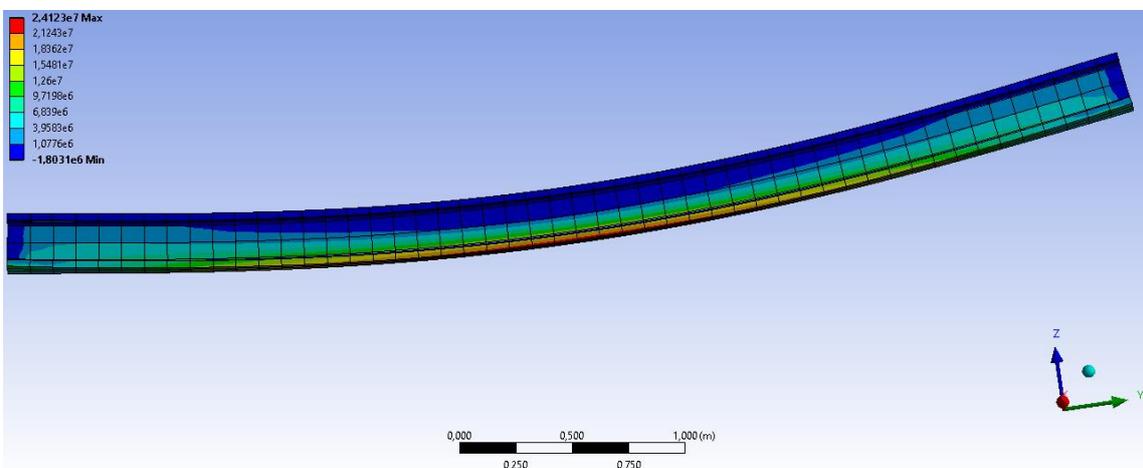


Figura 6.2: Distribución tensional en la viga de sección doble T.

Las vigas modeladas, mantienen la sección transversal durante todo su eje longitudinal y la sección trasversal es la que se muestra en las figuras 12.1 y 12.2 del anexo II. También cabría decir, que para cada situación de carga se utilizara una magnitud diferente de viga que se mantendrá entre los ensayos de los diferentes tipos de vigas (solo vidrio, mixtas...).

Estas, han sido modeladas tridimensionalmente a partir de tres elementos independientes debido a la necesidad de definir su material independientemente (para las vigas mixtas).

Se ha modelado un cuarto elemento, que es el que se encargaría de unir los otros tres, y se ha definido como resina epoxi. Esto viene de que como se nombrado anteriormente constituye la mejor opción para este cometido.

La unión de los cuatro elementos se ha definido como “bonded”, que es una unión perfecta que impide ningún tipo de separación entre los elementos. Se ha definido de esta manera porque se busca hallar el limite tensional de las vigas y se descarta el fallo por adhesivo.

6.1.2. Mallado

Se han mallado las vigas con elementos hexaédricos simples de un máximo de 10 cm en el borde de mayor longitud (varia un poco dependiendo de la luz para poder entrar dentro de la cantidad de elementos que permitía la licencia de estudiante) y en las zonas donde se producía la tensión máxima en el vidrio, se ha hecho un refinamiento utilizando elementos tetraédricos de segundo orden y de un tamaño muy inferior.

6.1.3. Condiciones de contorno

En todas ellas se hará el cálculo teniendo en cuenta que la viga estará simplemente apoyada sobre dos pilares (en sus extremos) y que la carga es constante durante la longitud de la misma.

Los apoyos constituirán la situación isostática más sencilla, donde uno de los apoyos simples es fijo y el otro le permite el movimiento en la dirección longitudinal.

6.1.4. Estado de carga

Las situaciones de carga utilizadas serán las siguientes:

1. Un cobertizo en el que los pórticos soporten el peso de las pantallas, el viento y la nieve.
2. Una casa unifamiliar en donde el forjado del segundo piso es de vidrio, y soporta la sobrecarga asociada a ello.
3. Una oficina con una disposición parecida a la casa anterior. La carga sería mayor al caso dos.

En cada caso las sobrecargas a las que le tendré que exponer, están regladas y serán las siguientes:

La densidad del vidrio es de 2500 Kg/m^3 y después de cerciorar que las pantallas son capaces de soportar las cargas (con mucha holgura) se ha decidido optar por pantallas de vidrio laminado de 6 cm de grosor para el primer caso y de 10 cm para los otros dos. El análisis tensional de estos elementos (Anexo II) se ha hecho también mediante elementos finitos.

En cuanto a las cargas de viento y nieve en el primer caso, se ha cogido como referencia las máximas cargas que, por normativa, nos podemos encontrar en el País Vasco. En cuanto a la carga por nieve sería $0,9 \text{ KN/m}^2$ y por viento (tras aplicar los coeficientes necesarios) $-0,67 \text{ KN/m}^2$.

Dado que la carga producida por el viento es negativa, y que queremos hacer el análisis con la mayor carga, se hará el análisis teniendo en cuenta solo el peso propio y la nieve.

En el caso de la segunda y tercera situación las sobrecargas por uso serán de 2 KN/m^2 y 4 KN/m^2 respectivamente.

Todos los datos de las cargas han sido extraídos del código técnico (Anexo I), para hacer el estudio lo más aplicable posible a las condiciones de carga que se le exigirá soportar.

6.2. Fase de cálculo

En el ANSYS, las vigas se han modelizado de la misma forma descrita anteriormente, mediante tres elementos independientes, unidos mediante un cuarto (el epoxi). Las uniones se han designado como perfectas, ya que se considera que la fractura vendrá dada por el estado tensional del vidrio.

La viga será expuesta a una presión constante en el área superior de la misma. Se ha recurrido a este tipo de acción, porque es la que se asemejara más a estado real que

encontrara la viga. Las cargas se han calculado con anterioridad, teniendo en cuenta, tanto la carga que soportan, como la anchura de cada viga.

Tabla 6.1: Valores de la presión aplicada.

	1. Caso	2. Caso	3. Caso
Presión (MPa)	49,09	84,375	121,875

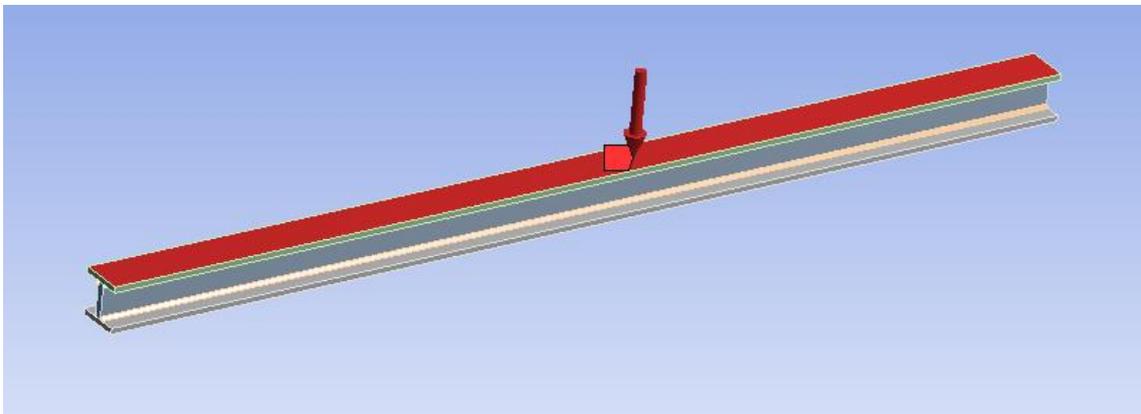


Figura 6.3: Muestra de cómo se ha aplicado la presión sobre las vigas.

Se han mallado las vigas con un tamaño de 10 cm de forma general y se han refinado los puntos en los que se encuentren las tensiones más problemáticas, siendo siempre estas las zonas donde se encontraba la tensión más grande del vidrio. En el refinado se han utilizado elementos de segundo orden para conseguir la mayor precisión posible.

Se ha prestado mucho más interés al vidrio, que a los demás componentes, porque su tensión (a tracción) máxima, es muy inferior a la de los demás y la fractura siempre sucede por su parte.

Los materiales que se usarán para formar las vigas mixtas serán el acero, la madera, el GFRP y se hará una pequeña prueba con el CFRP. No se estudiará en profundidad, por la ausencia de un estudio que demuestre su comportamiento en la fractura y solo se hará para mostrar las posibilidades que este puede llegar a tener.

En todas las vigas mixtas, la fibra central será de vidrio y las dos externas serán del otro material. Lógicamente, así se definirán también en el programa.

Las características de los materiales vendrán dadas por el programa en sí, ya que en las bibliotecas de datos propias se encuentran todos ellos. Los datos más relevantes están en la tabla 8.1, menos los coeficientes de Poisson de los composites, que varían respecto al plano y por eso no están.

Tabla 6.2: *Propiedades mecánicas de los materiales usados.*

Material	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Tensión última de tracción (MPa)	Coefficiente de Poisson (-)
Vidrio	2400	67	45	0,23
Acero estructural	7850	200	250 (fluencia)	0,3
Madera de roble	936	22,8	147	0,374
GFRP	2000	50	1000	-
CFRP	1540	209	1900	-

En cuanto a las soluciones, se buscará conocer la expresión máxima de la tracción debido a que de aquí provendrá la fractura. A parte, también se buscarán los valores máximos de deformación en el eje vertical, para poder analizar su importancia.

6.3. Resultados

Primero se han calculado las tensiones con luces de 5 metros y una distancia de 5 metros entre pórticos con intención de comparar directamente los coeficientes de seguridad que nos aportaría cada tipo de viga, en el caso que se utilicen en la situación del cobertizo antes descrito.

Se ha comparado en estas condiciones de carga, porque es en la única que todos los tipos de viga rinden lo suficiente como para plantearse su uso. En el Anexo II están las imágenes de la distribución de tensiones en cada una, de donde se ha conseguido las tensiones en el vidrio, y de ahí los coeficientes de seguridad. Como se había previsto, las tensiones críticas se han dado en el vidrio, y por eso en los resultados solo se han tenido estas en cuenta. La tabla 8.3. muestra la totalidad de los resultados de estos cálculos.

Tabla 6.3: Resultados de las vigas con luz de 5 metros.

	Deformación máxima (mm)	Tensión máxima en el vidrio (MPa)	Coefficiente de seguridad (-)
Vidrio	8,46	28,31	1,589
Acero-Vidrio	3,37	8,2	5,48
Madera-Vidrio	19,67	44,6	1,01
GFRP-Vidrio	11,03	24,63	1,827
CFRP-Vidrio	3,326	7,85	5,73

Por último, se ha calculado las luces máximas que pueden aportar cada tipo de viga con un coeficiente de seguridad de alrededor de 1,5. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.4.

Tabla 6.4: Resultados de los cálculos para obtener la luz máxima.

	Situación de carga	Carga máxima vidrio (MPa)	Deformación máxima (mm)	Luz (m)	Coefficiente de seguridad real (-)
Vidrio	1	28,31	8,4	5	1,58
	2	29,1	7,25	4,8	1,54
Acero-Vidrio	1	29,35	51,6	10	1,53
	2	30,9	33,9	9	1,45
	3	31,2	23,4	7,5	1,44
Madera-Vidrio	1	28,57	8,1	4	1,57
GFRP-Vidrio	1	29,75	16	5,5	1,51
	2	30,6	7,9	4,6	1,47
CFRP-Vidrio	1	30,4	47	10	1,48

7. TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT

7.1. Tareas

Seguidamente se procederá a explicar las tareas que se han llevado a cabo para realizar este proyecto.

T1. Definición del trabajo

La primera tarea consiste en recibir la información necesaria por parte del director para definir el alcance y los objetivos del proyecto. Una vez obtenida la información se procede a investigar y buscar información sobre el tema que se va a estudiar.

T2. Estudio del estado del arte

El estudio del estado del arte consistirá en la labor de búsqueda de información tanto en internet como en libros a cerca del uso que se le da al vidrio en la construcción y específicamente en la construcción de vigas y sus posibilidades. Esta tarea, debido a lo amplio del área de estudio se ha llevado a cabo durante gran parte de la duración del trabajo.

T3. Fase de calculo

T3.1 Familiarización con ANSYS

Debido a la limitada practica que se tenía previamente en el uso de programas de elementos finitos como el ANSYS, se tuvo que dedicar cierto tiempo a familiarizarse con él.

T3.2 Definición de situación de carga

En este tipo de cálculos hay muchas variables, y el estudio de todas ellas volvería el trabajo innecesariamente extenso. Por lo tanto, se tuvieron que fijar ciertas condiciones en las que se llevaría a cabo el estudio.

T3.3 Comprobación del estado de carga de los demás elementos

Hubo que asegurar que los elementos que cargaba las vigas pudiesen también soportar las cargas propuestas dentro de la seguridad acordada.

T3.4 Modelización y calculo

Se crearon los modelos de las vigas definiendo la carga, mallándolos y posteriormente realizando el cálculo. De aquí, se obtuvieron los resultados.

T4. Valoración de resultados

Una vez obtenidos todos los resultados, se observaron para llegar a las conclusiones.

T5. Gestión del proyecto

T5.1 Reuniones con el director

Para poder garantizar una correcta realización del proyecto, resolver dudas y decidir la trayectoria que ha de seguirse a lo largo del proyecto, se realizan reuniones con los directores del TFG, Roque Borinaga y Eduardo Roji.

T5.2 Redacción del trabajo

Se realiza la memoria escrita del trabajo realizado. En este documento se relatarán aspectos como el estado del arte, la metodología seguida y diagrama de Gantt entre otros muchos aspectos.

7.2. Cronograma

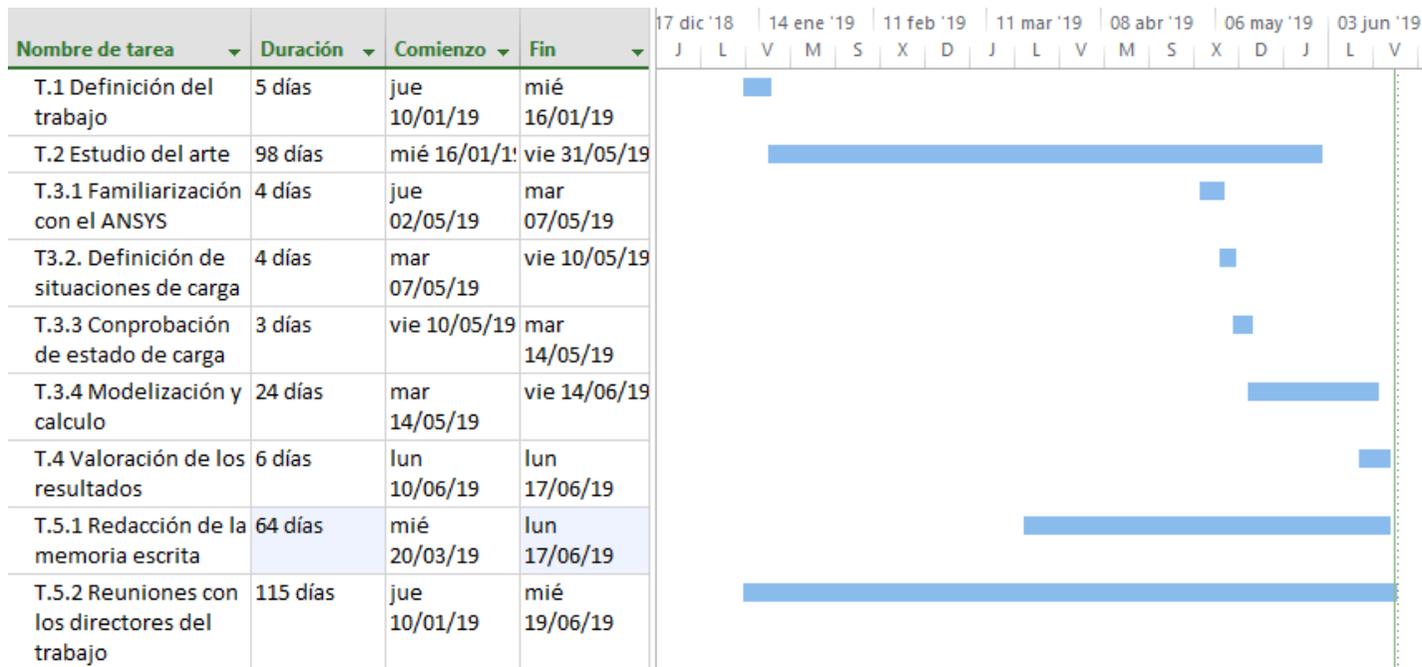


Figura 7.1: Diagrama de Gantt

8. DESCARGO DE GASTOS

8.1. Costes de recursos humanos

En el coste de recursos humanos o coste de horas internas se tendrán en cuenta: las horas invertidas por parte del alumno para ejecutar el proyecto y las horas de tutoría requeridas con el director del proyecto.

Directores del proyecto: Eduardo Roji y Roque Borinaga Treviño

Ingeniero junior: Josu Urrutia Gorostiaga

Horas internas	Número de horas	Tasa	Coste
Director del proyecto	15 h	50 €/h	750 €
Ingeniero junior	160 h	30 €/h	4800 €
Total			5550 €

Tabla 8.1: Partida de costes de recursos humanos.

8.2. Coste de amortizaciones

Dentro del coste de amortizaciones se contabiliza el gasto por el uso de recursos y aparatos electrónicos que pueden ser utilizados para otros proyectos, así como licencias de software. Solo se contará el tiempo que he utilizado la licencia facilitada por la universidad (Teaching) por que la licencia student es gratuita.

Amortizaciones	Coste total	Horas utilizadas	Horas útiles	Coste parcial
Ordenador	1000 €	140 h	8000 h	17,5 €
Licencia ANSYS Teaching	17756 €	10 h	8760 h	20,27 €
Licencia Microsoft Office Profesional 2018	539 €	70 h	3000 h	12,57 €
			Total	50,34 €

Tabla 8.2: Partida de costes de amortizaciones.

8.3. Coste de recursos materiales

Los únicos gastos a tener en cuenta para la realización de este trabajo son el supuesto por los viajes a la universidad para las reuniones con el director y el gasto hecho en papelería.

Gastos	Coste
Viajes	20 €
Papelería	10 €
Total	30 €

Tabla 8.3: Partida de costes de gastos.

8.4. Costes indirectos

Se tendrán en cuenta como costes indirectos los que no puedan atribuirse directamente al trabajo. Se les asignará un valor del %5 de la suma de los conceptos previamente mencionados, ascendiendo a un valor de 281,02 €.

8.5. Descargo de gastos final

A continuación, queda presentado el completo coste del proyecto y su total descargo de gastos según los principales conceptos:

Concepto	Coste
Horas Internas	5550,00 €

Amortizaciones	50,34 €
Gastos	30,00 €
Subtotal	5630,34 €
Costes indirectos	281,52 €
Total	5911,86 €

Tabla 8.4: Partida total de descargo de gastos.

9. CONCLUSIONES

9.1. Conclusiones

En este apartado se realizará una breve explicación de las conclusiones sacadas de los resultados y de la propia realización de este trabajo.

Lo primero, es aclarar que el estudio llevado a cabo solo es el inicio del examen del comportamiento del vidrio en este tipo de cometido estructural y que, para determinar realmente su viabilidad, habría que hacer (tomando esto como base) ensayos más concretos que cubran todas las situaciones a las que se le expondrá realmente. El vidrio tiene ciertas características que en un programa de elementos finitos no se pueden (o al menos no sin tener datos de los ensayos) introducir realmente. El más importante podría ser, entre mucho otros, el hecho de que el vidrio se fractura antes de llegar a su tensión última debido a defectos superficiales. Debido a todo esto, los resultados que se han obtenido muestran el comportamiento que, idealmente, podría llegar a dar.

Vistos los resultados obtenidos, se puede observar que el rendimiento de las vigas mejora cuando se crean vigas mixtas con un material con mayor módulo de Young que el vidrio. Esto responde a que, con la misma deformación, cuanto mayor es el módulo, más tensión se produce y si se garantiza la unión entre los dos elementos el de menor módulo elástico queda relevado de cierta tensión, aumentando así la capacidad total de la viga.

Con esto y teniendo en cuenta los resultados, se puede decir que el uso de la madera en este tipo de elementos queda descartado a menos que el objetivo sea meramente estético, ya que, sin más estudio, su rendimiento es inferior.

En cuanto al GFRP, se obtiene un rendimiento parecido (algo superior) pero la principal ventaja que aporta la creación de vigas mixtas con este material, es la capacidad de

mantener gran parte de su resistencia después de la fractura, convirtiéndolo en una opción más segura. Por lo tanto, su elección dependerá más de consideraciones estéticas y económicas.

El acero por su parte, ha demostrado ser la opción más viable, mejorando muchas veces la capacidad inicial y llegando a conseguir el doble de luz que las vigas de vidrio. En este estudio no se ha discutido el hecho de que existen muchos tipos de acero y que, muy probablemente, haya alguno que podría ser más óptimo en este uso. Se ha recurrido al acero estructural más común.

Por último, el CFRP ha demostrado un magnífico comportamiento, pero debido a que no hay ningún estudio que garantice que su comportamiento posterior a la fractura sea suficientemente seguro (seudoplasticidad), solo se ha hecho un pequeño cálculo para mostrar sus capacidades.

9.2. Líneas futuras

En un futuro, se podría seguir por este camino y hacer ensayos que determinen finalmente el potencial del uso de este material en elementos estructurales a flexión. Todavía quedaría traspasar los resultados obtenidos a ensayos donde se tomen en cuenta cosas como la variabilidad en las propiedades del vidrio, la fatiga estática, el efecto de cargas puntuales...

Ligado a esto, un tema que requiere de una atención especial sería la mejora del sistema de fabricación del vidrio. La utilización del vidrio estructuralmente es muy compleja debido a la inseguridad en sus propiedades y si el sistema de fabricación pudiera mejorar se simplificaría enormemente.

También se podría estudiar el efecto del tipo de los apoyos en su rendimiento, porque en este trabajo se han simplificado mucho, con el objetivo de fijar unas condiciones sencillas para el cálculo.

En definitiva, todavía quedan muchas incógnitas sobre este tipo de elementos, que se podrían estudiar en un futuro.

10. Referencias

10.1. Bibliografía

- [1] Jan Wurm. *Glass structures: Design and construction of self-supporting skins*. Alemania 2007. ISBN: 978-3-7643-7608-6.
- [2] Joao R. Correia, Luis Valarinho, Fernando A. Branco. *Post-cracking strength and ductility of glass-GFRP composite beams*. Portugal 2011.
- [3] Eric Le Bourhis. *Glass: Mechanics and technology*. Second edition. Francia 2014. ISBN: 978-3-527-33705-7.
- [4] J.E. Shelby. *Introduction to glass science and technology*. Second edition. Reino Unido 2005. ISBN: 0-85404-639-9.
- [5] Kuralay. *Structural properties of laminated safety glass*. Estados Unidos de América 2014.
- [6] j. Belis, D.Callewaert, D. Delincé, R. Van Impe. *Experimental failure investigation of a hybrid glass/steel beam*. Bélgica 2008.
- [7] Du Pont. *Properties of Sentry Glass Plus*. Disponible en: www2.dupont.com/Building_Innovations/zh.../SGPintro_E.pdf
- [8] Zhi-Yu Wang, Yalong Shi, Qing-Yuan Wang, Yaoyong Wu, Mingde He. *In-plane shear compression behavior of steel-glass composite beams with laminated glass webs*. China 2017.
- [9] Francesc Arbós Bellapart. *El vidrio en la ingeniería estructural: propiedades esenciales*.
- [10] J.M. Cerezo Miguel, M.A. Nuñez Díaz, B. Lauret Agirregabiria. *Nuevos conceptos en elementos estructurales de vidrio: vigas pretensadas*. España.

[11] Cristian Louter, Jan Belis, Frederic Veer, Jean-Paul Lebet. ***Structural response of SG-laminated reinforced glass beams; experimental investigatios on the effects of glass type, reinforcement percentage and beam size***. Suiza 2011.

[12] Camilla Fors. ***Mechanical properties of interlayers in laminated glass***. Suecia 2014.

10.2. Web-grafía

[13] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/frameless-glass-deck-railing-u-glass-channel-balustrade-60033740192.html>

[14] <https://www.pinterest.es/vidreglass/barandillas-de-cristal/>

[15] https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_butryral

[16] <https://books.google.es/books?id=IYfqCAAQBAJ&pg=PA36&lpg=PA36&dq=sgp+polymer&source=bl&ots=3zoxlZsBDU&sig=B-QS5Bc6wJlZRSUi9Jn8cCRYIAs&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiGmP2T1aXZAhWK8RQKHfvECUcQ6AEIRiAD#v=onepage&q=sgp%20polymer&f=false>

[17] <https://www.banffjaspercollection.com/attractions/glacier-skywalk/experience/>

[18] <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-302228/apple-patenta-su-diseno-del-cilindro-de-vidrio>

[19] https://elpais.com/tecnologia/2016/05/31/actualidad/1464698061_112950.html

[20] <http://vilssa.com/las-fachadas-de-cristal-ligeras-y-transparentes>

[21] <https://www.vidresweb.com/es/vidrio-laminado-33/72-vidrio-laminado-de-33-mm-transparente.html>

[22] <http://www.vidrieriaromanperu.com.pe/service/productos/>

[23] http://www.aluminiostomas.com/service_item/muro-cortina-y-lucernarios/

11. Anexo I (Código técnico)

Tabla 11.1: Valores característicos de las sobrecargas de uso.

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 (1)
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente (2)			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación (3)	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1(4)	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 11.2: Valores de reducción de sobrecarga.

Elementos verticales			Elementos horizontales			
Número de plantas del mismo uso			Superficie tributaria (m ²)			
1 o 2	3 o 4	5 o más	16	25	50	100
1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8	0,7

Tabla 11.3: Valores del coeficiente de exposición.

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Tabla 11.4: Coeficientes de presión interior.

Esbeltez en el plano paralelo al viento	Área de huecos en zonas de succión respecto al área total de huecos del edificio											
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
≤1	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	
≥4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	

Tabla 11.5: Sobrecargas de nieve en capitales de provincias y ciudades autónomas.

Capital	Altitud m	s _k kN/m ²	Capital	Altitud m	s _k kN/m ²	Capital	Altitud m	s _k kN/m ²
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante/Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	S. Sebastián/Donosita	0	0,3
Ávila	1.130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1.000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida/Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1.090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Orense/Ourense	130	0,4	Valencia/València	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
Coruña/A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria/Gasteiz	520	0,7
Cuenca	1.010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Gerona / Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona/Iruña	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

12. Anexo II (Resultados ANSYS)

12.1. Sección de las vigas

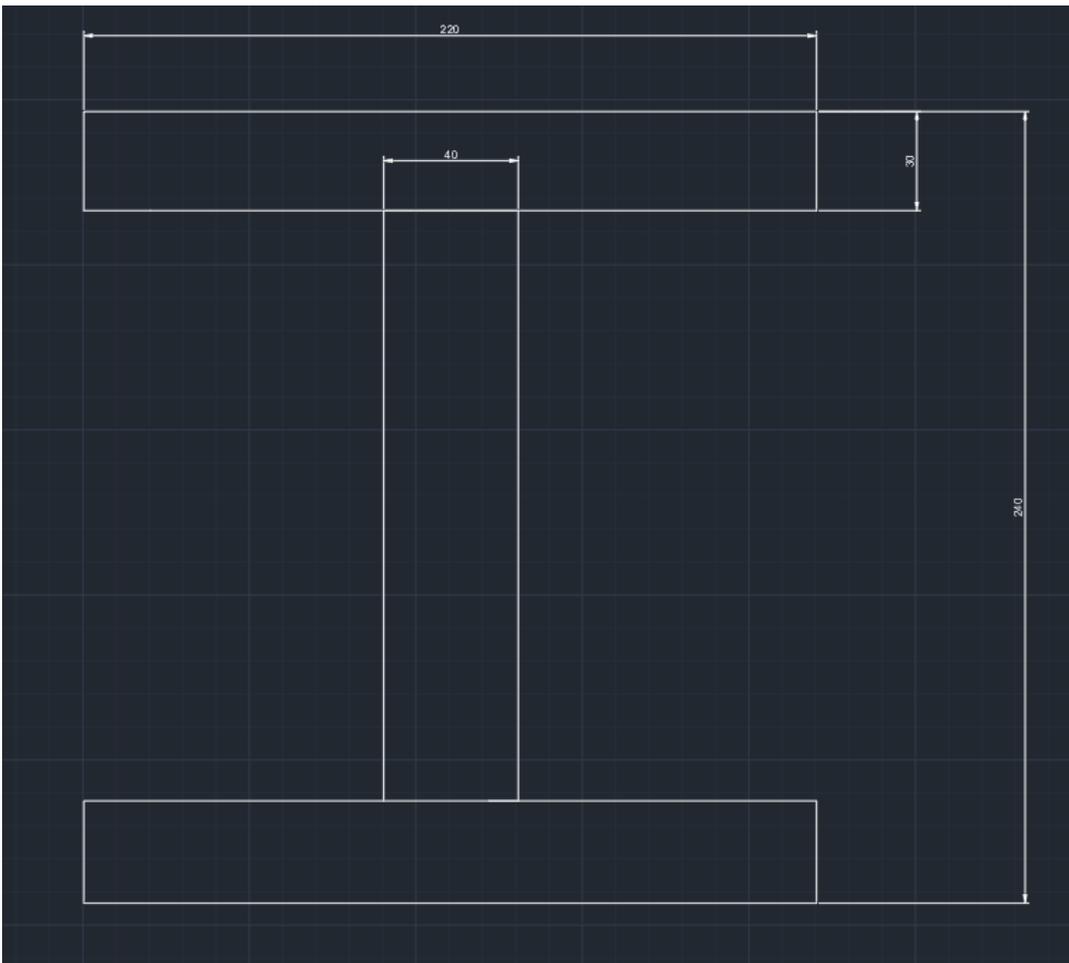


Figura 12.1: Sección de las vigas en la primera situación de carga.

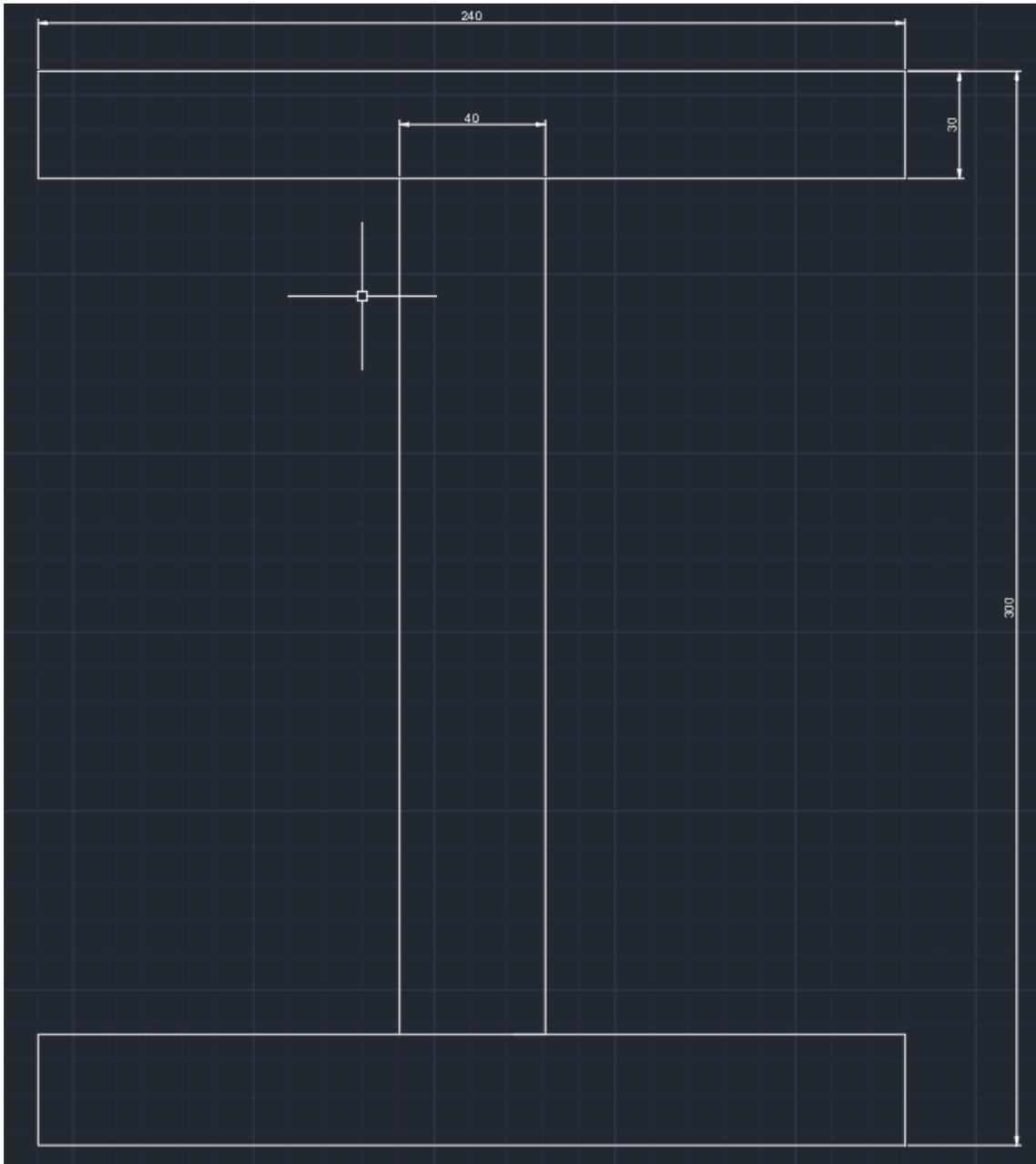


Figura 12.2: Sección de las vigas en la segunda y tercera situación de carga.

12.2. Pantallas de vidrio

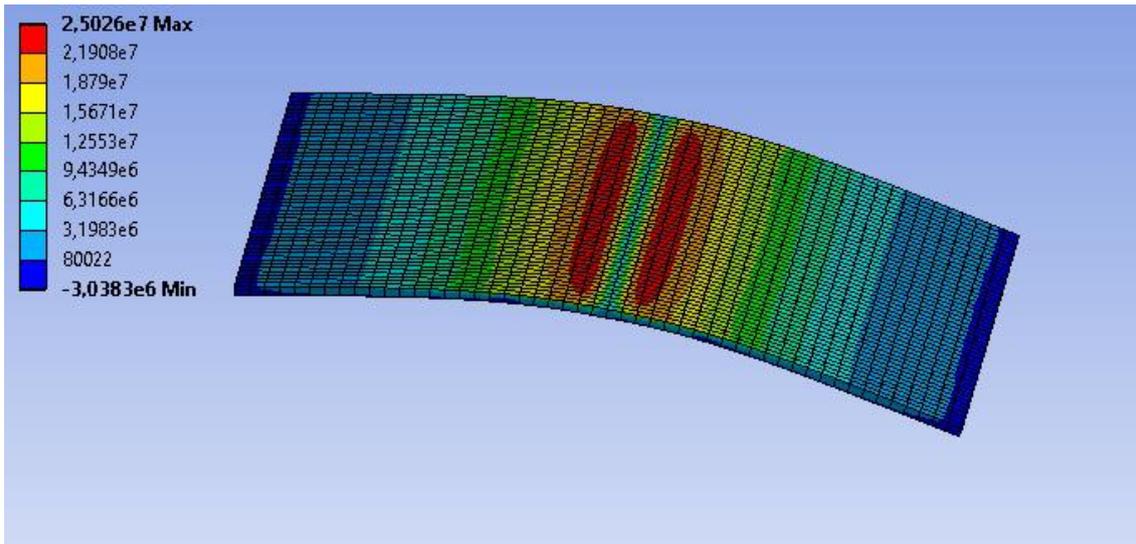


Figura 12.3: Distribución de tensión en la primera situación de carga.

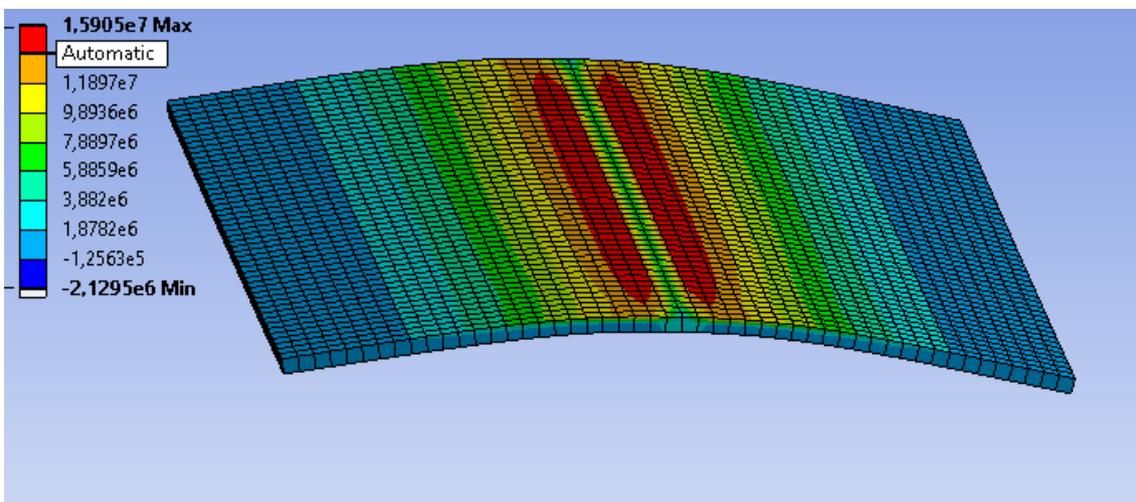


Figura 12.4: Distribución de tensión en la segunda situación de carga.

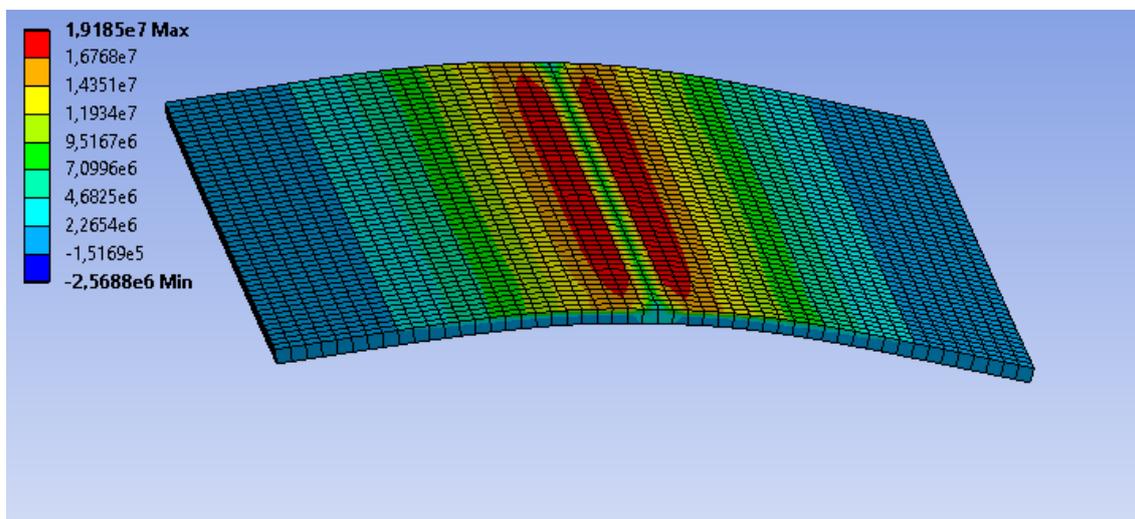


Figura 12.5: Distribución de tensión en la tercera situación de carga.

12.3. Vigas

12.3.1. Vigas de vidrio

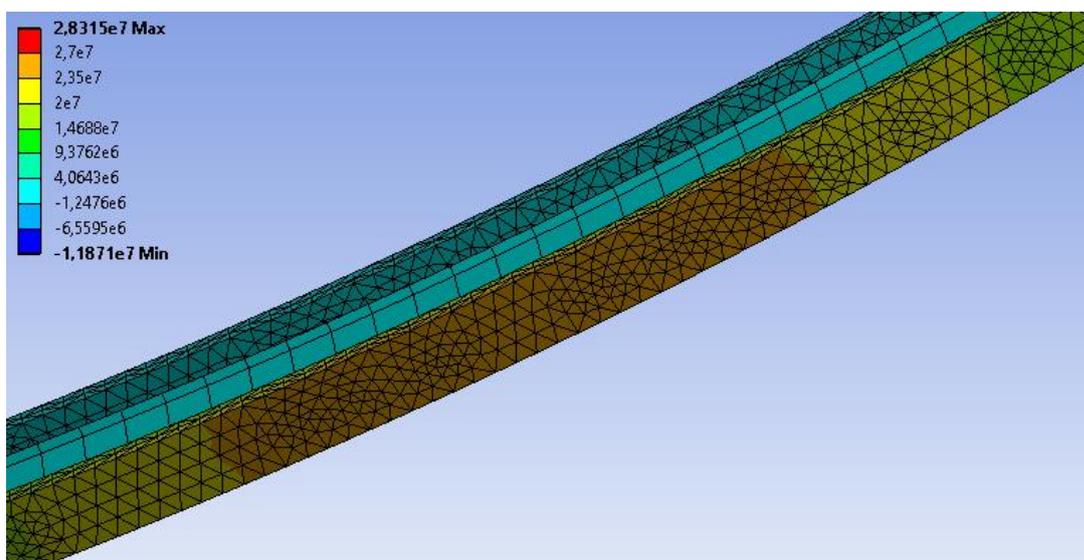


Figura 12.6: Distribución de tensión en la primera situación de carga con una luz de 5m.

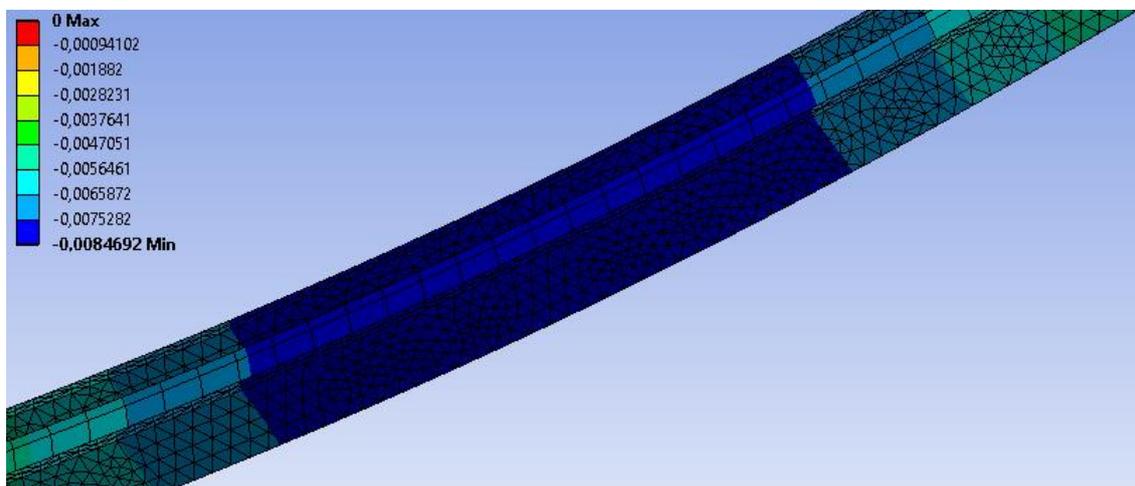


Figura 12.7: Deformación máxima en la segunda situación de carga con una luz de 5m.

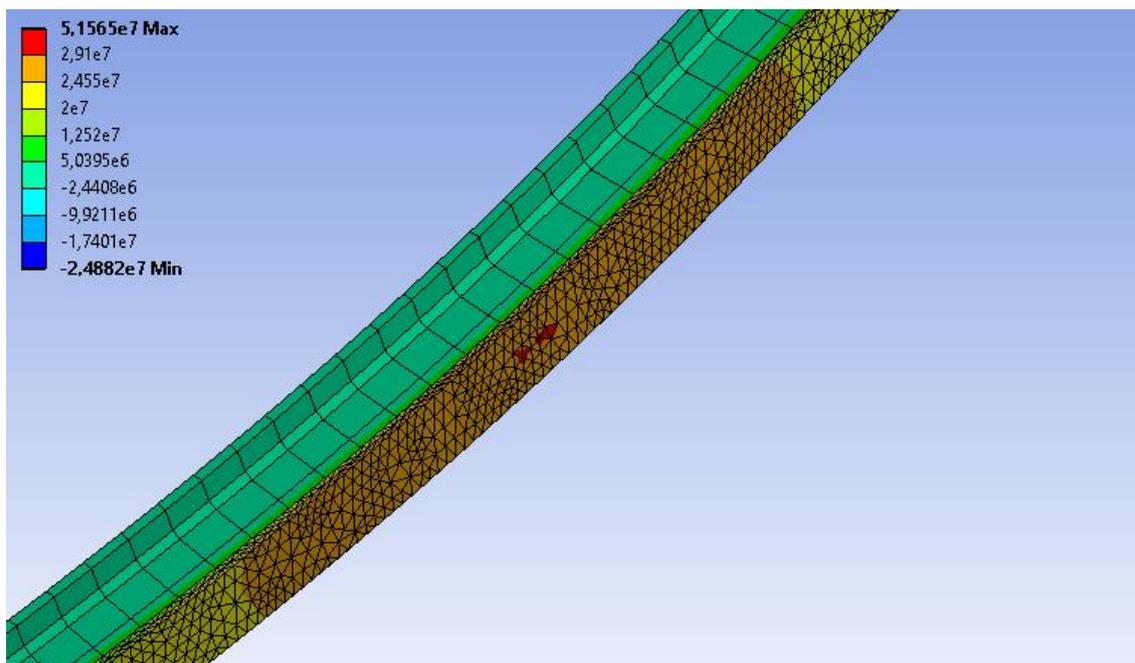


Figura 12.8: Distribución de tensión en la segunda situación de carga con una luz de 4,8m.

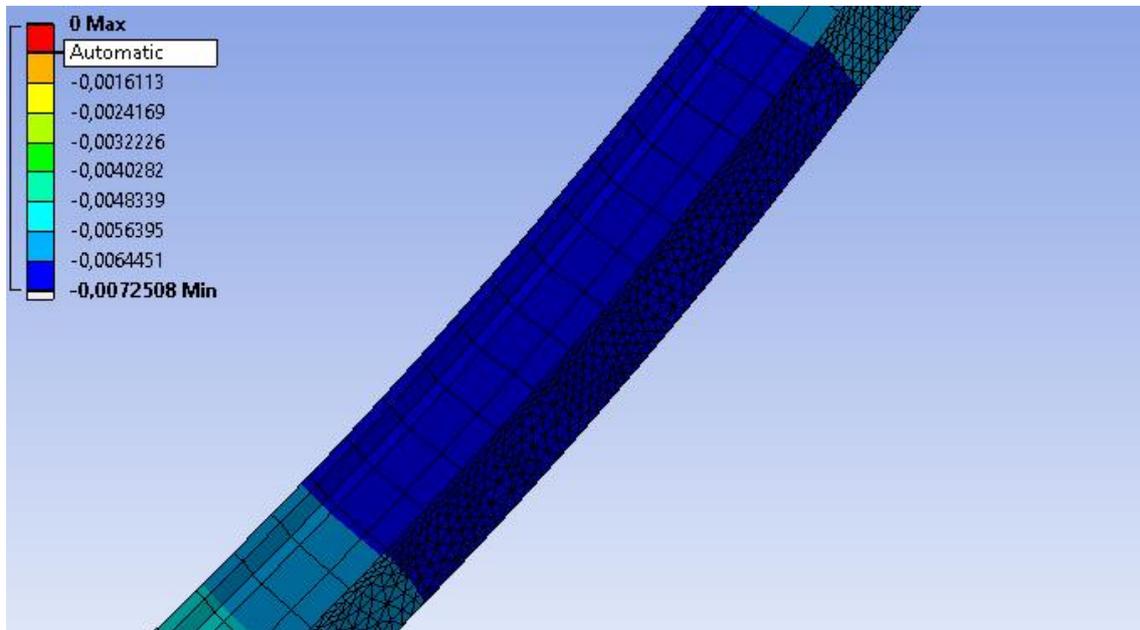


Figura 12.9: Deformación máxima en la segunda situación de carga con una luz de 4,8m.

12.3.2. Vigas mixtas acero-vidrio

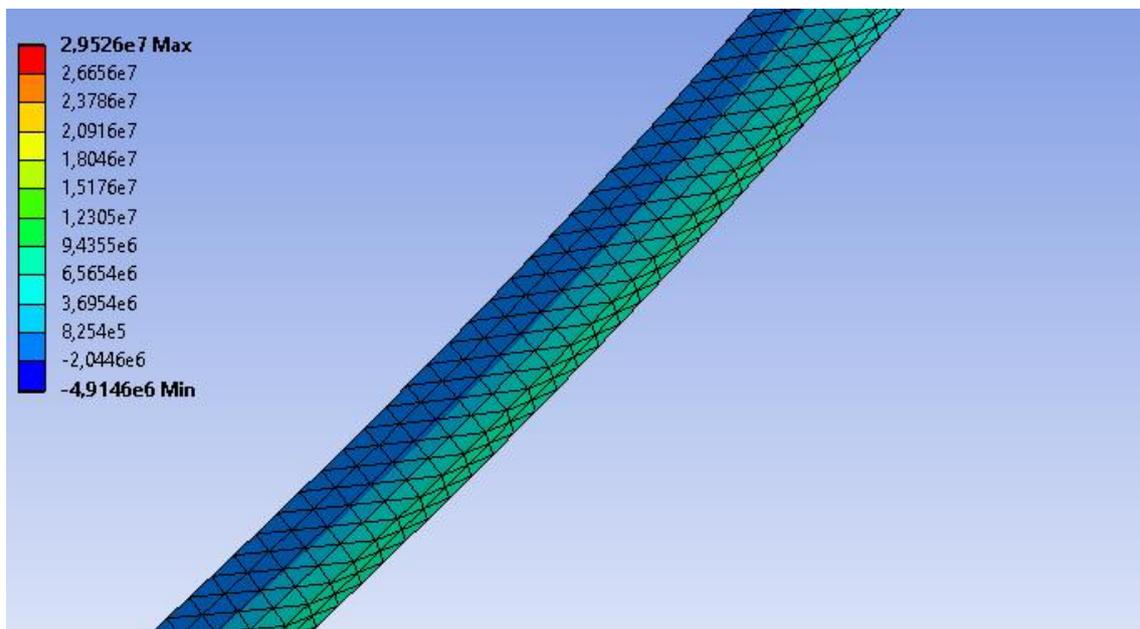


Figura 12.10: Distribución de tensión en la primera situación de carga con una luz de 5m.

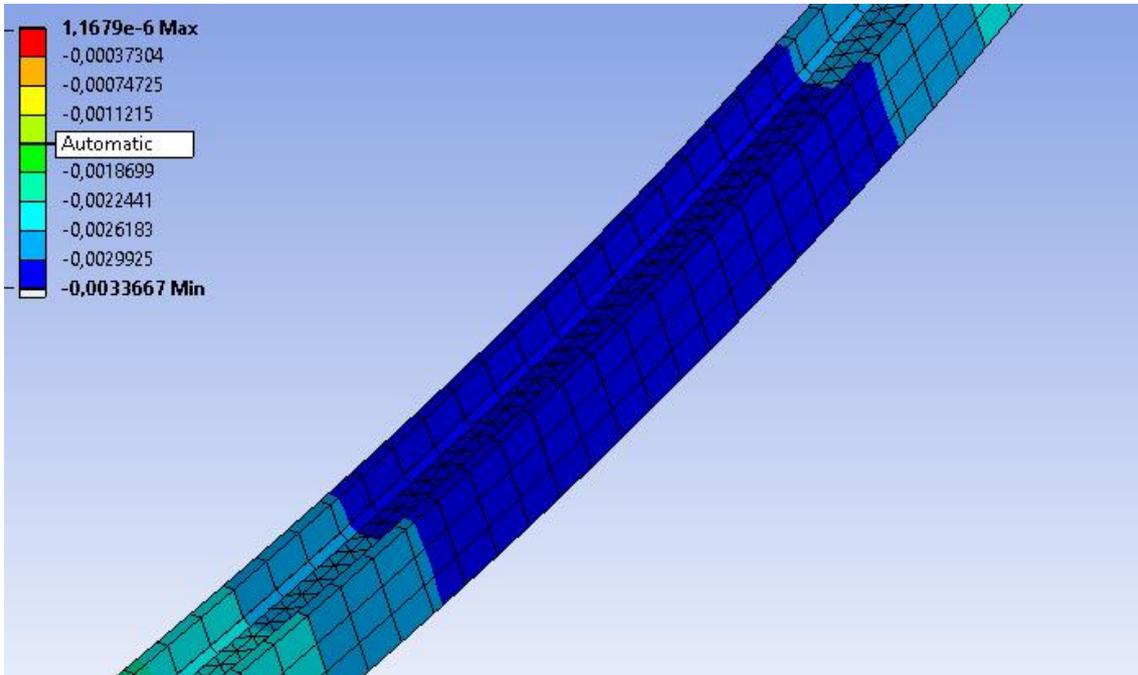


Figura 12.11: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 5m.

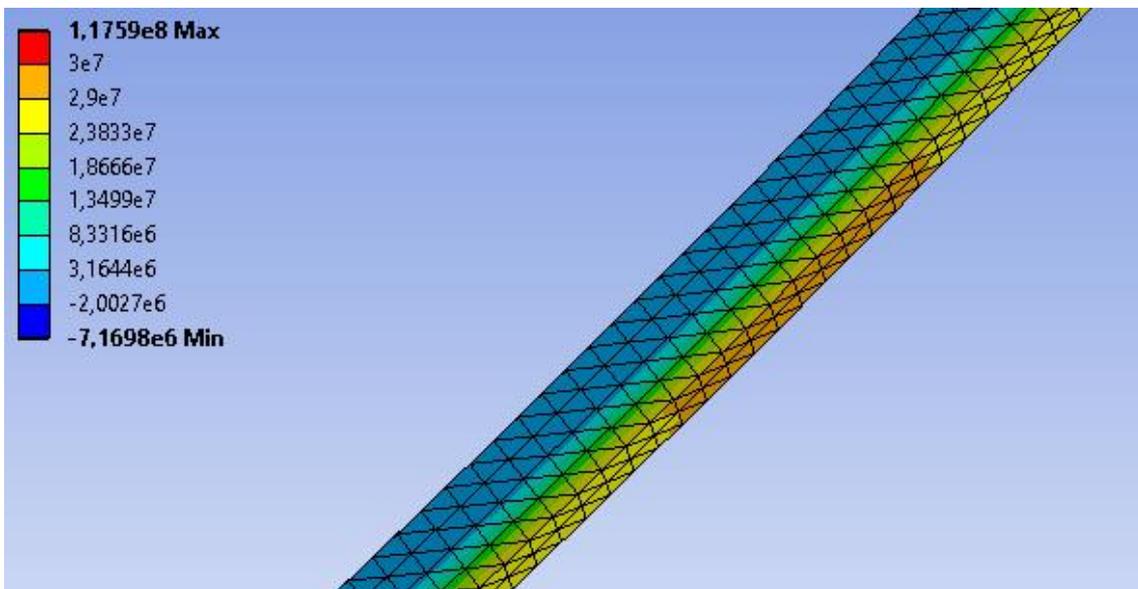


Figura 12.12: Distribución de tensión en la primera situación de carga con una luz de 10m.

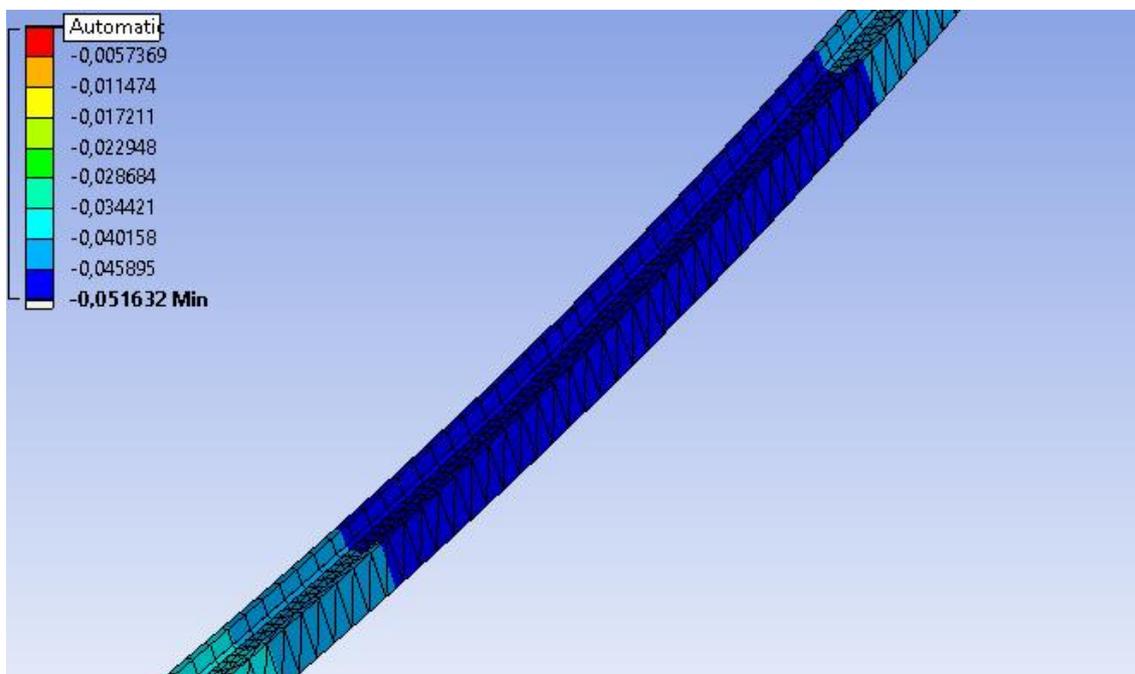


Figura 12.13: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 10m.

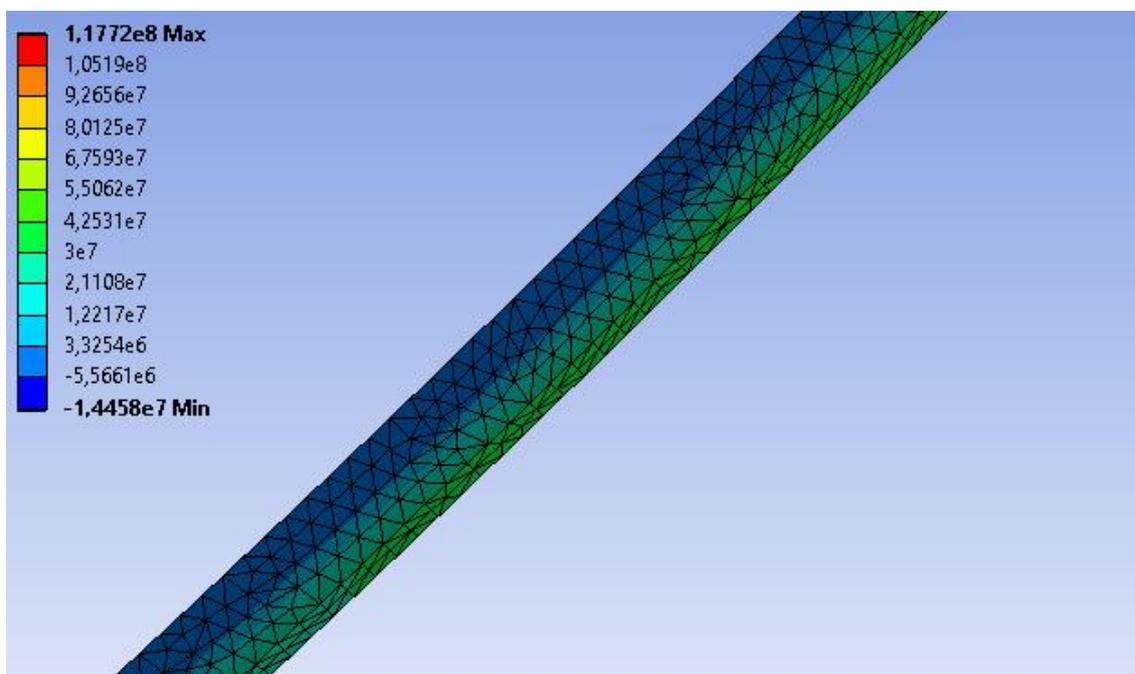


Figura 12.14: Distribución de tensión en la segunda situación de carga con una luz de 9m.

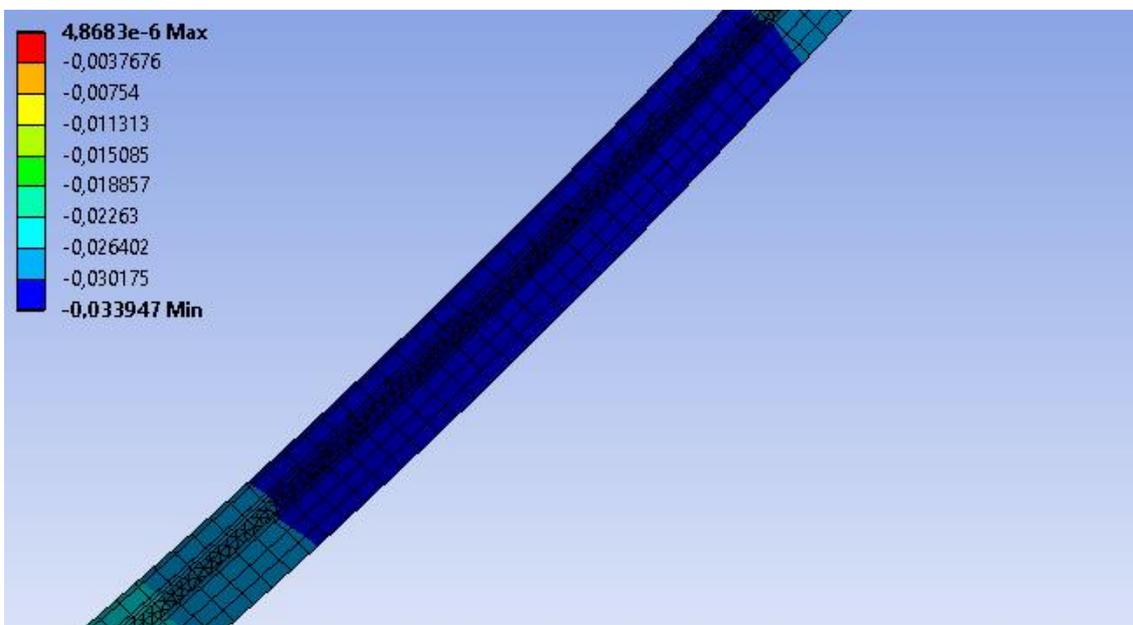


Figura 12.15: Deformación máxima en la segunda situación de carga con una luz de 9m.

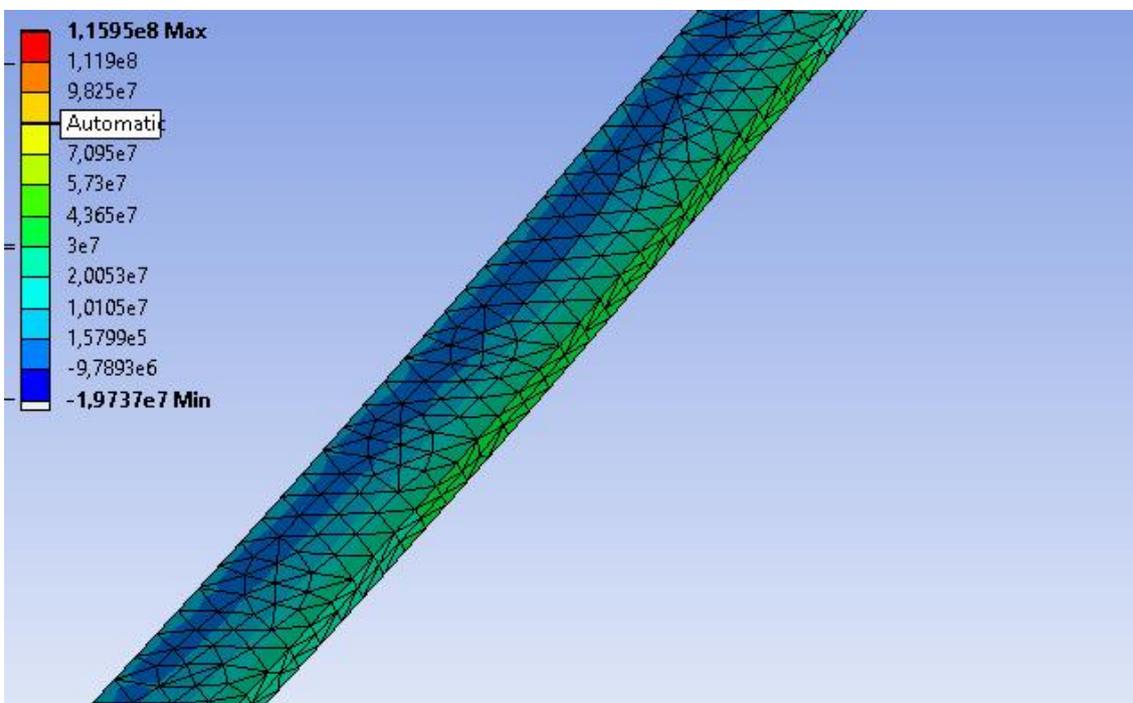


Figura 12.16: Distribución de tensión en la tercera situación de carga con una luz de 7,5m.

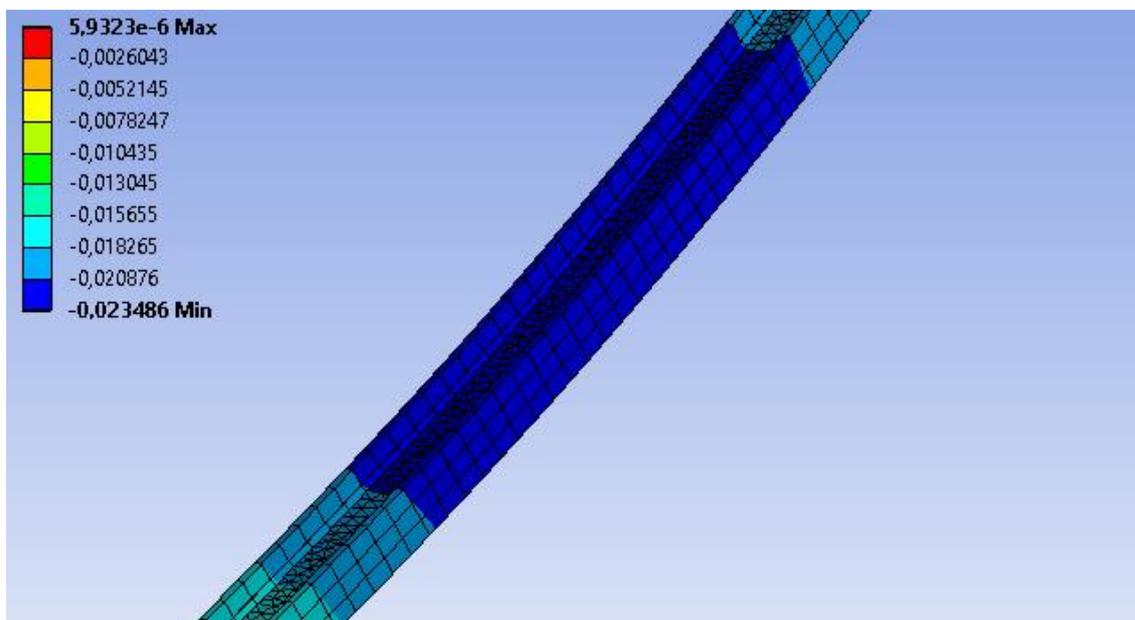


Figura 12.17: Deformación máxima en la tercera situación de carga con una luz de 7,5m.

12.3.3. Vigas mixtas madera-vidrio

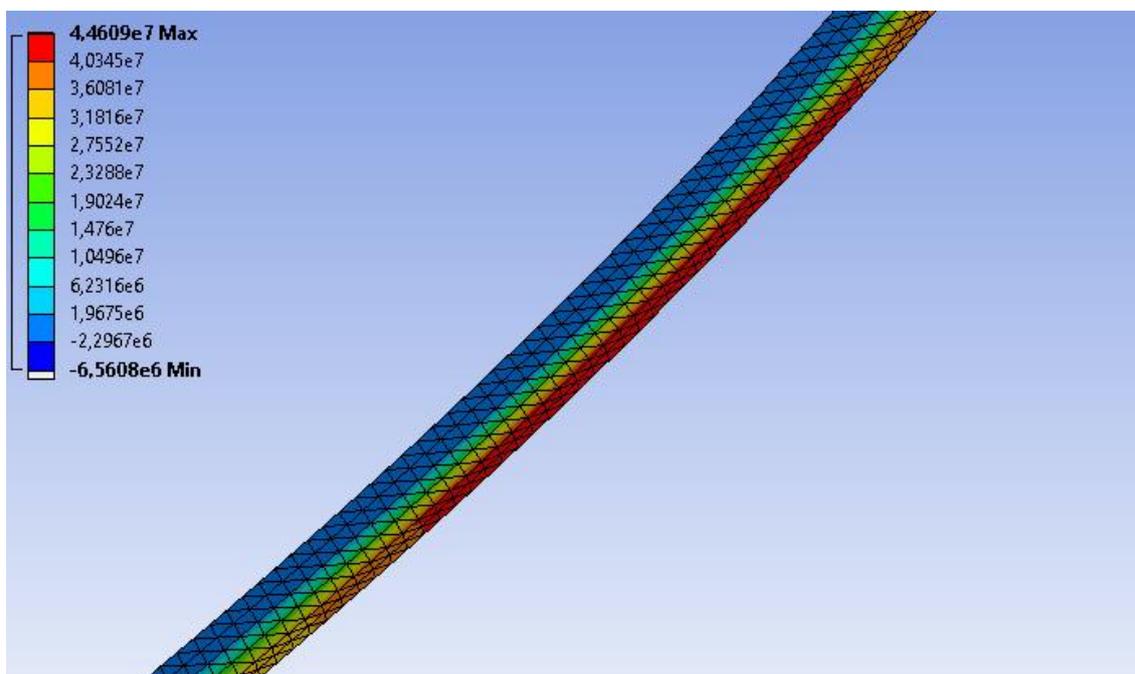


Figura 12.18: Distribución de tensión en la primera situación de carga con una luz de 5m.

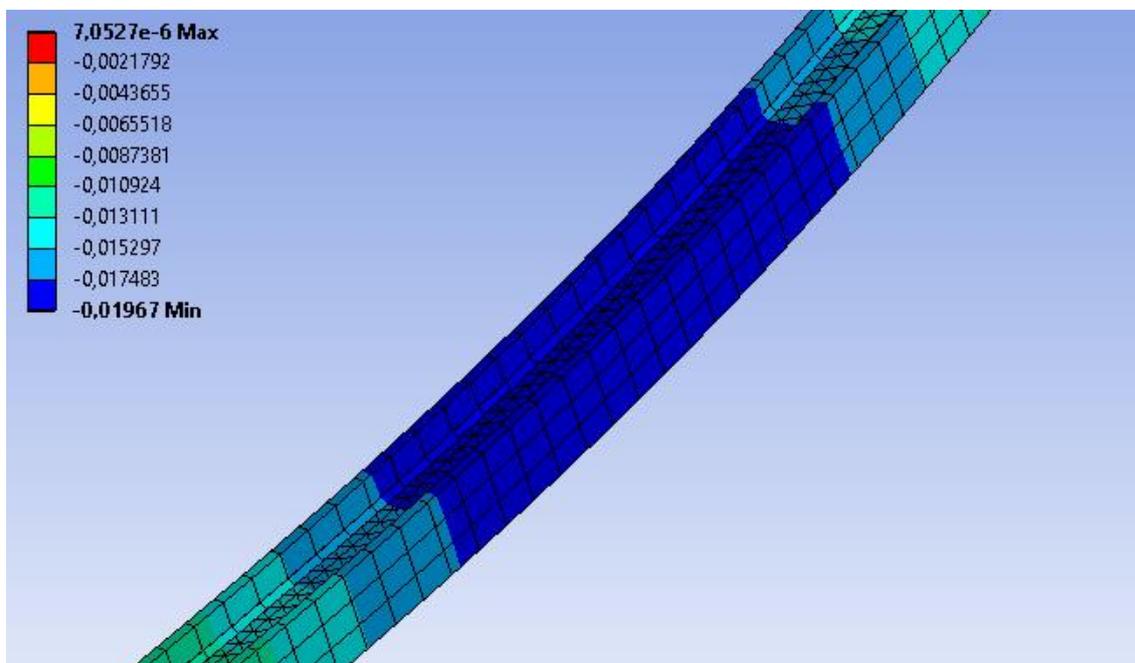


Figura 12.19: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 5m.

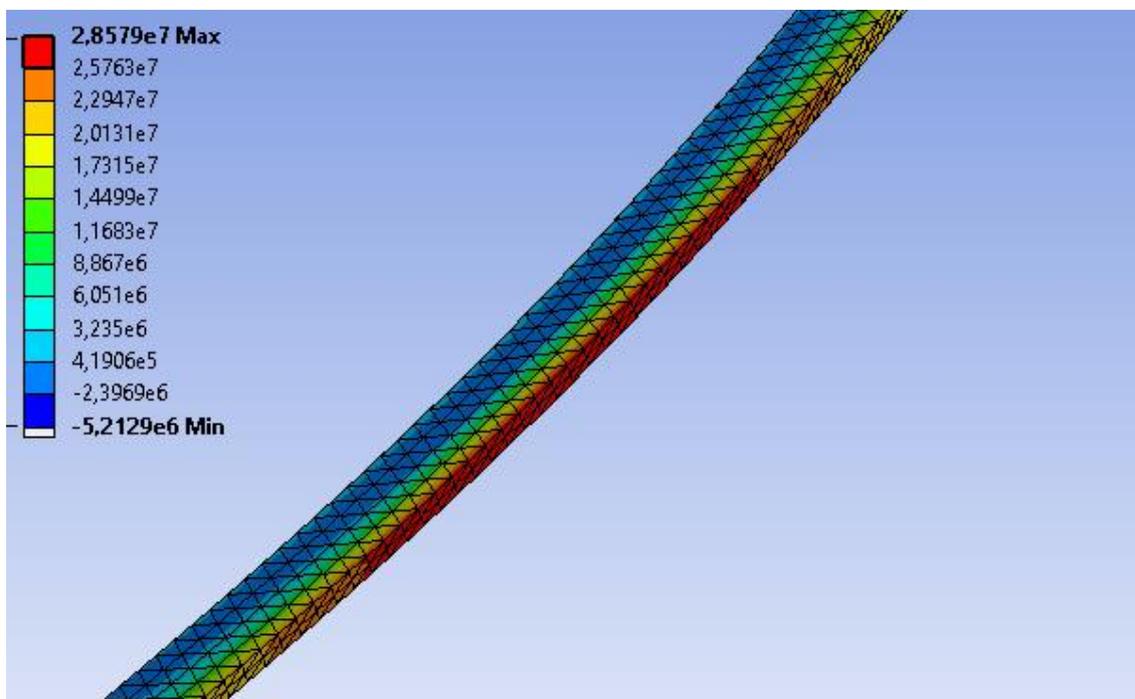


Figura 12.20: Distribución de tensiones en la primera situación de carga con una luz de 4m.

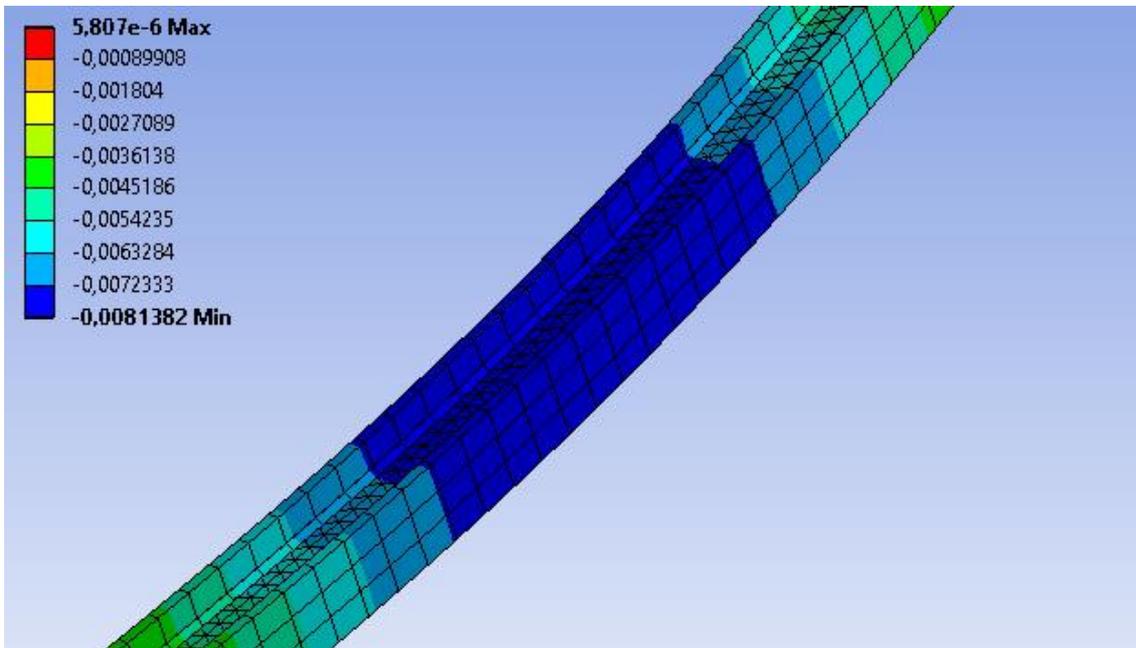


Figura 12.21: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 4m.

12.3.4. Vigas mixtas GFRP-vidrio

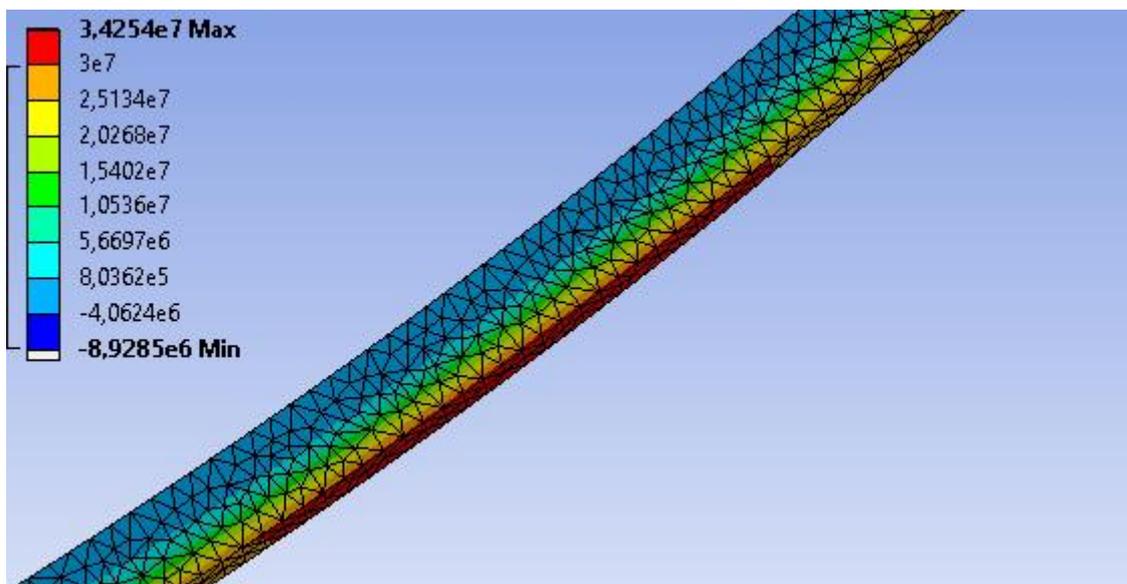


Figura 12.22: Distribución de tensiones en la primera situación de carga con una luz de 5m.

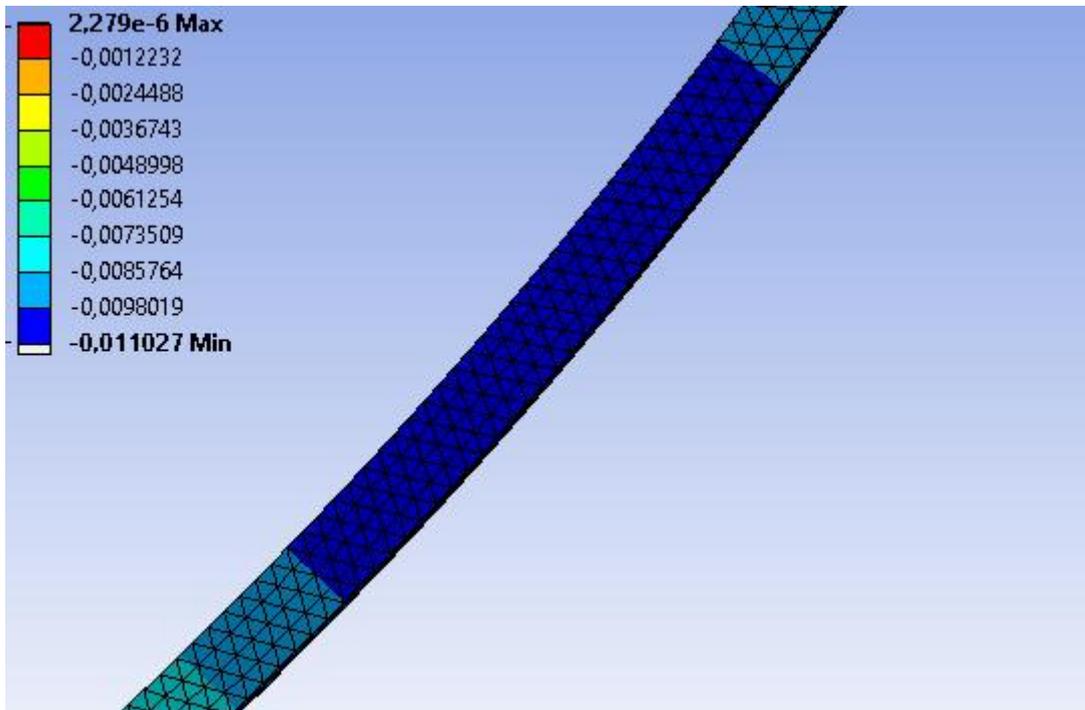


Figura 12.23: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 5m.

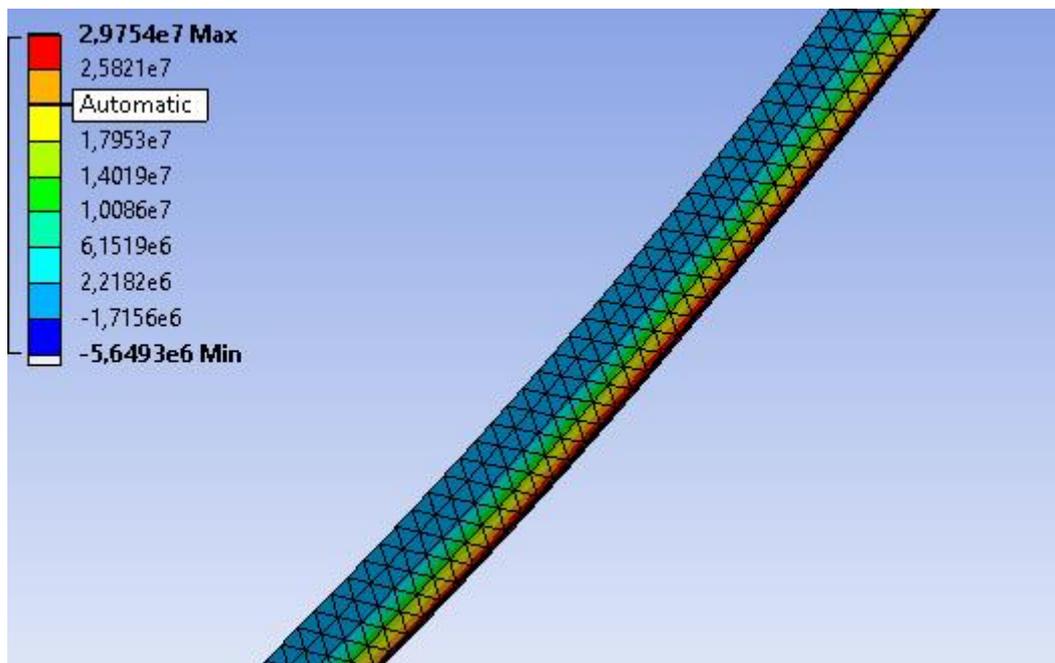


Figura 12.24: Distribución de tensiones en la primera situación de carga con una luz de 5,5m.

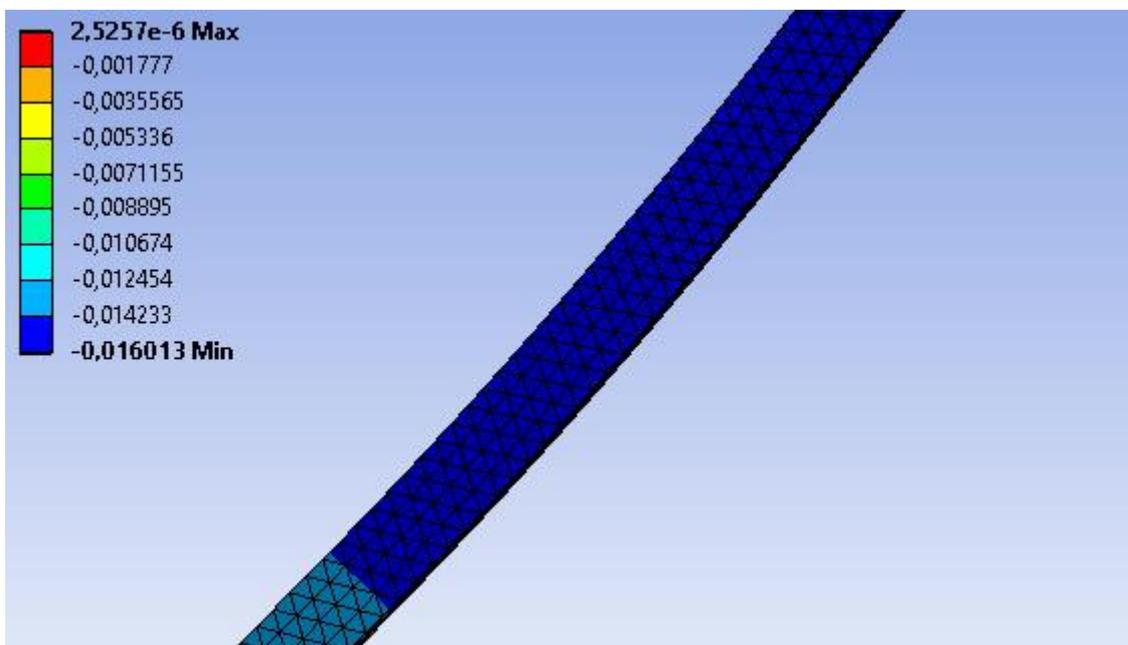


Figura 12.25: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 5,5m.

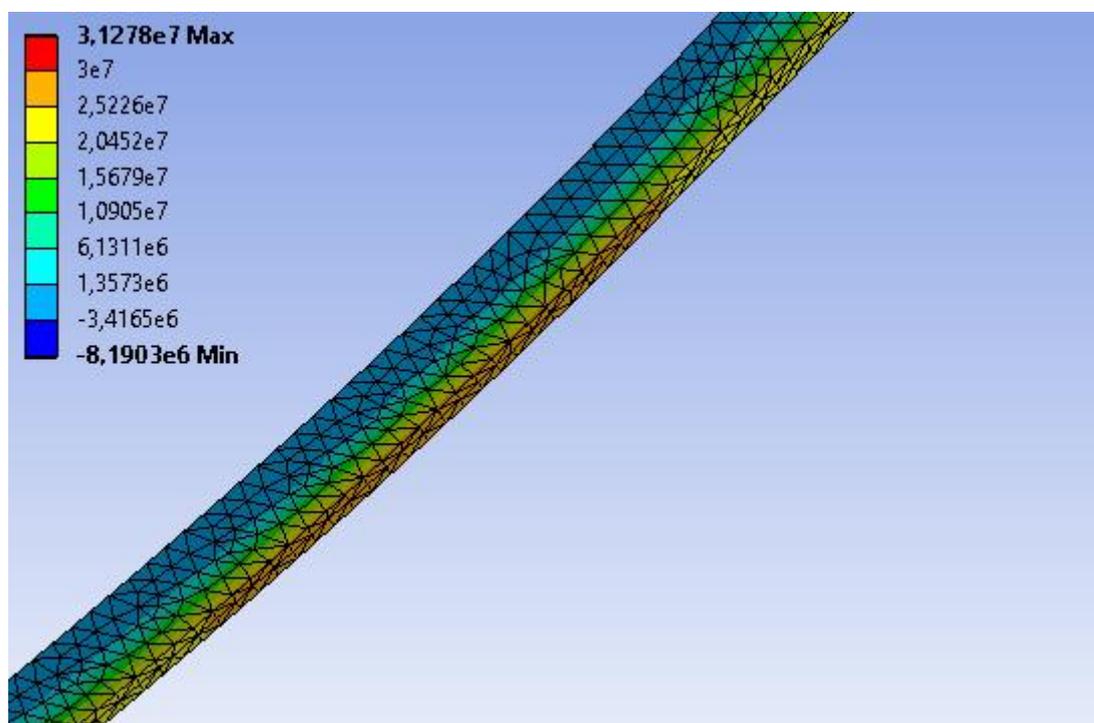


Figura 12.26: Distribución de tensiones en la segunda situación de carga con una luz de 4,6m.

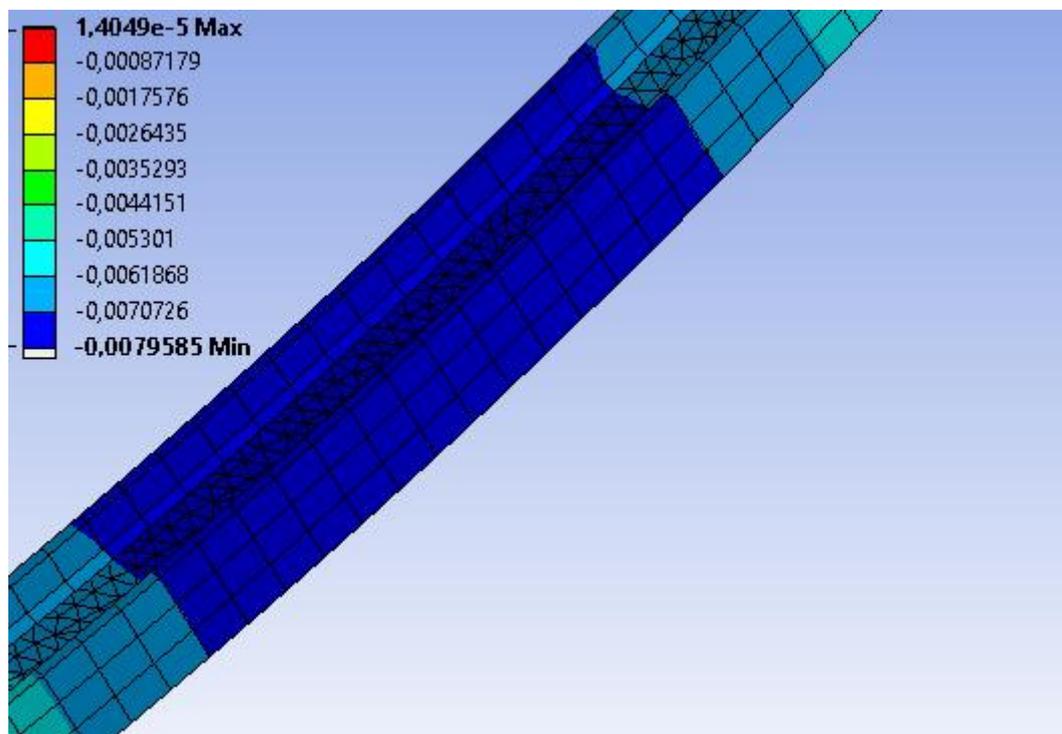


Figura 12.27: Deformación máxima en la segunda situación de carga con una luz de 4,6m.

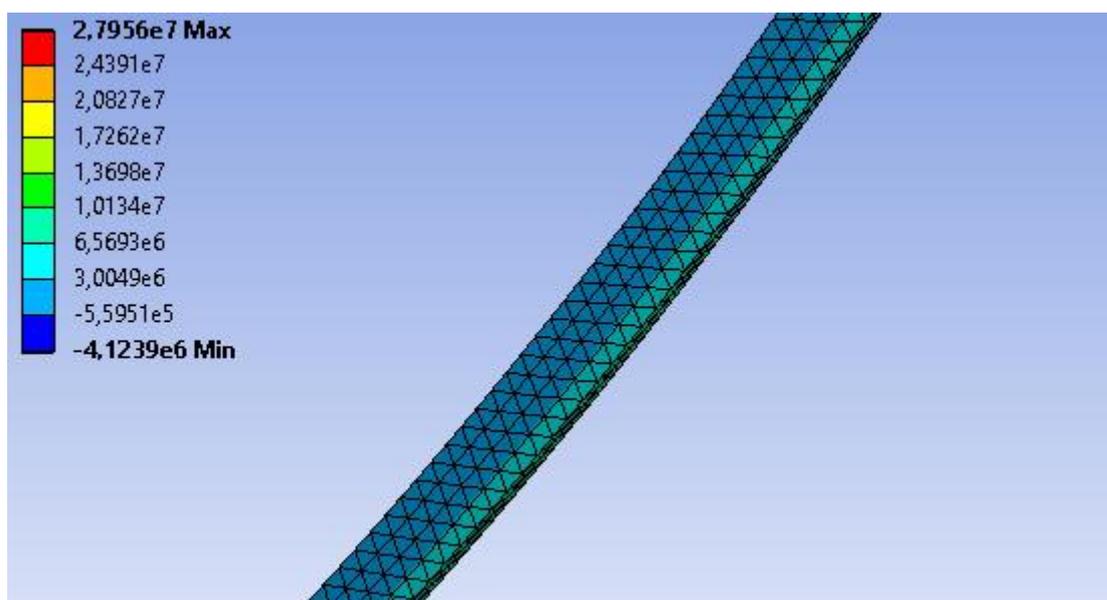


Figura 12.28: Distribución de tensiones en la primera situación de carga con una luz de 5m.

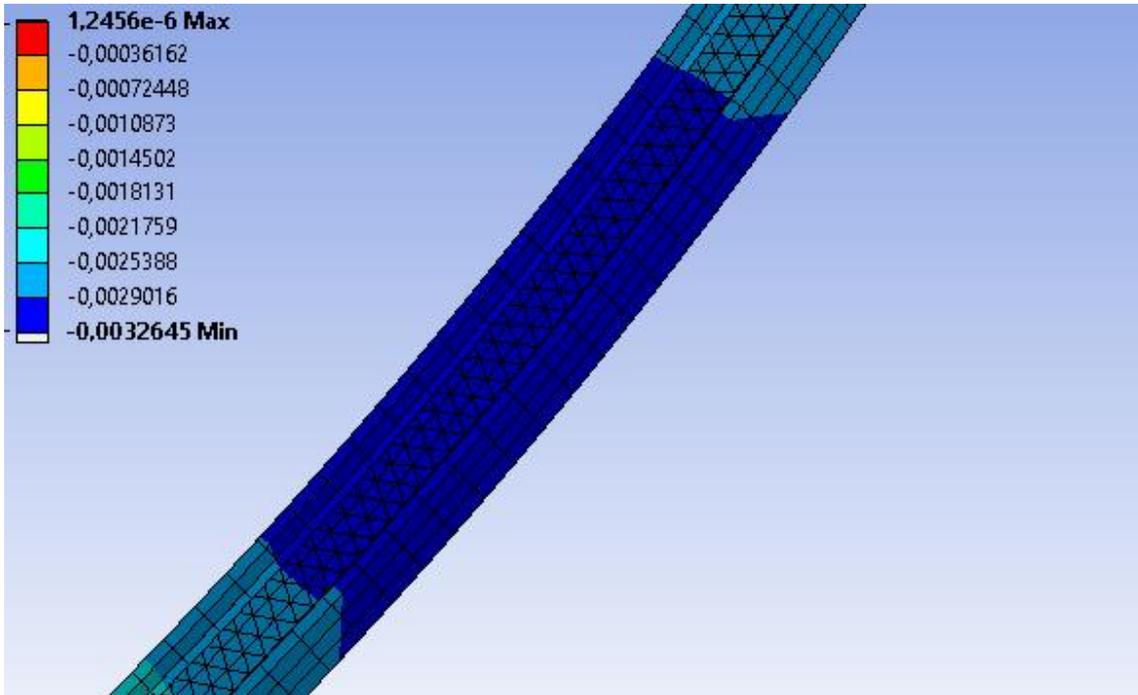


Figura 12.29: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 5m.

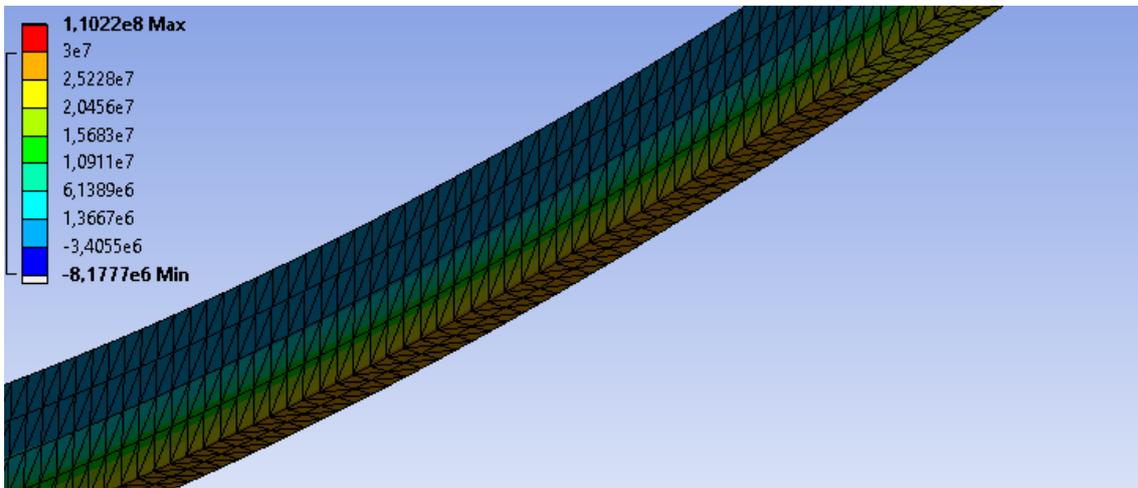


Figura 12.30: Distribución de tensiones en la primera situación de carga con una luz de 10m.

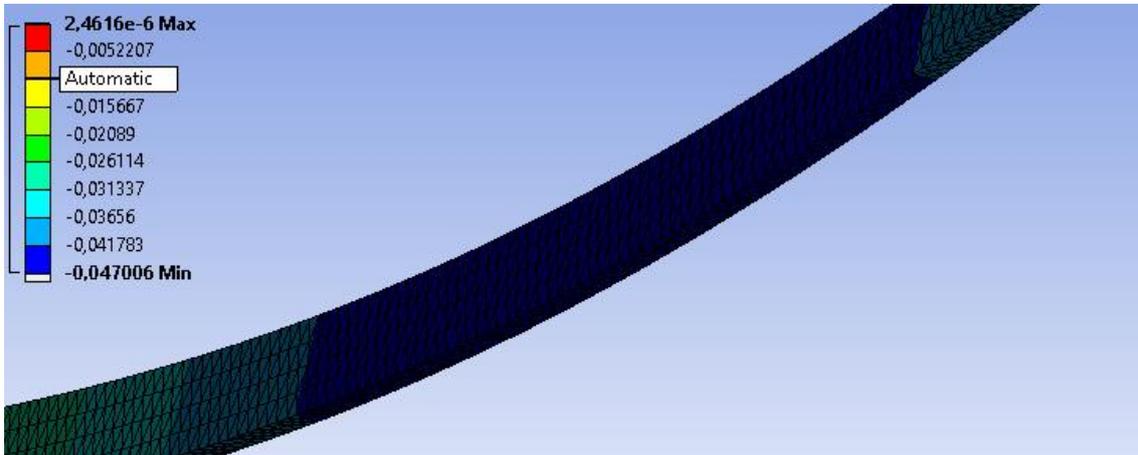


Figura 12.31: Deformación máxima en la primera situación de carga con una luz de 10m.