



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y de Fabricación

Área de Conocimiento: Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

TRABAJO FIN DE GRADO

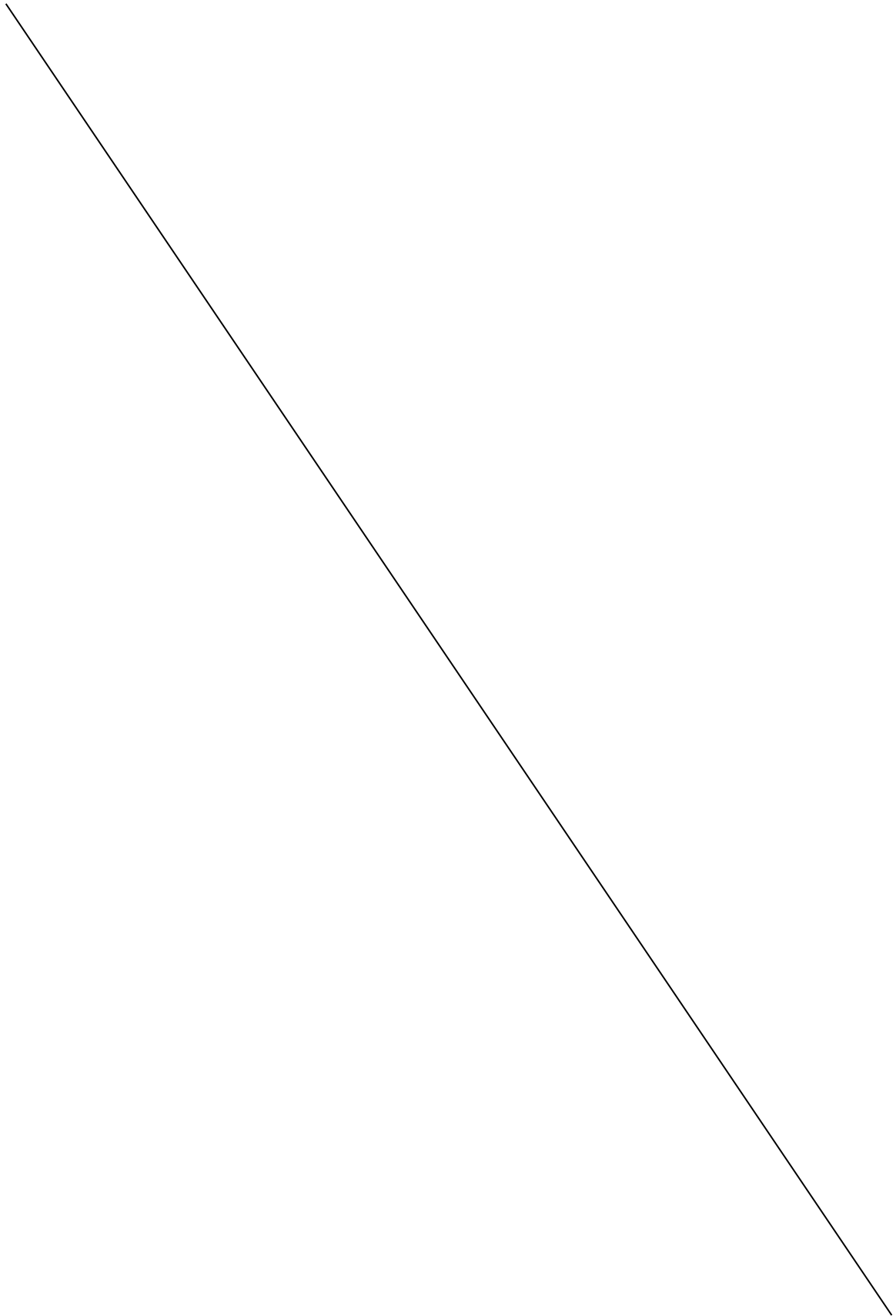
Diseño y comportamiento mecánico de nodos articulados para estructuras tensegríticas

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Francisco José García Moreno

Tutor: Manuel Alejandro Fernández Ruiz

MÁLAGA, Enero de 2026





Resumen y palabras clave

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como finalidad el diseño y análisis del comportamiento mecánico de nodos articulados de estructuras tensegríticas. Una vez realizados el diseño y la fabricación de los nodos, se realizaron varios ensayos de laboratorio con el propósito de estudiar su resistencia, su rigidez y los posibles modos de fallo.

El estudio se centra en el diseño, análisis y ensayo de dos nodos utilizados para unir los componentes (cables y barras) de una estructura tensegrítica. En una primera fase, se realizó una simulación numérica mediante SolidWorks, con el fin de prever si el diseño inicialmente propuesto cumplía con los requisitos estructurales establecidos y garantizaban un comportamiento seguro antes de su fabricación. Posteriormente, los nodos se sometieron a ensayos de laboratorio, con el propósito de analizar su respuesta real bajo carga y determinar cuál de los diseños ofrece una mejor rigidez y resistencia.

Como complemento al estudio experimental, se desarrolló además el diseño de un nodo adicional para la conexión de dos barras, planteado a partir de una propuesta del tutor. Este nodo, modelado en SolidWorks, se presenta como una solución alternativa de carácter exploratorio, orientada a ampliar el abanico de configuraciones analizadas y a servir de base para futuros estudios.

Este trabajo ha servido no solo para obtener conclusiones técnicas sobre el diseño de los nodos, sino también para reforzar el aprendizaje práctico en ingeniería, combinando el trabajo manual en taller con el uso de herramientas de análisis numérico avanzadas.

Palabras clave

Nodos articulados; estructura tensegrítica; ensayo experimental; resistencia mecánica; simulación numérica.



Abstract

This TFG focuses on the design and analysis of the mechanical behaviour of pinned joints used in tensegrity structures. After completing the design and manufacturing of several node prototypes, a series of tests were carried out to study their strength, stiffness, and possible failure modes.

The research focuses on the design, analysis, and experimental testing of two nodes used to connect the components (cables and struts) of the tensegrity structure. In the first stage, a numerical simulation was performed using SolidWorks to predict whether the proposed initial design met the established structural requirements and ensured safe performance before manufacturing. Subsequently, the nodes were subjected to mechanical tests to analyze their real response under load and determine which design provided greater stiffness and strength.

As a complement to the experimental study, the design of an additional node for the connection of two bars was also developed, based on a proposal from the supervisor. This node, modeled in SolidWorks, is presented as an alternative exploratory solution aimed at broadening the range of configurations analyzed and providing a basis for future studies.

This work has not only provided technical conclusions regarding the design of the nodes but has also contributed to practical engineering training, combining hands-on work in the laboratory with the use of advanced numerical analysis tools.

Keywords

Articulated nodes; tensegrity structure; experimental testing; mechanical strength; numerical simulation.

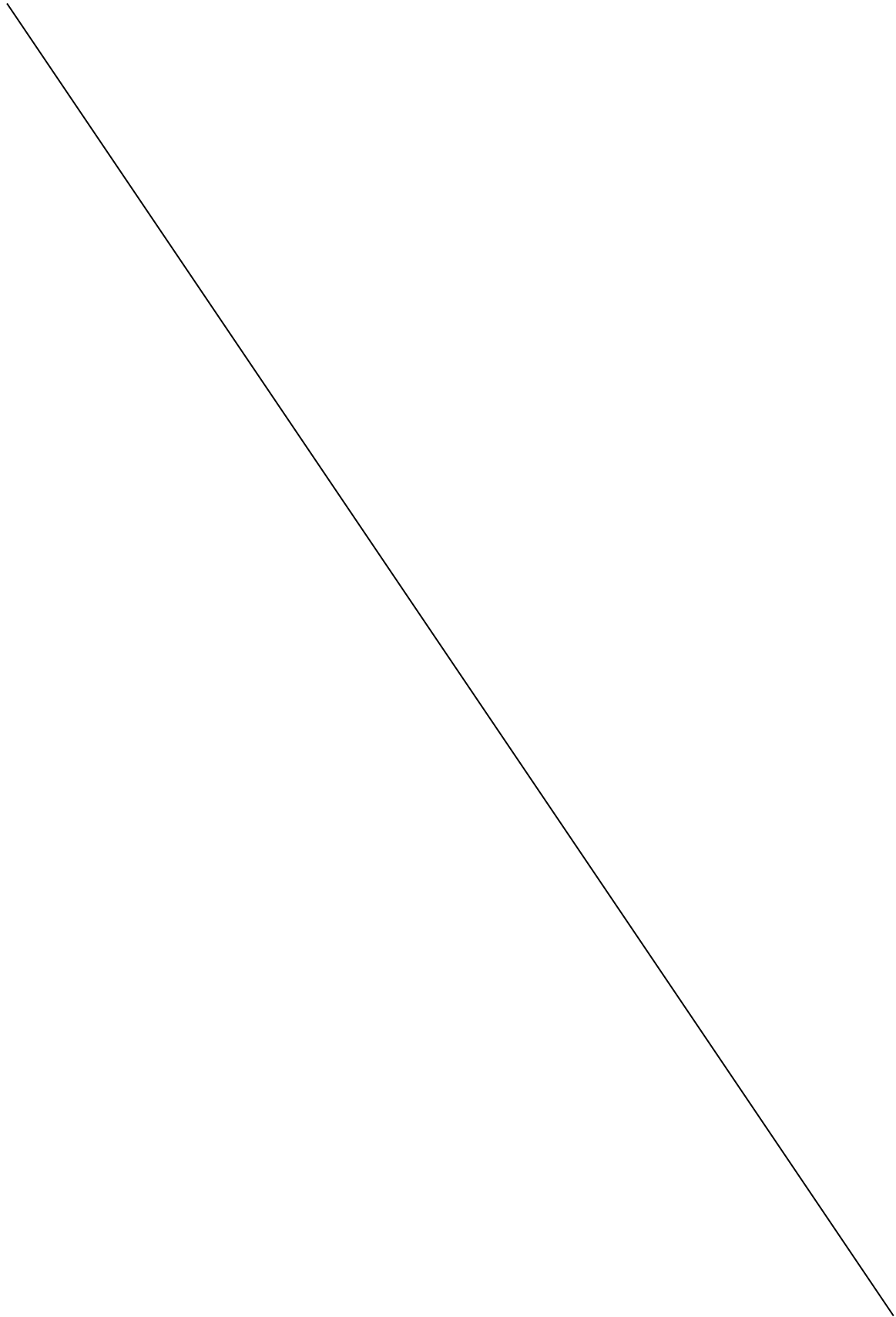


Índice

Resumen y palabras clave	4
Resumen	4
Palabras clave	4
1. Introducción	9
1.1 Contexto general y motivación del estudio	9
1.2 Objetivos generales y específicos	10
1.3 Alcance y limitaciones del trabajo	10
2. Estado del arte	11
2.1 Tensegridad	11
2.1.1 Introducción al concepto de tensegridad	11
2.1.2 Origen y evolución del contexto	14
2.1.3 Principios estructurales	18
2.1.4 Tipologías.....	21
2.1.5 Aplicaciones y ventajas en la ingeniería.....	24
2.1.6 Relevancia para el presente trabajo	26
2.2 Nodos	27
2.2.1 Función del nodo	27
2.2.2 Ejemplos de nodos reales recogidos en la literatura	28
2.2.3 Principios prácticos	30
2.2.4 Relevancia del estudio experimental del nodo	30
3. Familia octaedro	31
3.1 Introducción	31
3.2 Variantes y extensiones de la familia octaedro	32
3.3 Cálculo de fuerzas y autoequilibrio en el octaedro	33
3.3.1 Formulación vectorial del equilibrio nodal.....	33
3.3.2 Formulación matricial global del equilibrio	34
3.3.4 Estados de pretensado y compatibilidad geométrica	35
3.4 Octaedro expandido	36
3.5 Consideraciones constructivas y comportamiento real en prototipos tensegríticos	37
3.6 Importancia octaedro expandido	38
4. Diseño de nodos	40
4.1 Criterios de diseño	40
4.1.1 El nodo no debe ser el punto débil del sistema	40
4.1.2 Función real del nodo.....	41
4.1.3 Uso de componentes disponibles (“off-the-shelf”)	41
4.1.4 Consideración previa del tipo de barra y cable.....	41



4.2	Nodo cáncamo	42
4.3	Nodo pletinas	46
4.4	Nodo adicional de conexión de dos barras: propuesta de diseño	50
4.4.1	Replanteamiento conceptual del nodo	51
4.4.2	Propuesta de nodo mediante pletinas y pasadores	51
4.4.3	Funcionamiento mecánico esperado	52
4.4.4	Ventajas y alcance de la solución propuesta	53
5.	Modelado y simulación en SolidWorks	54
5.1	Nodo cáncamo	55
5.1.1	Modelado en SolidWorks.....	55
5.1.2	Simulación numérica (SolidWorks Simulation)	56
5.2	Nodo pletinas	61
5.2.1	Modelado geométrico en SolidWorks	61
5.2.2	Simulación numérica (SolidWorks Simulation)	62
6.	Ensayos experimentales	67
6.1	Ensayos para el nodo cáncamo	67
6.1.1	Descripción.....	67
6.1.2	Ensayo par de apriete.....	68
6.1.3	Ensayo extracción cáncamo.....	70
6.2	Ensayos experimentales del nodo de pletinas	74
6.2.1	Ensayo de tracción de una pletina	74
6.2.2	Ensayo de conservación del ángulo de la pletina	78
6.2.3	Valoración global de los ensayos del nodo de pletinas	81
7.	Análisis de datos	82
7.1	Relación entre criterios de diseño y resultados obtenidos	82
7.2	Comparación entre simulación numérica y comportamiento experimental (nodo cáncamo)	82
7.3	Análisis de los resultados del nodo de pletinas	83
7.4	Comparación cualitativa entre los nodos analizados	84
7.5	Limitaciones del análisis y alcance de los resultados	84
8.	Conclusiones	85
9.	Bibliografía	87
ANEXOS	89
ANEXO A	91
ANEXO B	97



1. Introducción

1.1 Contexto general y motivación del estudio

En los últimos años, la búsqueda de soluciones estructurales más ligeras, sostenibles y eficientes ha llevado a que el estudio de las estructuras tensegríticas cobre un interés creciente en distintos ámbitos de la ingeniería. Este tipo de estructuras, basadas en el equilibrio entre elementos en tracción y compresión, permiten crear sistemas autoestables con un consumo reducido de material, lo que las convierte en una alternativa prometedora frente a los modelos estructurales tradicionales.

La tensegridad combina conceptos de resistencia de materiales, geometría espacial y diseño modular. Gracias a su comportamiento estructural, estas configuraciones se utilizan cada vez más en el diseño de cubiertas, pasarelas, elementos arquitectónicos ligeros e incluso en aplicaciones de la robótica y la biomecánica. Sin embargo, su implementación práctica presenta todavía varios retos, siendo uno de los más importantes el diseño de los nodos articulados, piezas fundamentales en las que confluyen las barras comprimidas y los cables traccionados. Estos nodos condicionan la estabilidad, la rigidez y la capacidad de transmisión de esfuerzos del conjunto.

Este Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro del proyecto de investigación TENSOLUTION (“Uso de estructuras tensegríticas como solución para una adaptación al cambio climático efectiva en zonas urbanas”), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033/) y FEDER/UE a través de la convocatoria 2023 de Proyectos de Generación de Conocimiento, en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, correspondiente al Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021–2023 (referencias PID2023-150724OB-C21 y PID2023-150724OA-C22).

El proyecto TENSOLUTION tiene como objetivo principal el desarrollo y validación de estructuras tensegríticas aplicadas a entornos urbanos como una solución eficiente y sostenible frente a los efectos del cambio climático. Dentro de este marco, el presente trabajo se centra en el diseño, modelado y ensayo de nodos articulados, con el fin de estudiar su comportamiento mecánico y establecer qué configuraciones presentan un mejor rendimiento estructural.



1.2 Objetivos generales y específicos

El propósito general de este Trabajo Fin de Grado es el diseño y análisis del comportamiento mecánico de diferentes nodos articulados empleados en estructuras tensegríticas.

De este objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar varios modelos de nodos articulados con diferentes configuraciones geométricas y sistemas de conexión.
2. Simular el comportamiento estructural de los nodos mediante el software SolidWorks y el método de los elementos finitos (FEA, Finite Element Analysis), para comprobar que los diseños propuestos cumplen los requisitos estructurales antes de su fabricación.
3. Fabricar y ensayar experimentalmente los nodos, para evaluar su resistencia, rigidez y modos de fallo.
4. Comparar los resultados experimentales entre los distintos modelos de nodo para determinar cuál presenta un comportamiento más estable y resistente.
5. Extraer conclusiones que contribuyan al desarrollo de estructuras tensegríticas más seguras, ligeras y fáciles de montar.

1.3 Alcance y limitaciones del trabajo

Este estudio se centra en el diseño y análisis del comportamiento mecánico de nodos articulados de una estructura tensegrítica a desarrollar en el laboratorio de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga. El trabajo abarca las fases de diseño, modelado numérico, fabricación y ensayo experimental de los nodos.

No se aborda el comportamiento dinámico de la estructura completa, ni se estudian efectos como la fatiga, la temperatura o la respuesta a cargas cíclicas, que podrían ser objeto de trabajos posteriores. Tampoco se realiza una validación exhaustiva del modelo numérico, ya que las simulaciones se emplean únicamente como herramienta de apoyo previo al ensayo, con el objetivo de orientar el diseño de los nodos.

Los resultados obtenidos deben interpretarse dentro de este marco, entendiendo que el trabajo pretende aportar una visión práctica y comparativa sobre el funcionamiento de distintos tipos de nodo, más que una caracterización teórica completa de la estructura tensegrítica.

2. Estado del arte

2.1 Tensegridad

2.1.1 Introducción al concepto de tensegridad

La palabra *tensegridad* —una mezcla de *tensión* e *integridad* que Buckminster Fuller popularizó en los años sesenta— describe un principio estructural que, aunque pueda parecer moderno, encierra una idea sorprendentemente simple: crear formas estables manteniendo separados los elementos comprimidos gracias a una red continua de elementos en tensión. Dicho de otra forma, la estructura “se sostiene a sí misma” gracias a un delicado equilibrio interno entre fuerzas opuestas (ver Figura 1).

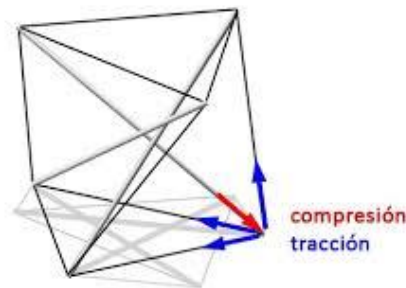


Figura 1. Estructura tensegrítica básica. Extraído de [1]

Lo primero que suele llamar la atención cuando uno se acerca a este tipo de sistemas es su aparente fragilidad. A simple vista, parecen figuras flotantes, un conjunto de barras suspendidas en el aire por hilos que, en teoría, deberían venirse abajo en cualquier momento. Sin embargo, ocurre justo lo contrario: cuando la distribución de tensiones es uniforme, el conjunto se vuelve rígido, sorprendentemente estable y muy resistente. Esta paradoja visual, algo que parece inestable sea, en realidad, estructuralmente robusto, es uno de los motivos por los que la tensegridad ha fascinado tanto a ingenieros, arquitectos, artistas y matemáticos.

Aunque cada estructura tensegrítica es distinta, todas ellas comparten una característica común que las distingue de cualquier otro sistema estructural: las barras nunca se tocan entre sí. Permanecen completamente aisladas, conectadas únicamente por cables o tendones. Esa separación física no es un capricho; es el corazón del sistema. Al estar desacopladas, pueden orientarse de formas muy diversas sin transmitir compresiones indeseadas entre sí, lo que permite diseñar configuraciones ligeras, eficientes y con una libertad geométrica sorprendente.

Este concepto purista de estructura tensegrítica ha ido evolucionando en el tiempo. Debido a requerimientos de rigidez, se pueden encontrar en la literatura científica tensegridades en las cuales varias barras se encuentran conectadas en un nodo.



Figura 2. Needle Tower (Kenneth Snelson). Extraído de [2]

Es habitual que el primer contacto con una estructura tensegrítica provenga del ámbito artístico, especialmente a través de las esculturas de Kenneth Snelson. Sus obras, conocidas por sus formas esbeltas y aparentemente imposibles, ofrecieron por primera vez una representación física clara del concepto (ver Figura 2). Sin embargo, aunque el origen contemporáneo del término esté ligado al arte, su potencial técnico ha ido mucho más allá, hasta llegar a campos tan diversos como la ingeniería civil, la biomecánica, la robótica o el diseño de mecanismos desplegados.

Una de las cosas más interesantes de estos sistemas es que no necesitan un punto de apoyo externo para mantenerse estables. No dependen de la gravedad ni del contacto con una base para “montarse”: la estructura es estable por su propio equilibrio interno. Esta diferencia conceptual frente a las estructuras convencionales se ilustra de forma clara en la Figura 3. Esto permite imaginar soluciones para situaciones donde los medios tradicionales son complicados o poco eficientes: estructuras espaciales, sistemas desplegados, o incluso plataformas flotantes donde se busca minimizar el peso.

A pesar de esta riqueza conceptual, el término tensegridad también ha sido fuente de cierta confusión. A lo largo de los años, distintos autores han propuesto definiciones ligeramente distintas, algunas más restrictivas y otras más flexibles. En líneas generales, la mayoría coincide en que para que un sistema pueda considerarse tensegrítico debe cumplir, como mínimo, dos condiciones:

1. Los elementos comprimidos no se tocan.
2. La mayor parte de las cargas se transmiten por elementos traccionados.

A partir de ahí, existe un amplio espectro de interpretaciones, desde las más puristas hasta las más abiertas, que permiten estructuras híbridas o semitensegríticas.



Figura 3. Estructura convencional vs. estructura tensegrítica. Extraído de [1]

En el contexto de este Trabajo Fin de Grado, el interés principal se centra en comprender el comportamiento mecánico del nodo dentro de una estructura tensegrítica real, teniendo siempre en cuenta el criterio de diseño adoptado. En este caso, el criterio de diseño principal establece que el modo de fallo deseado de la estructura sea el agotamiento del cable en tracción, y no el fallo del nodo ni el pandeo de la barra.

Por este motivo, las barras se han dimensionado de forma que su capacidad resistente sea superior a la de los cables, evitando así que el fallo pueda producirse por pandeo o deformaciones excesivas de los elementos comprimidos. De este modo, el cable pasa a ser el elemento crítico del sistema, tal y como se busca en una estructura tensegrítica correctamente diseñada.

Bajo este planteamiento, el papel del nodo resulta especialmente relevante, ya que debe ser capaz de transmitir las tracciones de los cables hacia la barra sin introducir modos de fallo adicionales, garantizando que el comportamiento global de la estructura esté gobernado por el agotamiento del cable. Esta idea es fundamental para interpretar posteriormente los ensayos realizados, analizar los posibles modos de fallo y justificar las decisiones adoptadas en el diseño y validación de los nodos.

2.1.2 Origen y evolución del contexto

Hablar de tensegridad hoy puede parecer algo relativamente reciente, un concepto asociado a estructuras ligeras, robótica o escultura contemporánea. Sin embargo, su historia es un hilo que conecta arte, ingeniería, matemáticas, experimentación intuitiva y, sobre todo, una manera diferente de entender cómo se sostiene el mundo físico.

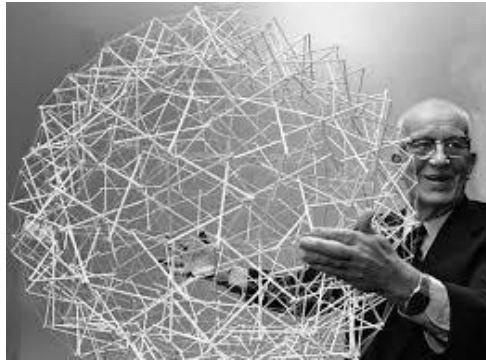


Figura 4. Buckminster Fuller. Extraído de [3]

Aunque solemos atribuir el término *tensegrity* a Buckminster Fuller (ver Figura 4), su papel fue más el de un “gran divulgador” que el de su inventor absoluto. Fuller tenía ese talento poco frecuente para detectar ideas ingeniosas y convertirlas en conceptos poderosos, dotándolos de un nombre atractivo y un marco teórico convincente. Pero incluso él reconocía que el hallazgo inicial surgió en buena parte de conversaciones, experimentos y trabajos compartidos con el escultor Kenneth Snelson.

2.1.2.1 Primeros indicios y experimentaciones previas

Antes de que existiera el término, ya se intuían algunos de los principios que más tarde darían lugar a la tensegridad. A comienzos del siglo XX, distintos artistas y arquitectos comenzaron a experimentar con formas que parecían “flotar”, utilizando hilos o elementos tensados para sostener componentes rígidos. Algunos ejemplos pueden encontrarse en maquetas del constructivismo ruso o en los primeros trabajos de Frei Otto, donde ya se exploraba la posibilidad de mantener elementos estructurales separados mediante sistemas de tracción continua (ver Figura 5), aunque sin una formulación teórica definida ni una intención estructural clara. Estas aproximaciones pueden considerarse antecedentes conceptuales de la tensegridad, aun cuando no existiera todavía una definición formal del término.



Figura 5. Estructura de Frei Otto. Extraído de [4]

La llegada de la tensegridad tal como la conocemos hoy fue posible gracias a un contexto artístico muy activo, donde la geometría, la ligereza y los juegos con la percepción estaban en pleno auge.

2.1.2.2 La aportación de Kenneth Snelson: el descubrimiento práctico

Probablemente, el verdadero "clic" conceptual lo hizo Kenneth Snelson, cuando en 1948 construyó su famosa escultura "X-Piece" (ver Figura 6), considerada por muchos como la primera obra tensegrítica reconocible. Snelson no buscaba resolver un problema estructural: quería explorar el espacio de una manera inesperada, jugando con barras que parecían sostenerse en el aire sin tocarse entre sí.



Figura 6. X-piece (1948, Snelson). Extraído de [5]

Lo más fascinante es que Snelson no trabajaba desde ecuaciones, sino desde intuición. Descubrió que si tensaba adecuadamente los cables, las barras se "alineaban" hasta encontrar una posición estable. Muchos años después, en entrevistas, confesaba que ni él mismo esperaba semejante resultado, y que comprender ese equilibrio fue lo que cambió su trayectoria artística.

Sus obras marcaron un antes y un después. No solo por su impacto visual, sino porque demostraban físicamente que un conjunto de elementos en tensión era capaz de estabilizar componentes comprimidos que no se tocaban. Era la primera vez que esta idea adquiría forma real y funcional.

2.1.2.3 Fuller entra en juego: el nacimiento del término “tensegrity”

Buckminster Fuller conoció el trabajo de Snelson y, fascinado por su potencial estructural, decidió bautizarlo y formalizarlo. Tal y como se recoge en la Figura 7, correspondiente a una de las patentes desarrolladas por Fuller, a partir de los años cincuenta comenzó a hablar de *tensional integrity*, concepto que pronto simplificó a *tensegrity*. Para Fuller, la tensegridad era mucho más que una curiosidad estética: era un modelo de eficiencia estructural para el futuro.

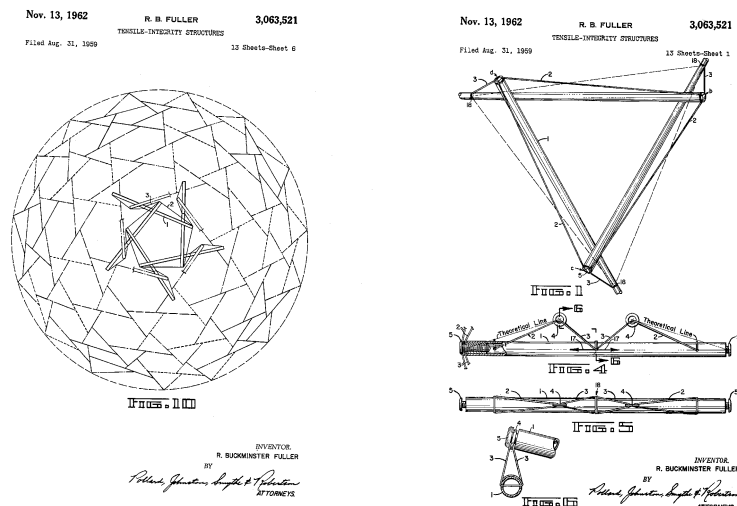


Figura 7. Patente Tensegridad Fuller. Extraído de [6]

Fuller aplicó el principio a distintas geometrías y lo integró en su visión global de la arquitectura ligera. Buscaba sistemas que aprovecharan materiales mínimos para resistencias máximas, algo que encajaba perfectamente con sus ideales ecológicos y tecnológicos.

La relación entre Fuller y Snelson fue compleja y, en ocasiones, polémica. Snelson reclamaba ser el descubridor práctico; Fuller defendía haber desarrollado la teoría. Lo cierto es que la tensegridad moderna existe gracias a la interacción entre ambos, aunque cada uno enfocó el concepto desde perspectivas distintas.

2.1.2.4 Formalización científica: Anthony Pugh y el salto a la ingeniería

El siguiente paso lo dio Anthony Pugh, que en 1976 publicó uno de los primeros estudios rigurosos sobre el tema. Pugh no se limitó a contemplar la tensegridad como fenómeno artístico: la clasificó, la sistematizó y la organizó geoméricamente. Gracias a él, hoy podemos hablar de configuraciones como:

- Simplex
- Prismas-T
- Sistemas esféricos, cilíndricos y en estrella
- Modelos zigzag o “Tipo Z”
- Estructuras de circuito

Su clasificación permitió que ingenieros y matemáticos pudieran estudiar estas formas desde un punto de vista estructural, no solo estético. A partir de ahí, el campo dejó de ser una rareza y comenzó a ser un área de investigación seria.

2.1.2.5 La consolidación internacional: Motro, Skelton, Hanaor y la era moderna

Desde los años ochenta hasta hoy, la tensegridad ha vivido una expansión académica sin precedentes. Investigadores como René Motro (Francia), Robert Skelton (Estados Unidos), Ariel Hanaor (Australia) o Tibert y Pellegrino han llevado la teoría a un nivel completamente distinto.

Cada uno aportó algo distinto:

- **Motro** definió formalmente lo que debe considerarse tensegridad “pura”.
- **Skelton** introdujo los modelos dinámicos y su uso en robótica y aeroespacial.
- **Hanaor** desarrolló sistemas multicapa y mallas complejas.
- **Pellegrino y Tibert** se centraron en mecanismos despleables basados en tensegridad.

A partir de los años 2000, la tensegridad dejó de ser un tema marginal y pasó a estar presente en congresos de estructuras ligeras, matemáticas aplicadas y robótica. El auge de los modelos numéricos (como FEM) y la fabricación digital dieron un empujón definitivo para explorar configuraciones más complejas.

2.1.2.6 Tensegridad en el siglo XXI: del arte a la ingeniería avanzada

Hoy en día, cuando hablamos de tensegridad, ya no pensamos únicamente en esculturas como las de Snelson. El concepto se ha extendido a campos tan variados como:

- Arquitectura ligera y estructuras temporales
- Biomecánica (teoría del “biotensegrity”)
- Robots blandos y mecanismos despleables de la NASA (ver Figura 8)
- Estructuras adaptativas capaces de absorber cargas dinámicas
- Diseño industrial, mobiliario y sistemas tensados

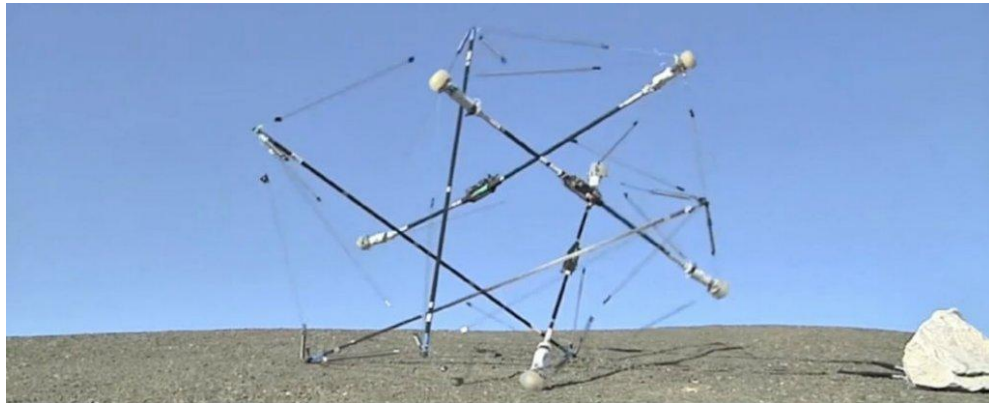


Figura 8. Robot tensegrítico "Superball" de la NASA. Extraído de [7]

Las posibilidades futuras son especialmente prometedoras: materiales inteligentes, cables activos, estructuras que se autorregulan... Todo ello demuestra que, lejos de ser una curiosidad artística, la tensegridad es un campo vivo, en plena expansión, con ideas que encajan perfectamente con los retos actuales de sostenibilidad, ligereza y reutilización de recursos.

2.1.3 Principios estructurales

Aunque la tensegridad puede parecer complicada a primera vista, su funcionamiento se basa en unos pocos principios que, una vez entendidos, permiten interpretar prácticamente cualquier configuración. En realidad, la esencia es la ya mencionada anteriormente: una estructura tensegrítica funciona gracias a un equilibrio interno de fuerzas que no depende del contacto entre las barras, sino de cómo los cables distribuyen la tracción alrededor del conjunto.

Este capítulo describe esos principios fundamentales, no como una lista cerrada, sino como una serie de ideas que se entrelazan y que, al final, explican por qué estas estructuras son tan ligeras, tan eficientes y, al mismo tiempo, tan difíciles de analizar con herramientas tradicionales.

2.1.3.1. Separación total entre los elementos comprimidos

Uno de los rasgos más característicos de la tensegridad es que las barras nunca llegan a tocarse entre sí. Si las barras se tocaran, la estructura dejaría de ser tensegrítica y pasaría a comportarse como una estructura convencional, transmitiendo compresiones mediante contacto directo. La "magia" de la tensegridad reside precisamente en que las barras quedan completamente aisladas dentro de una red tensada, como si flotaran en el espacio.

¿Por qué es tan importante esta separación? Porque elimina las vías directas de transmisión de fuerzas entre barras, obligando a que todo el sistema dependa de los cables. Eso crea un equilibrio muy sensible, pero también muy eficiente: las barras dejan de sufrir momentos y solo trabajan a compresión pura, su modo más favorable.

2.1.3.2 Red continua de cables en tracción

Si las barras son el “esqueleto”, los cables son el “sistema nervioso”. En una tensegridad, la tracción no es un efecto pasivo, sino la fuerza que realmente construye la forma. Tal y como se representa en la Figura 9, los cables tensados actúan como un andamiaje invisible que define la posición de las barras y condiciona la rigidez global.

A diferencia de una estructura tradicional, donde las cargas se transmiten siguiendo caminos bien definidos (vigas → pilares → cimentación), en una tensegridad los cables redistribuyen la tracción de forma global. Un pequeño cambio en la longitud o tensión de uno de ellos puede modificar la geometría completa.

Por eso, una estructura tensegrítica sin tensado inicial no funciona: estaría “suave”, blanda, casi como una marioneta sin hilos.

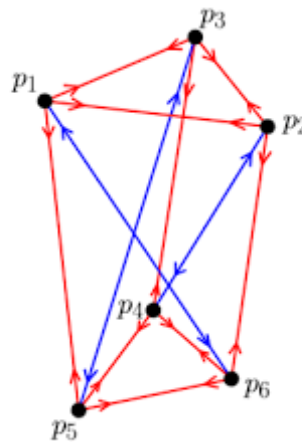


Figura 9. Diagrama de fuerzas en tensegridad. Extraído de [8]

2.1.3.3 Pretensión inicial: la activación del sistema

Uno de los aspectos más interesantes de la tensegridad es que necesita un estado de tensado previo para funcionar correctamente. Este proceso, conocido como pretensión o autoesfuerzo inicial, consiste en ajustar la tensión de los cables antes de aplicar cualquier carga externa.

Es como afinar una guitarra: si las cuerdas están demasiado sueltas, la estructura vibra sin control; si están demasiado tensas, la estructura puede deformarse de manera no deseada. Encontrar ese punto óptimo es un arte y una ciencia.

Lo importante es que, una vez alcanzada esa pretensión adecuada, la estructura adquiere una rigidez sorprendente para la cantidad de material que utiliza. Esto explica por qué muchas tensegridades parecen frágiles pero funcionan como pequeños muelles tridimensionales: la rigidez no viene del material, sino del estado de tensiones internas.

2.1.3.4 Equilibrio de fuerzas y estabilidad interna

A diferencia de las estructuras convencionales, donde la estabilidad depende de los apoyos, en una tensegridad la estabilidad es interna. No es necesario estar anclado al suelo ni tener una base rígida; el sistema se sostiene únicamente por su equilibrio tensional.

Este punto puede parecer abstracto, pero se entiende muy bien si se observa un simplex o un prisma tensegrítico sencillo. Cuando los cables están correctamente equilibrados, la estructura queda rígida. Si se corta un cable, el equilibrio se rompe y la forma colapsa.

Lo que resulta especialmente interesante es que ese equilibrio no es estático, sino dinámico: ante pequeñas perturbaciones, la estructura puede deformarse ligeramente y volver a su posición inicial sin sufrir daños. Esto les da un comportamiento semielástico muy característico.

2.1.3.5 Ligereza y eficiencia material

La tensegridad pertenece a una familia de sistemas estructurales donde la ligereza no es una consecuencia, sino una intención. Su filosofía se basa en reducir al mínimo los elementos comprimidos (más pesados) y sustituirlos por elementos traccionados (más livianos), creando estructuras:

- más ligeras,
- más fáciles de montar,
- con menos consumo de materia prima,
- y con un comportamiento sorprendentemente resistente.

Un dato conocido en la literatura es que algunas tensegridades pueden alcanzar relaciones resistencia/peso muy superiores a las de sistemas mecánicos tradicionales. Esto las hace muy atractivas en ingeniería civil, aeroespacial y robótica ligera.

2.1.3.6 Desacoplamiento estructural y libertad geométrica

Otra característica esencial, aunque menos comentada, es la libertad geométrica que permite este tipo de sistemas. Al no depender de conexiones rígidas entre barras, una tensegridad puede adoptar geometrías que serían impracticables con sistemas tradicionales. Esta capacidad se aprecia claramente en la Figura 10, donde se muestra cómo la estructura es capaz de deformarse sin perder su integridad global.

Se puede girar, torcer, estirar o comprimir el modelo, y la estructura simplemente “acompaña” los cambios sin romperse. Esto explica por qué son tan útiles para estructuras desplegadas, flexibles, móviles o con necesidad de absorber impactos sin fallar.

Los robots tensegríticos, por ejemplo, funcionan basándose en esta propiedad: su estructura puede deformarse para adaptarse al terreno y volver a su posición natural sin requerir componentes rígidos que puedan fracturarse.

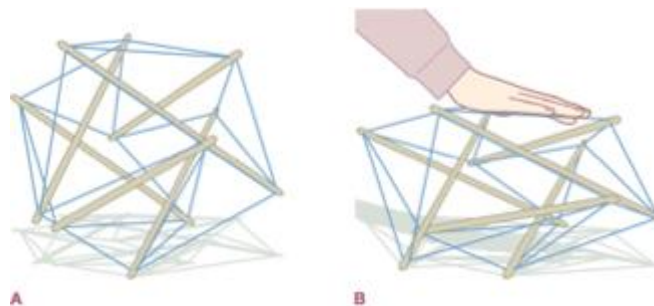


Figura 10. Estructura deformada. Extraído de [9]

2.1.4 Tipologías

La diversidad de formas que pueden adoptar las estructuras tensegríticas es enorme. Sin embargo, con el paso de los años han aparecido una serie de tipologías que se repiten con frecuencia y que ayudan a describir cómo se organiza la geometría interna del sistema. A diferencia de otras clasificaciones estructurales más rígidas, la tensegridad permite una libertad considerable, pero aun así existen familias que comparten patrones reconocibles. Comprenderlas no solo sirve para ordenar las distintas propuestas existentes, sino también para intuir cómo se comporta cada una a nivel mecánico.

2.1.4.1 El módulo Simplex: la unidad mínima

El punto de partida de prácticamente cualquier estructura tensegrítica es el Simplex (ver Figura 11), un pequeño conjunto formado por tres barras y nueve cables en el que, por primera vez, se puede ver con claridad la idea de compresión aislada y tracción continua. Es un módulo sorprendentemente estable para su tamaño, y por eso aparece constantemente tanto en modelos didácticos como en proyectos de ingeniería.

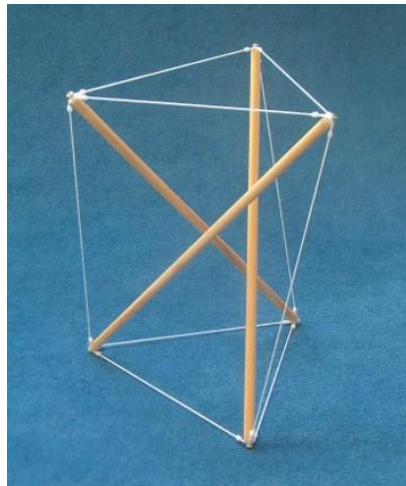


Figura 11. Módulo Simplex. extraído de [10]

El Simplex es fácil de reconocer: compacto, simétrico y con un comportamiento bastante intuitivo. A partir de él se generan casi todas las demás configuraciones.

2.1.4.2 Los prismas tensegríticos

Si el Simplex es la célula mínima, los prismas tensegríticos (ver Figura 12) son sus versiones “apiladas”. En estos sistemas, varios módulos se conectan entre sí formando una columna helicoidal o un cilindro tensado. Estos prismas son especialmente interesantes porque combinan buena capacidad resistente con ligereza, y permiten crear elementos alargados como mástiles o soportes verticales.

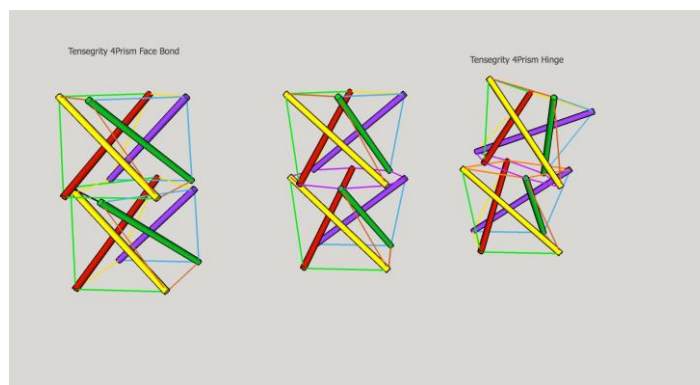


Figura 12. Prismas tensegríticos. Extraído de [11]

Al deformarse ligeramente, los prismas muestran desplazamientos muy suaves y recuperan su forma inicial con facilidad, lo que explica su interés en estructuras desplegadas.

2.1.4.3 Sistemas esféricos

Existen tensegridades que, vistas desde fuera y como se puede apreciar en la Figura 13, parecen aproximarse a una esfera. Esto ocurre cuando los módulos se organizan siguiendo patrones que distribuyen las barras de manera casi radial, generando volúmenes cerrados. Estas configuraciones —donde aparecen variantes como las rómbicas o las de circuito— se emplean a menudo en domos ligeros o estructuras que rodean un espacio interior.

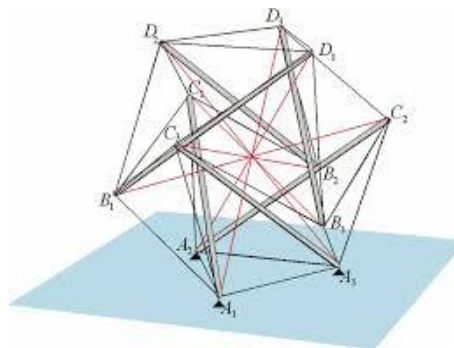


Figura 13. Configuración tensegrítica esférica. Extraído de [12]

Suelen ser muy eficientes porque equilibran tensiones en todas direcciones, lo que hace que la estructura no tenga puntos especialmente débiles.

2.1.4.4 Configuraciones en zigzag

Otro grupo característico son las configuraciones en zigzag, donde el patrón de cables sigue una trayectoria quebrada que da lugar a estructuras más estilizadas (ver Figura 14). Aunque comparten algunas propiedades con los sistemas rómbicos, su aspecto es más esbelto y su respuesta estructural tiende a ser algo más flexible. Este tipo de sistema aparece en muchos diseños experimentales y en prototipos cuando se busca maximizar la ligereza visual sin perder estabilidad.

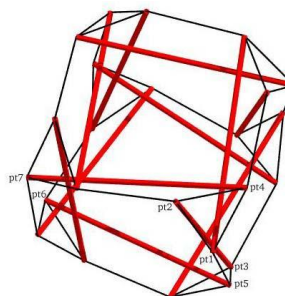


Figura 14. Tensegridad zig-zag. Extraído de [13]

2.1.5 Aplicaciones y ventajas en la ingeniería

Una vez entendido cómo funcionan las tensegridades y cuáles son sus principales tipologías, es fácil comprender por qué han despertado tanto interés en el ámbito de la ingeniería. Aunque durante muchos años se asociaron casi exclusivamente al arte y a experimentos conceptuales, hoy se consideran una alternativa real para el desarrollo de estructuras ligeras, mecanismos adaptativos y soluciones arquitectónicas no convencionales.

La clave de su atractivo es simple: consiguen resistencias apreciables utilizando muy poco material, algo especialmente valioso en un contexto donde la eficiencia y la sostenibilidad se han convertido en prioridades.

2.1.5.1 Arquitectura ligera y cubiertas

Quizá el campo donde más visibilidad han tenido las tensegridades es la arquitectura. Se han utilizado para crear marquesinas, cubiertas temporales, sombreados y estructuras efímeras que buscan maximizar la ligereza y minimizar el consumo de acero. Un ejemplo representativo de este tipo de aplicación puede observarse en la Figura 15, correspondiente a una cubierta tensegrítica de un pabellón.

Lo interesante de estas aplicaciones es que permiten generar formas tridimensionales muy libres, difíciles de conseguir con sistemas tradicionales sin aumentar excesivamente el peso o la complejidad de las uniones.



Figura 15. Cubierta tensegrítica de pabellón. Extraído de [5]

2.1.5.2 Estructuras desplegadas y mecanismos espaciales

Otra línea de aplicación, especialmente desarrollada por la NASA y centros de investigación aeroespacial, son las estructuras desplegadas. Los prismas tensados y las mallas tensegríticas pueden compactarse y luego expandirse en el espacio sin perder rigidez, lo que las hace idóneas para antenas, plataformas u otros sistemas que deben montarse una vez en órbita.

La combinación de ligereza y capacidad para absorber vibraciones ha hecho que sean consideradas como posibles sustitutas de mecanismos articulados tradicionales, que suelen ser más pesados y propensos a fallos.

2.1.5.3 Ingeniería civil

Aunque menos frecuentes, existen proyectos en los que se han utilizado tensegridades para pasarelas peatonales o puentes ligeros. En este tipo de aplicaciones, como la mostrada en la Figura 16, En estos casos, el objetivo suele ser demostrar cómo un diseño basado en tracción continua puede soportar cargas distribuidas sin requerir grandes secciones de acero.

Este tipo de aplicaciones aún es limitado, principalmente porque su análisis estructural no es tan directo como el de una viga tradicional. Aun así, hay varios ejemplos experimentales que muestran su viabilidad, especialmente en construcciones temporales o educativas.

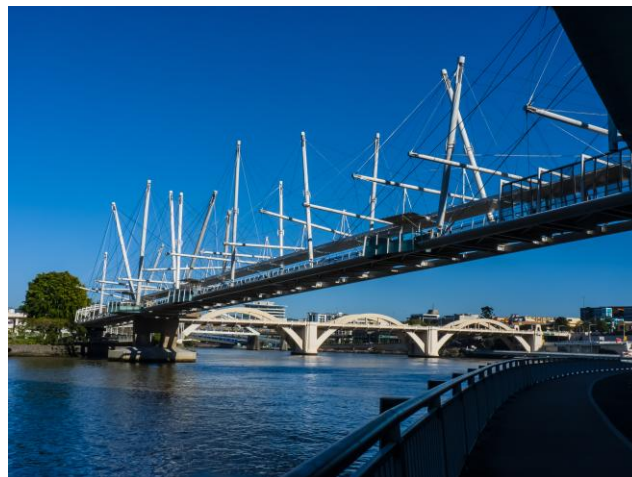


Figura 16. Kurilpa Bridge. Extraído de [5]

2.1.5.4 Ventajas técnicas relevantes

Lo que une todas estas aplicaciones es que la tensegridad ofrece características técnicas difíciles de lograr con otras soluciones estructurales:

- Ligereza extrema gracias al predominio de cables frente a barras.
- Rigidez ajustable, modificando simplemente la pretensión de los cables.
- Comportamiento semielástico, útil para absorber vibraciones o impactos.
- Modularidad, que facilita el montaje, el transporte y el mantenimiento.
- Capacidad para generar formas complejas con pocos elementos rígidos.



Estas ventajas explican por qué, aunque no se trate de un sistema “convencional”, la tensegridad forma parte de la investigación actual en ingeniería estructural, arquitectura avanzada, y diseño mecánico.

2.1.5.5 Limitaciones y retos actuales

Tampoco sería honesto ignorar que estas estructuras presentan desafíos importantes:

- Su análisis numérico requiere técnicas específicas.
- El montaje exige precisión en el tensado.
- Los nodos deben diseñarse con sumo cuidado, pues concentran esfuerzos.
- La normativa estructural existente no contempla explícitamente este tipo de sistemas.

Aun así, la investigación avanza rápidamente, y cada vez aparecen más publicaciones y herramientas que facilitan su estudio y construcción.

2.1.6 Relevancia para el presente trabajo

Los estudios previos sobre estructuras tensegríticas y sobre el diseño de nodos han servido como punto de partida para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado. A partir de los conocimientos recopilados en el proyecto del tutor, este trabajo se centra en analizar el comportamiento real de diferentes nodos articulados, con el objetivo de determinar cuál de ellos ofrece una mejor respuesta estructural.

Para ello, se han seleccionado varios tipos de nodos —diseñados según criterios de resistencia, facilidad de montaje y articulación— y se han sometido a ensayos experimentales. A partir de los resultados obtenidos, se pretende comparar su rendimiento y establecer qué configuraciones resultan más adecuadas para su uso en estructuras tensegríticas.

Más que validar modelos teóricos o numéricos, el propósito principal de este trabajo es evaluar en la práctica cómo se comportan los distintos diseños de nodo, identificar sus ventajas y limitaciones, y aportar conclusiones que sirvan de referencia para futuros proyectos de diseño estructural en este campo.

2.2 Nodos

En cualquier tensegridad, los nodos son algo más que simples uniones. Son el punto donde se decide cómo “respira” la estructura, cómo se reparten las tensiones internas y, en definitiva, cómo se comporta el sistema cuando se somete a carga. En modelos teóricos, un nodo no suele ser más que un punto matemático donde convergen barras y cables. En la vida real, en cambio, es una pieza con volumen, con un diseño concreto, con tornillos, taladros, tolerancias y pequeños detalles que marcan la diferencia.

La importancia del nodo se pone de manifiesto al analizar la literatura científica existente sobre estructuras tensegríticas. Con el fin de comprender cómo se han resuelto estas uniones en trabajos previos, se realizó una revisión de distintos estudios, patentes y modelos experimentales en los que se proponen soluciones específicas para la conexión entre barras y cables. Esta revisión ha servido como referencia para el diseño de los nodos desarrollados y ensayados en el laboratorio, permitiendo identificar criterios comunes y buenas prácticas que ayudan a definir qué se espera del comportamiento de un nodo en una estructura tensegrítica.

2.2.1 Función del nodo

Aunque pueda parecerlo, un nodo no es simplemente una pieza que conecta barras y cables. Su función es más delicada:

- debe transmitir la tracción de los cables sin producir excentricidades indeseadas,
- debe permitir que la barra oriente su compresión de manera natural,
- debe acompañar los pequeños ajustes geométricos que aparecen durante el pretensado,
- y debe hacerlo sin bloquear rotaciones, porque bloquearlas introduciría momentos y cambiaría por completo el funcionamiento de la estructura.

Dicho de forma más humana: un nodo en tensegridad tiene que ser fuerte, pero también “suave”. Si es demasiado rígido, obliga a la estructura a deformarse de manera extraña. Si es demasiado flexible, puede comprometer su estabilidad.

Por ese motivo el nodo debe comportarse como una rótula efectiva.

2.2.2 Ejemplos de nodos reales recogidos en la literatura

El documento elaborado por el tutor y su equipo incluye una selección muy práctica de nodos articulados empleados por distintos autores, mostrando configuraciones muy variadas que van desde soluciones extremadamente simples hasta diseños sorprendentemente sofisticados.

Entre los ejemplos más relevantes que presenta el entregable:

Nodo mecanizado por pletinas sobre cilindro truncado:

Muy usado en tensegridades tipo simplex o triplex. Permite unir una barra con tres cables mediante un conjunto de pletinas soldadas. Un ejemplo representativo de esta configuración puede observarse en la Figura 17, donde se muestra tanto la estructura completa como el detalle del nodo. Su ventaja principal es que garantiza alineaciones muy precisas. Su desventaja es la complejidad de fabricación.



Figura 17 Triplex o simplex con barras de 3 m (a) y detalle del nodo (b). Extraído de [14].

Nodo con tapa hemisférica (triplex modular):

Aparece especialmente en tensegridades que se ensamblan por módulos. Permite unir barras en sus extremos sin comprometer la articulación entre módulos (ver Figura 18).

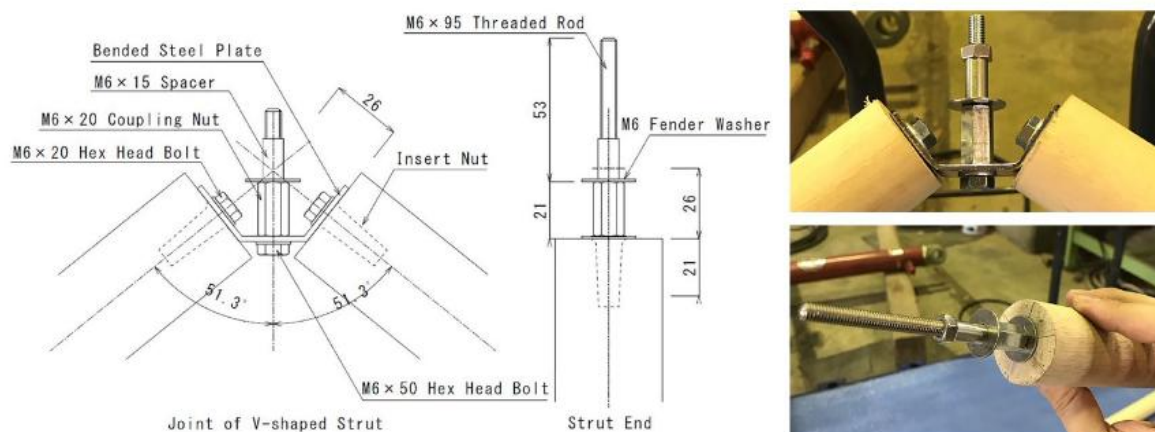


Figura 18 Plano del nodo y vista de detalle del mismo una vez fabricado. Extraído de [15]

Nodo basado en esferas alojadas en un cilindro (patente japonesa P2008-75397A):

En este nudo se van apilando en el interior de una pieza cilíndrica hueca una serie de esferas que se encuentran conectadas a los elementos traccionados (cables). Una vez alojadas todas en el interior del nodo, una pieza superior evita que se salgan del mismo. La idea resulta bastante original, permitiendo unir una barra con diversos cables, tal y como muestra la Figura 19.

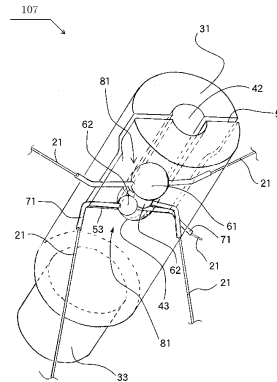


Figura 19 Diseño de nodo patente japonesa referencia P2008-75397^a. Extraído de [16]

Nodo de pasador con cabeza esférica

La Figura 20 recoge con mayor claridad la geometría del nodo. En su parte superior, la pieza incorpora una zona esférica donde se alojan tres orificios destinados a la fijación de los cables, permitiendo que cada uno pueda orientarse dentro de un margen aproximado de 75° a 29° . Tras montar los cables, esta zona se cierra mediante una tapa. A diferencia de las rótulas macizas de acero forjado —más pesadas y que requieren mecanizados muy precisos—, la solución propuesta, al ser hueca, reduce peso y ofrece una mayor libertad de movimiento a los cables en función de las cargas actuantes.

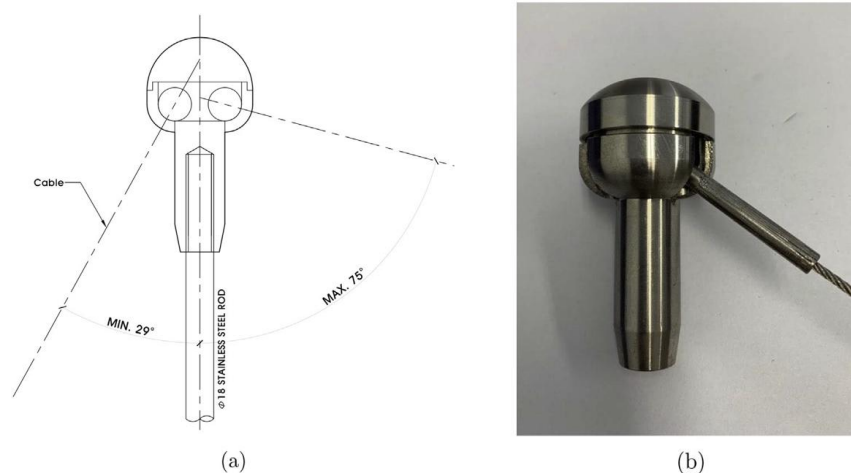


Figura 20. Plano (a) y nodo fabricado (b) de la tensegridad. Extraído de [17]

2.2.3 Principios prácticos

A pesar de sus diferencias, todos estos diseños coinciden en varios principios prácticos que resultan esenciales en tensegridad:

- El nodo debe favorecer la articulación, no impedirla.
- La conexión cable–nodo debe ser directa, sin forzar ángulos extraños.
- El montaje importa tanto como el diseño: si no se puede tensar correctamente, la estructura no funcionará.
- El nodo debe soportar tanto la pretensión como situaciones no previstas, como cargas oblicuas o pequeños impactos.

Estas ideas aparecen subrayadas repetidamente en el entregable, no tanto desde una perspectiva teórica sino desde la experiencia directa de haber construido y probado nodos en prototipos físicos.

2.2.4 Relevancia del estudio experimental del nodo

La revisión de la literatura científica pone de manifiesto que el estudio del nodo no constituye una tarea secundaria dentro del diseño de estructuras tensegríticas. Al contrario, los nodos suelen ser uno de los puntos con mayor incertidumbre en este tipo de sistemas, motivo por el cual numerosos autores recurren a ensayos experimentales sobre modelos físicos para comprobar aspectos clave como el comportamiento articulado de la unión, la eficacia del sistema de fijación, la capacidad del nodo para resistir cargas no previstas o su aptitud para transmitir correctamente el pretensado.

Este es precisamente el enfoque adoptado en el presente Trabajo Fin de Grado, cuyo objetivo ha sido evaluar si los nodos diseñados y montados cumplen los requisitos estructurales esperados, tanto en condiciones de trabajo habituales como ante situaciones de carga más desfavorables.

3. Familia octaedro

3.1 Introducción

La llamada familia octaedro ocupa un lugar muy particular dentro del conjunto de tipologías tensegríticas. Su nombre no es casual: deriva directamente de la geometría del octaedro clásico, un poliedro regular formado por ocho caras triangulares. A partir de esta figura elemental es posible construir un gran número de configuraciones tensegríticas que comparten una topología en común.

Lo interesante de esta familia no es solo su simplicidad geométrica, sino la capacidad que tiene para producir estructuras muy estables con un número relativamente reducido de cables y barras. Esta característica se aprecia claramente en la Figura 21, donde se muestra el esquema de un octaedro expandido. En comparación con otras tipologías, los sistemas octaédricos suelen presentar una mayor isotropía, es decir, una respuesta más homogénea ante cargas aplicadas desde distintas direcciones. Esto los convierte en candidatos ideales cuando se busca desarrollar prototipos que deban comportarse bien bajo acciones no perfectamente controladas, como ocurre en muchos ensayos de laboratorio.

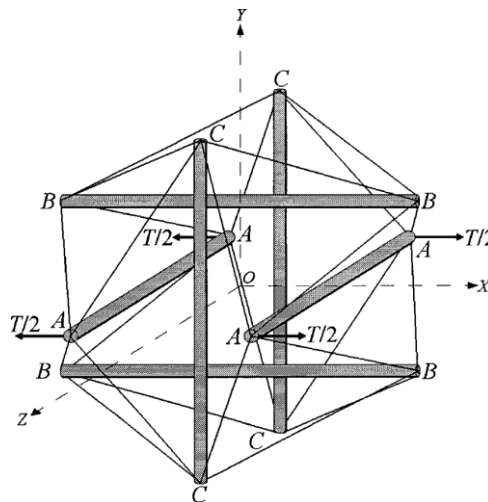


Figura 21. Esquema octaedro expandido. Extraído de [12]

En las tensegridades de tipo octaédrico, las barras suelen organizarse formando un conjunto de pares opuestos que nunca llegan a tocarse. La red de cables une estos vértices de forma que la tensión se distribuye de manera envolvente. Esto permite que, incluso con pocos elementos, el conjunto tenga un comportamiento global notablemente rígido, más incluso que otras configuraciones con el mismo número de barras.

En [18] se analizan variantes de octaedros tensados y sus posibles aplicaciones, y señala que este tipo de geometría favorece un reparto más claro de esfuerzos, lo cual simplifica tanto la fase de cálculo como la interpretación de resultados experimentales. Para un proyecto donde interesa validar el comportamiento mecánico del nodo esto es especialmente útil.

3.2 Variantes y extensiones de la familia octaedro

Construir una tensegridad basada en un octaedro implica reinterpretar completamente sus elementos. Lo que originalmente eran aristas rígidas se convierten en tendones sometidos exclusivamente a tracción, y lo que eran vértices se transforman en nodos articulados donde convergen cables y barras que nunca llegan a tocarse.

Miembros de la familia:

1. **Octaedro:**

El octaedro es la versión más cercana al poliedro original, aunque reinterpretada según los principios de la tensegridad. Esto significa que las tres barras que constituirían el esqueleto del octaedro ya no se tocan entre sí, sino que “flotan” dentro de una red de cables que definen su posición relativa. Las ocho caras triangulares del poliedro se sustituyen por planos imaginarios generados por los cables, y los nodos pasan a actuar como pequeños centros de redistribución de tensiones. Ver Figura 22 (a)

2. **Octaedro expandido:**

El octaedro expandido es una evolución lógica del simple. Consiste en separar los nodos entre sí, aumentando la distancia entre ellos sin alterar la conectividad de cables y barras. Dicho de forma sencilla: se “estira” el octaedro, haciéndolo más grande y espacioso, pero manteniendo intacta su topología. Ver Figura 22 (b)

3. **Octaedro doblemente expandido:**

El octaedro doblemente expandido da un paso más allá: no solo se separan los nodos exteriores, sino que también se introduce un aumento progresivo en la longitud de ciertos cables para crear una estructura todavía más “relajada” y estable geométricamente. Ver Figura 22 (c)

El octaedro contiene 6 nodos, 12 cables y 3 barras, y estos componentes se van multiplicando por 2 cuando se pasa a un miembro superior.

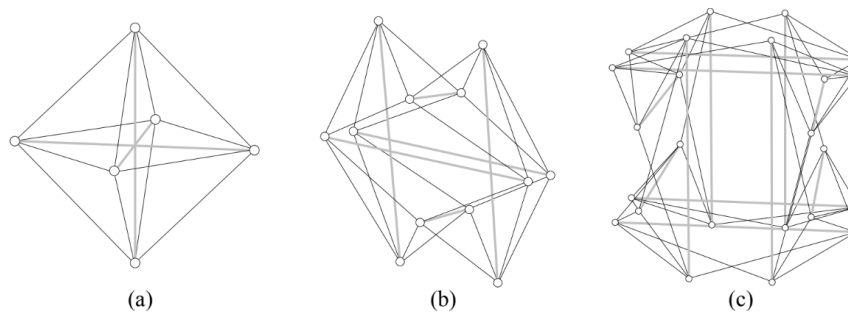


Figura 22. Octaedro (a), octaedro expandido (b) y octaedro doblemente expandido (c). Extraído de [18]

3.3 Cálculo de fuerzas y autoequilibrio en el octaedro

El análisis del equilibrio en las estructuras tensegríticas de la familia del octaedro se basa en una formulación matricial que permite describir de manera compacta la relación entre la geometría del sistema y las fuerzas internas que actúan en sus elementos. En este trabajo se adopta como base la formulación presentada en [18], adaptándola al contexto del presente estudio.

3.3.1 Formulación vectorial del equilibrio nodal

En una tensegridad octaédrica, cada nodo conecta una barra sometida a compresión con cuatro cables en tracción, dispuestos en direcciones no coplanares. Bajo la hipótesis de que los nodos se comportan como articulaciones ideales, el equilibrio estático en cada nodo se expresa imponiendo que la suma de las fuerzas transmitidas por los elementos que concurren en él sea nula.

Siguiendo la notación empleada en [18], la fuerza interna \mathbf{f}_i de cada elemento puede representarse mediante un vector:

$$\mathbf{f}_i = q_i \mathbf{n}_i$$

donde q_i es la fuerza axial del elemento i (positiva en tracción y negativa en compresión) y \mathbf{n}_i es el vector unitario que define la dirección del elemento en el espacio.

La condición de equilibrio en un nodo se expresa entonces como:

$$\sum_{i \in \mathcal{E}_k} q_i \mathbf{n}_i = \mathbf{0}$$

donde \mathcal{E}_k representa el conjunto de elementos conectados al nodo k . En el caso del octaedro, este conjunto está formado por cuatro cables y una barra.

Esta expresión refleja que el equilibrio del nodo depende tanto de la magnitud de las fuerzas internas como de la orientación geométrica de los elementos, lo que pone de manifiesto la estrecha relación entre forma y esfuerzo característica de las estructuras tensegríticas.

3.3.2 Formulación matricial global del equilibrio

Extendiendo el planteamiento nodal a toda la estructura, [18] presenta una formulación matricial que permite describir el equilibrio global del sistema. En esta formulación, todas las ecuaciones de equilibrio nodal se agrupan en una única expresión:

$$\mathbf{B} \mathbf{q} = \mathbf{0}$$

donde:

- \mathbf{B} es la matriz de equilibrio, que depende exclusivamente de la geometría y de la conectividad de la estructura,
- \mathbf{q} es el vector de fuerzas axiales internas de todos los elementos (cables y barras).

La matriz \mathbf{B} se construye a partir de los vectores unitarios de los elementos, organizados de acuerdo con la conectividad nodal. Cada columna de \mathbf{B} corresponde a un elemento estructural y cada bloque de tres filas representa el equilibrio en un nodo en las direcciones x , y y z .

Esta formulación permite analizar el equilibrio de estructuras complejas de forma sistemática y constituye la base para el estudio del autoequilibrio en tensegridades.

3.3.3 Equilibrio en la barra

En la formulación adoptada en [18], las fuerzas internas asociadas a los estados de autoesfuerzo incluyen tanto las tracciones en los cables como las compresiones en las barras. Para que la estructura sea viable desde el punto de vista estructural, estas fuerzas deben ser compatibles con la capacidad resistente de los elementos.

En particular, las barras deben cumplir la condición:

$$|q_b| < N_{\text{crit}}$$

donde q_b es la fuerza axial de compresión en la barra y N_{crit} es la carga crítica de pandeo, dada por:

$$N_{\text{crit}} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

De este modo, se garantiza que el estado de autoesfuerzo compatible con el equilibrio global no conduce al pandeo de las barras, cumpliendo el criterio de diseño adoptado: que el modo de fallo de la estructura venga gobernado por el agotamiento del cable y no por el colapso de los elementos comprimidos.

3.3.4 Estados de pretensado y compatibilidad geométrica

Una de las características fundamentales de las estructuras tensegríticas es la existencia de estados de autoesfuerzo, definidos como soluciones no triviales del sistema de equilibrio:

$$\mathbf{B} \mathbf{q}_s = \mathbf{0}, \mathbf{q}_s \neq \mathbf{0}$$

Tal y como se expone en [18], la existencia de estos estados implica que la estructura puede mantenerse en equilibrio sin necesidad de aplicar cargas externas, únicamente mediante un adecuado pretensado de los cables.

En el caso de las tensegridades octaédricas, la geometría altamente simétrica del sistema permite la aparición de al menos un estado de autoesfuerzo compatible, siempre que las posiciones nodales respeten las relaciones geométricas propias del octaedro. Si esta compatibilidad geométrica no se cumple, el sistema no admite estados de autoesfuerzo y, por tanto, no puede considerarse una tensegridad funcional.

Este enfoque pone de relieve que el diseño de una tensegridad no puede separarse en una fase puramente geométrica y otra puramente resistente, sino que ambas están íntimamente ligadas.

3.4 Octaedro expandido

El octaedro expandido no es simplemente una variante del octaedro simple: representa una optimización geométrica pensada para mejorar las prestaciones mecánicas sin alterar la conectividad estructural. De hecho, muchas tensegridades reales —especialmente las experimentales y las utilizadas en investigación— recurren a esta versión porque ofrece el equilibrio perfecto entre simplicidad, estabilidad y facilidad de montaje. Un ejemplo representativo de este tipo de configuraciones puede observarse en la Figura 23 se muestran distintas disposiciones de octaedros expandidos.

Motivación de la expansión

Esta expansión se realiza por varias razones:

- **Mejora la estabilidad geométrica:** al aumentar la separación entre nodos, los ángulos entre cables se vuelven más favorables, lo que reduce la probabilidad de colapso por pequeños errores en la pretensión.
- **Reduce interferencias entre barras:** en el octaedro simple, las barras quedan muy próximas entre sí, dificultando el montaje.
- **Facilita colocar instrumentos, sensores o nodos reales,** como ocurre en tu prototipo del laboratorio.

Estas ventajas convierten al octaedro expandido en una opción ideal cuando se busca estudiar el comportamiento real de componentes como nodos, cables o barras, ya que la estructura ofrece un marco estable y reproducible.

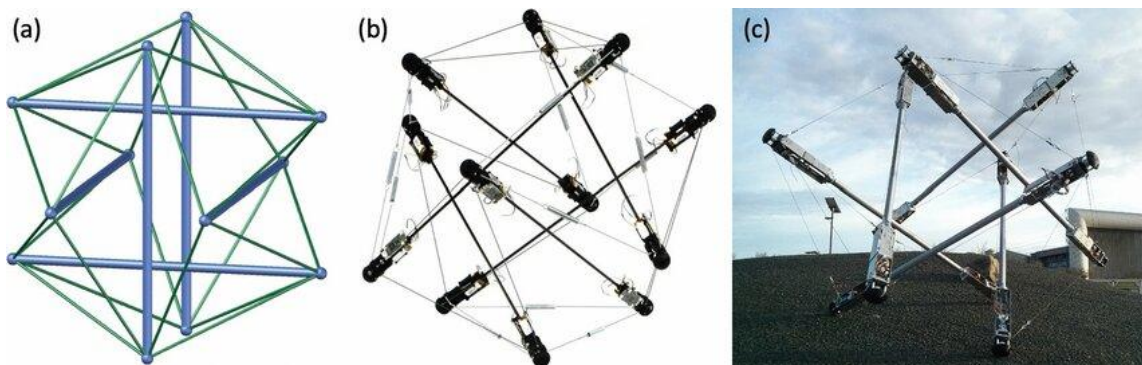


Figura 23. Ejemplos de octaedros expandidos. Extraído de [12]

Geometría y proporciones

En la versión expandida, los nodos siguen formando la misma red de conexiones, pero los ángulos se suavizan. Esto produce una estructura más abierta, con un volumen interior mayor y una apariencia visual menos compacta, tal y como puede observarse en la Figura 24, correspondiente a un octaedro expandido fabricado en el laboratorio.

La expansión no es arbitraria: debe realizarse siguiendo las proporciones adecuadas para mantener el autoequilibrio. En [18] se explica que esta mayor separación mejora el reparto de cargas porque reduce la componente radial de tracción y favorece una distribución más uniforme.

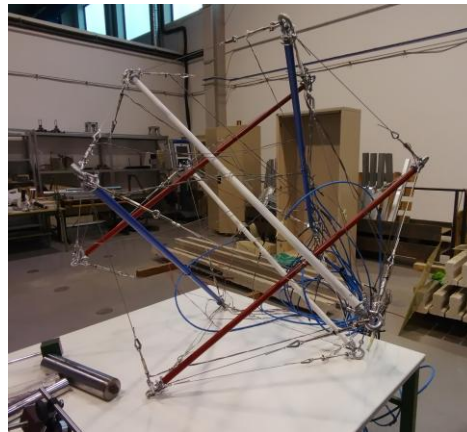


Figura 24. Octaedro expandido fabricado en el laboratorio de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingeniería Industrial

3.5 Consideraciones constructivas y comportamiento real en prototipos tensegríticos

Una de las configuraciones más estudiadas dentro de la familia del octaedro expandido es aquella en la que la estructura se descompone en un conjunto de celdas rómbicas interconectadas. Esta descomposición permite analizar de forma ordenada la disposición de las barras y la red de cables que garantiza el autoequilibrio del sistema.

En la Figura 25 se muestra un esquema detallado de un octaedro expandido, donde se representa la numeración de los nodos y la organización de los elementos estructurales. En particular, puede observarse cómo las barras (representadas mediante líneas de mayor espesor) se agrupan en pares opuestos sin llegar a entrar en contacto, mientras que los cables conforman una red continua que envuelve el conjunto y conecta las distintas celdas rómbicas. Esta organización espacial resulta fundamental para asegurar una distribución equilibrada de las tensiones y una respuesta estructural homogénea frente a acciones externas.

La figura incluye distintas vistas del mismo sistema —esquemática, en perspectiva y en proyección—, lo que permite apreciar con claridad la geometría tridimensional de la estructura y la orientación real de los cables en el espacio. Este tipo de representación resulta especialmente útil cuando se trabaja con prototipos reales, ya que pone de manifiesto que la correcta disposición geométrica de los elementos es un aspecto clave para el funcionamiento global de la tensegridad.

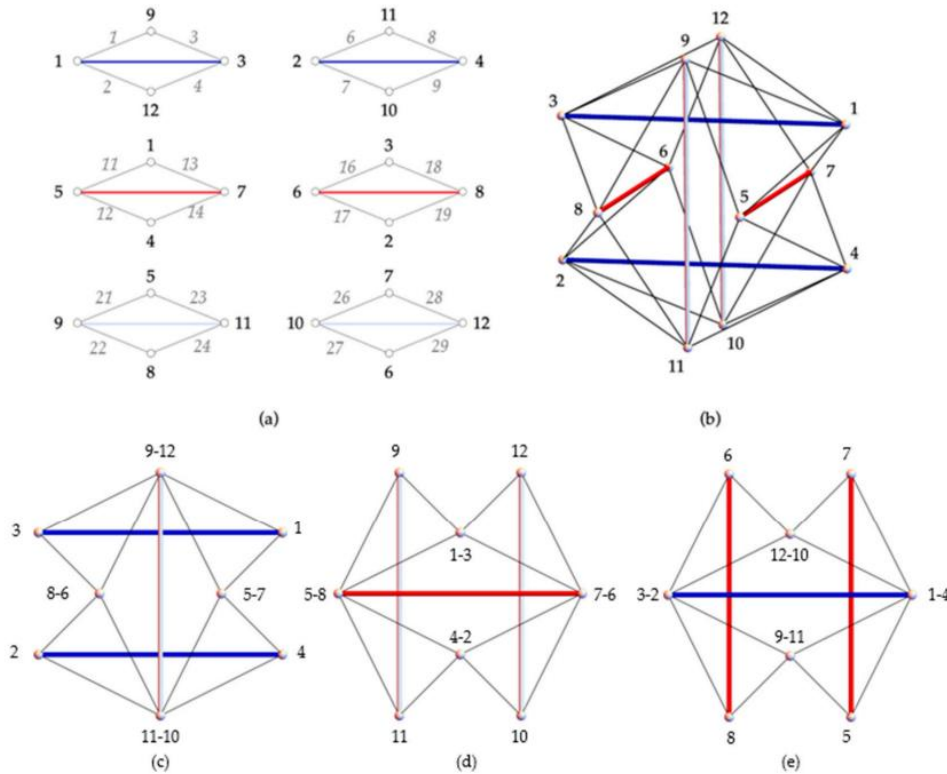


Figura 25. Octaedro expandido (las líneas de colores representan las barras; cada color corresponde a un grupo): (a) vista esquemática de las seis celdas rómbicas que componen el octaedro expandido, mostrando la numeración de los nodos (en negro) y la numeración detallada de los 24 elementos traccionados (en gris, en cursiva) por celda; (b) vista en perspectiva; (c) vista frontal; (d) vista lateral; (e) vista en planta. Extraído de [23]

3.6 Importancia octaedro expandido

En el contexto de este Trabajo Fin de Grado, la familia octaedro no es solo una referencia teórica. Es la configuración que se ha montado en el laboratorio, en concreto el octaedro expandido, y sobre la cual se han realizado los distintos ensayos que documenta este trabajo.

El esquema de la Figura 25 ha servido como referencia para la definición de la geometría empleada en el presente trabajo, tanto en la modelización numérica como en el montaje experimental, permitiendo reproducir de forma coherente la orientación real de los cables y facilitar la interpretación posterior de los resultados.



La elección no fue casual. La estructura octaédrica presenta varias ventajas que resultan especialmente útiles en un prototipo académico y experimental:

- menor sensibilidad a errores en el montaje,
- tensiones internas más homogéneas,
- comportamiento global más rígido,
- mayor estabilidad bajo cargas no perfectamente alineadas.

Otro de los motivos de peso para escoger la familia octaedro fue que sus nodos trabajan de manera muy limpia: las barras se encuentran en posiciones predecibles y los cables confluyen en direcciones que permiten identificar sin dificultad el flujo de carga. Esto facilita enormemente estudiar cómo responde el nodo ante distintos tipos de sollicitación.

En particular, en nuestro prototipo, los nodos articulados permiten observar cómo la pretensión afecta al asiento de los nodos, cómo se transmiten esfuerzos cuando los cables se tensan hacia distintas direcciones y cómo reaccionan los nodos frente a situaciones excepcionales, como una posible tracción no prevista en un elemento que normalmente trabaja a compresión.

4. Diseño de nodos

El diseño del nodo es, probablemente, la parte más delicada de toda la estructura tensegrítica. Aunque la atención suele recaer en la geometría general o en los cables que “dibujan” la forma, es realmente en los nodos donde se decide si la estructura puede funcionar como tensegridad o si, por el contrario, aparecerán rigideces no deseadas, falta de alineación o incluso fallos prematuros. Cada nodo actúa como un punto de transición entre la compresión que recibe la barra y la tracción procedente de los cables, y su diseño debe ser capaz de asumir esta doble naturaleza sin interferir con el equilibrio propio del sistema.

La filosofía que ha guiado este capítulo es sencilla: el nodo tiene que permitir que la geometría tensegrítica se exprese por sí misma, sin imponer restricciones artificiales ni convertirse en el elemento débil de la estructura. Para ello, se definieron una serie de criterios previos que condicionaron tanto la geometría final como la elección de materiales, la modelización CAD y el posterior análisis numérico.

4.1 Criterios de diseño

Al comenzar el diseño se establecieron varias premisas fundamentales que debían cumplirse en cualquier solución adoptada. Más que una lista cerrada de requisitos, estos criterios funcionan como una guía conceptual que asegura que la solución final responda correctamente a las particularidades de una tensegridad real.

4.1.1 El nodo no debe ser el punto débil del sistema

En una estructura tensegrítica, cada barra trabaja en compresión y cada cable trabaja en tracción. El nodo, como unión entre ambos, debe ser capaz de superar siempre la capacidad resistente de los elementos que conecta. Dicho de una forma más directa: si algo falla, que no sea el nodo.

En un diseño preliminar se utilizaron barras de acero cilíndricas huecas de diámetro exterior 20 mm e interior 17, y cables trenzados de 2 mm de diámetro nominal (Ver Anexo A). Ambos elementos se ensayaron a compresión y a tracción respectivamente, obteniéndose las siguientes cargas últimas:

- **Pandeo de la barra:** 7,203 kN
- **Rotura del cable:** 3,171 kN

A partir de estos valores, el nodo debía dimensionarse de forma que su comportamiento permaneciera esencialmente elástico para niveles de carga iguales o superiores a la carga de rotura del cable, garantizando así que el fallo de la estructura se produjera por el agotamiento del cable y no por la plastificación del nodo. Esto es coherente con la filosofía estructural general: un nodo que falla compromete toda la geometría del sistema, mientras que un cable que alcanza su límite puede reemplazarse de manera relativamente sencilla.

4.1.2 Función real del nodo

En la estructura empleada en este trabajo, las barras funcionan como elementos comprimidos aislados. Ninguna barra debe transmitir compresión a otra; para eso están los cables. El nodo, por tanto, no puede comportarse como un nudo estructural convencional.

Esto elimina de entrada muchas soluciones existentes en carpintería metálica o cerrajería, que suelen estar pensadas para transmitir momentos o cortantes entre perfiles. Aquí, por el contrario, el nodo debe ser casi una rótula: algo que mantenga la barra en posición, pero que permita que los cables encuentren de forma natural su alineación bajo tracción.

4.1.3 Uso de componentes disponibles (“off-the-shelf”)

Otro criterio importante fue que todo el sistema de unión debía ser fabricable con materiales comerciales, sin recurrir a mecanizados complejos. Esta decisión tiene sentido en un proyecto de investigación aplicada: permite repetir nodos, reemplazarlos rápidamente y, sobre todo, reducir el coste y el tiempo de construcción.

Elegir elementos de ferretería también favorece la reproducibilidad del experimento, ya que cualquier persona puede adquirir componentes idénticos. Esto facilita validar resultados sin necesidad de recurrir a talleres especializados.

4.1.4 Consideración previa del tipo de barra y cable

El diseño del nodo no se puede plantear sin conocer exactamente qué elementos va a unir. En este caso:

- **Barra:** tubo de acero, diámetro exterior 20 mm, diámetro interior 17 mm. (Ficha Técnica en Anexo A)
- **Cable:** acero trenzado 2 mm, 6×7 fiber-core, con 3,171 kN de carga de rotura. (Ficha Técnica en Anexo A)

Esta información dimensiona restricciones claras, como que el sistema no debe introducir excentricidades fuertes ni forzar al cable a geometrías improbables.

4.2 Nodo cáncamo

El nodo tipo cáncamo constituye la solución más sencilla y directa de las estudiadas en este trabajo, pero no por ello menos interesante desde el punto de vista estructural. Se trata de un diseño basado en el uso de un elemento comercial estándar, ampliamente disponible en ferretería industrial, que permite unir la barra comprimida con los cables traccionados sin necesidad de fabricar piezas específicas en taller.

Este nodo se diseñó con la intención de comprobar hasta qué punto una solución “off-the-shelf” puede ser válida para una estructura tensegrítica real, tanto en términos de resistencia como de comportamiento mecánico. Su simplicidad constructiva lo convierte en un excelente punto de partida para el análisis experimental y para la comparación con soluciones de fabricación propia, como el nodo de pletinas descrito anteriormente.

Concepto y funcionamiento general

El funcionamiento del nodo tipo cáncamo se basa en un anclaje de expansión introducido en el interior de la barra tubular. Al aplicar un par de apriete controlado, el anclaje se expande radialmente, generando fricción suficiente para fijarse al interior de la barra. A este anclaje se atornilla un cáncamo cerrado, que actúa como punto de conexión para los cables mediante grilletes o elementos similares, tal y como se muestra en la Figura 26, correspondiente al nodo empleado en el laboratorio.

Desde el punto de vista estructural, el conjunto funciona como una unión esencialmente articulada. El cáncamo permite que el cable gire y se oriente libremente en función de la geometría de la estructura y del estado de carga, evitando la introducción de momentos no deseados en la barra. Esta característica es especialmente importante en una tensegridad, donde se busca que los elementos comprimidos trabajen lo más cerca posible de una compresión pura.



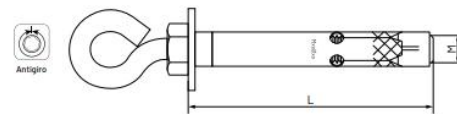
Figura 26. Cáncamo Damesa. Imagen del laboratorio

Materiales y dimensiones

Los componentes del nodo son estándar:

- Cáncamo cerrado DAMESA, referencia 09108330, fabricado en acero galvanizado.
- Anclaje de expansión compatible con diámetros interiores de 17 mm.
- Grillete para unir el extremo del cable, permitiendo rotación.
- Barra tubular donde se aloja el sistema.

El uso de acero garantiza una resistencia suficiente para superar los 3,171 kN de tracción de los cables, y su acabado galvanizado mejora el comportamiento frente a corrosión, algo relevante en estructuras que puedan usarse en exteriores. En la Figura 27. Ficha información técnica de Damesa Figura 276 podemos ver la ficha técnica de nuestro cáncamo, en nuestro caso el elegido es el último de la tabla, con diámetro de 16 mm y 80 mm de longitud del anclaje.



El funcionamiento es el mismo que los anclajes metálicos con tornillo. Es necesario realizar un taladro previamente donde ubicar el anclaje y mediante la expansión de la camisa una vez realizado el roscado del cáncamo se produce el anclaje por presión en las paredes del material base. El cáncamo permite fijar el elemento a sujetar o fijar empleando un cable, un pasador o cualquier otro elemento que permita la unión.

MATERIAL: Acero al carbono
Anillo de nylon rojo
ACABADO: Cincado blanco

Medida M x L	Referencia	Ø Broca mm	Par de apriete Nm	Envase	Embalaje
6 x 45	09108282	8	15	150	900
6 x 45	09108135	9	15	150	900
8 x 60	09108258	10	25	50	300
8 x 60	09108143	11	25	50	200
10 x 70	09108321	12	35	25	200
10 x 70	09108357	14	35	50	200
12 x 80	09108330	16	50	25	200

Figura 27. Ficha información técnica de Damesa. Extraído de [19]

Geometría y compatibilidad con la barra

Una de las ventajas principales de este nodo es su compatibilidad directa con la barra tubular empleada en la estructura. El diámetro interior de la barra (17 mm) permite alojar correctamente el anclaje de expansión, asegurando un contacto adecuado y una transmisión eficiente de esfuerzos. Esta correcta integración puede observarse en la Figura 28, donde se muestra el nodo una vez montado en el interior de la barra.

La geometría compacta del nodo hace que el conjunto no sobresalga excesivamente del extremo de la barra, lo que reduce interferencias con otros elementos de la estructura y facilita el montaje. Además, al no requerir mecanizados adicionales en la barra, se evita debilitarla mediante taladros o ranuras, conservando su capacidad resistente frente a pandeo.



Figura 28. Nodo integrado en la barra utilizada en la estructura

Comportamiento estructural esperado

Desde el punto de vista mecánico, el nodo tipo cáncamo presenta un comportamiento claro y fácilmente interpretable. La tracción del cable se transmite al cáncamo, de este al anclaje de expansión y, finalmente, a la barra. El esfuerzo principal que soporta el nodo es, por tanto, compresión, acompañada de pequeñas componentes de cortante debidas a la orientación real de los cables.

Al tratarse de una unión articulada, el nodo no introduce restricciones angulares significativas, lo que favorece que el cable trabaje alineado con su eje y reduce la aparición de tensiones secundarias. Esta característica lo hace especialmente adecuado para estructuras tensegríticas, donde los cables suelen converger en direcciones espaciales muy distintas.

No obstante, el comportamiento del nodo depende en gran medida del par de apriete aplicado durante el montaje. Un apriete insuficiente puede provocar deslizamientos del anclaje dentro de la barra, mientras que un apriete excesivo podría deformar localmente la barra o dañar el propio anclaje. Por este motivo, el nodo fue sometido posteriormente a ensayos específicos para determinar un rango de apriete adecuado.

Ventajas del nodo tipo cáncamo

Entre las principales ventajas de esta solución se encuentran:

- su simplicidad constructiva,
- el uso exclusivo de componentes comerciales,
- la rapidez de montaje y desmontaje,
- la buena articulación del cable,
- y la facilidad para reemplazar piezas en caso de fallo.

Estas características hacen que el nodo sea especialmente interesante para prototipos experimentales, estructuras desmontables o aplicaciones donde se requiera una solución económica y fácilmente reproducible.

Limitaciones y aspectos a controlar

Pese a sus ventajas, este nodo presenta también algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta. Al depender de la fricción generada por el anclaje de expansión, su comportamiento está muy ligado a la calidad del montaje y al estado superficial del interior de la barra. Además, el sistema no impone una orientación concreta a los cables, lo que puede resultar menos adecuado en estructuras donde se quiera controlar con precisión la geometría final.

Estas limitaciones no invalidan la solución, pero sí justifican la necesidad de ensayos experimentales, tanto de apriete como de extracción, para verificar que el nodo se comporta de forma segura bajo las cargas esperadas.

4.3 Nodo pletinas

Además del nodo basado en un elemento comercial, se desarrolló un segundo diseño de nodo fabricado íntegramente de forma manual en el taller. Esta solución se planteó con el objetivo de explorar una alternativa constructiva sencilla, fácilmente adaptable a distintas geometrías y que permitiera reproducir con mayor fidelidad la orientación real de los cables dentro de la estructura tensegrítica. En la Figura 29 se muestran las pletinas empleadas en la fabricación de este nodo.

El nodo está formado por un conjunto de cuatro pletinas de acero, cada una de dimensiones $70 \times 30 \times 3$ mm, que trabajan de manera conjunta como elemento de unión entre la barra y los cables. A diferencia del nodo tipo cáncamo, en este caso la geometría del nodo se define explícitamente durante el proceso de fabricación, mediante el doblado de las pletinas según la dirección real de los cables.



Figura 29. Pletinas utilizadas para la construcción del nodo

Concepto y funcionamiento general

El principio de funcionamiento del nodo es sencillo pero eficaz. Cada pletina actúa como punto individual de anclaje para un cable, permitiendo que este trabaje en su dirección real dentro de la estructura. Tal y como se aprecia en la Figura 30, las cuatro pletinas se apilan sobre una varilla central, que atraviesa los orificios interiores de todas ellas y mantiene el conjunto alineado.

Esta varilla se introduce parcialmente en el interior de la barra, y a su vez del anclaje, por uno de sus extremos, mientras que por el extremo opuesto se fija mediante una tuerca, cuya función es impedir que las pletinas puedan deslizarse o separarse del conjunto. De este modo, el nodo queda solidariamente unido a la barra, pero mantiene cierta capacidad de adaptación geométrica gracias a la independencia de cada pletina.

El sistema permite desmontar fácilmente el nodo, sustituir pletinas individuales o modificar la configuración sin necesidad de fabricar una pieza completamente nueva, lo que resulta especialmente útil en un entorno experimental.



Figura 30. Nodo pletinas construido en el laboratorio

Geometría y orientación de las pletinas

Un aspecto clave de este nodo es que la orientación de las pletinas no es arbitraria. Cada una de ellas se dobló utilizando una plegadora siguiendo el ángulo correspondiente a la dirección del cable dentro de la estructura tensegrítica. En concreto:

- Dos pletinas se doblaron con un ángulo de $35,26^\circ$,
- Dos pletinas se doblaron con un ángulo de $65,91^\circ$.

Esta distribución responde a la geometría real de los cables en la estructura, permitiendo que cada uno trabaje sin desviaciones importantes respecto a su eje natural de tracción. De esta forma, se evita forzar el cable en el nodo y se reduce la aparición de esfuerzos secundarios no deseados.

Cada pletina incorpora dos orificios claramente diferenciados:

- uno situado en el extremo libre, destinado a la fijación del cable,
- y otro en la zona interior, alineado con el eje de la varilla central, que permite apilar todas las pletinas en un único conjunto.

Materiales y fabricación

Las pletinas se fabricaron a partir de acero estructural, seleccionado por su buena resistencia mecánica, facilidad de mecanizado y disponibilidad en taller. El espesor de 3 mm proporciona un compromiso adecuado entre rigidez y facilidad de doblado, permitiendo ajustar los ángulos sin necesidad de procesos industriales complejos. El resultado final del nodo fabricado puede observarse en la Figura 31.

El proceso de fabricación se realizó de forma manual e incluyó:

- corte de las pletinas a la longitud especificada,
- taladrado de los dos orificios en cada pieza,
- doblado controlado según los ángulos requeridos,
- y montaje final sobre la varilla central.

Este enfoque permite adaptar el nodo a diferentes configuraciones de cables simplemente modificando los ángulos de doblado o el número de pletinas, lo que convierte a este diseño en una solución muy flexible para prototipos.



Figura 31. Nodo pletinas construido en el laboratorio

Comportamiento estructural esperado

Desde el punto de vista estructural, el nodo de pletinas presenta un comportamiento claramente diferenciado respecto al nodo tipo cáncamo. En este caso, la tracción de cada cable se transmite directamente a su pletina correspondiente, y de ahí al conjunto formado por la varilla y la barra.

El reparto de esfuerzos se produce de manera más explícita, ya que cada pletina trabaja principalmente a tracción y flexión local, mientras que la varilla central transmite las cargas al interior de la barra. Esta configuración permite identificar con claridad qué

elementos están más solicitados y facilita el análisis del comportamiento del nodo bajo carga.

Además, al no tratarse de una rótula esférica, el nodo impone parcialmente la orientación de los cables, lo que puede resultar ventajoso para mantener la geometría deseada de la estructura, aunque también requiere un mayor cuidado en el diseño y en el montaje para evitar concentraciones de tensiones.

Ventajas y limitaciones del diseño

Entre las principales ventajas de este nodo destacan:

- su simplicidad constructiva,
- la posibilidad de fabricación íntegra en taller,
- la adaptabilidad geométrica a distintas configuraciones de cables,
- y la facilidad para modificar o sustituir componentes individuales.

Como limitaciones, cabe señalar que:

- requiere mayor precisión en el doblado de las pletinas,
- introduce cierta rigidez angular en comparación con un nodo totalmente articulado,
- y puede presentar mayores concentraciones de tensión en las zonas de doblado si no se dimensiona adecuadamente.

Aun así, este diseño resulta especialmente interesante desde el punto de vista experimental, ya que permite estudiar cómo influye la geometría del nodo en el comportamiento global de la estructura y comparar sus prestaciones con soluciones más articuladas, como el nodo tipo cáncamo.

4.4 Nudo adicional de conexión de dos barras: propuesta de diseño

Durante el desarrollo del trabajo, y especialmente a partir de las discusiones mantenidas con el tutor, surgió la necesidad de plantear una solución de nudo distinta a las analizadas hasta el momento, en la que confluyeran dos barras en lugar de una sola. Aunque este tipo de configuración no es la más habitual en las tensegridades clásicas — donde las barras suelen permanecer aisladas y no entrar en contacto entre sí—, su estudio resulta de interés desde un punto de vista experimental y constructivo, especialmente cuando se pretende ampliar el abanico de soluciones de ensamblaje o explorar configuraciones híbridas.

La motivación inicial para este nudo no surge tanto de una necesidad estructural estricta, sino de una problemática práctica relacionada con la conexión de los cables. En la estructura planteada por el tutor para desarrollos futuros, existen cables que deben llegar al nudo sin conectarse directamente a los cáncamos de las barras, mientras que otros sí lo hacen. Esta coexistencia de situaciones hace necesario disponer de un punto de conexión específico para los cables, independiente de los anclajes de las barras.

La primera referencia conceptual empleada para abordar este problema se muestra en la Figura 32, donde se observa un nudo que conecta dos barras mediante una geometría en forma de “U” y resuelve la llegada de los cables mediante un elemento inferior adicional. Sin embargo, tras un análisis más detallado, se comprobó que dicha solución estaba condicionada por la presencia de un cable inferior paralelo al nudo, una circunstancia que no se dará en la estructura que se pretende desarrollar. Esto abrió la puerta a un replanteamiento del diseño, buscando una solución más simple, coherente con el resto de nodos del trabajo y, sobre todo, mejor adaptada a la problemática real.



Figura 32. Ejemplo de nudo de conexión de dos barras empleado como referencia conceptual

4.4.1 Replanteamiento conceptual del nodo

A partir de esta reflexión, se identificó que el verdadero problema a resolver no era tanto la unión rígida de dos barras, sino la necesidad de disponer de un nodo capaz de:

- conectar dos barras mediante elementos articulados,
- permitir la llegada de cables tanto desde la parte superior como inferior del nodo,
- y separar claramente la función estructural de las barras (compresión) de la de los cables (tracción).

En lugar de partir de un bloque macizo o de una geometría cerrada, se decidió aprovechar la filosofía ya desarrollada en el nodo de pletinas, adaptándola a esta nueva necesidad. De este modo, el diseño se mantiene coherente con las soluciones anteriores y evita introducir piezas excesivamente complejas o ajenas al espíritu experimental del trabajo.

4.4.2 Propuesta de nodo mediante pletinas y pasadores

La solución finalmente propuesta consiste en un nodo formado por dos pletinas metálicas paralelas, unidas entre sí mediante tres pasadores, cada uno con una función claramente definida dentro del conjunto.

En esta configuración:

- los dos pasadores laterales se emplean para la conexión de las dos barras, una a cada lado del nodo, mediante los correspondientes cáncamos,
- mientras que el pasador central se destina exclusivamente a la conexión de los cables, actuando como punto de anclaje articulado común.

Esta disposición permite que los cables puedan llegar al nodo tanto desde arriba como desde abajo, sin necesidad de conectarse directamente a los cáncamos de las barras, resolviendo así el problema detectado inicialmente. Al mismo tiempo, la solución mantiene un carácter claramente articulado, evitando la transmisión de momentos no deseados a las barras.

El diseño del nodo se desarrolló utilizando el software SolidWorks, lo que permitió materializar de forma clara la idea conceptual y comprobar su viabilidad geométrica antes de plantear cualquier fase posterior. En la Figura 33 se muestra el modelo tridimensional del nodo, donde puede apreciarse la disposición de las dos pletinas paralelas, los tres pasadores y la posición relativa de las barras y los cables. Este modelo facilitó la verificación del correcto ensamblaje de todos los componentes, así como la detección temprana de posibles interferencias entre elementos, algo especialmente relevante en un nodo donde confluyen varias funciones estructurales. Además, la

representación en SolidWorks sirvió como base para futuras modificaciones del diseño y para evaluar visualmente el comportamiento articulado del conjunto, asegurando que la solución propuesta responde de manera coherente a la problemática planteada.



Figura 33. Modelado en Solidworks del nodo de dos barras propuesto

4.4.3 Funcionamiento mecánico esperado

Desde el punto de vista estructural, el nodo actúa como un elemento de reparto de esfuerzos bien definido. Las fuerzas de tracción procedentes de los cables se introducen en el nodo a través del pasador central, que trabaja principalmente a cortante. Esta carga se transmite posteriormente a las pletinas, las cuales la redistribuyen hacia los pasadores laterales conectados a las barras.

Las barras, por su parte, reciben la carga de forma aproximadamente axial, lo que resulta coherente con su función de elementos comprimidos dentro de la estructura tensegrítica. La utilización de dos pletinas paralelas permite aumentar la rigidez global

del conjunto y reducir la sollicitación individual de cada pasador, mejorando el comportamiento estructural del nodo frente a cargas elevadas.

Además, el uso de pasadores introduce de manera natural una articulación mecánica real, permitiendo pequeñas rotaciones relativas entre los distintos elementos. Esta característica es especialmente importante en estructuras tensegríticas, donde se busca que el equilibrio se logre mediante la geometría y el pretensado, y no mediante rigideces impuestas por los nodos.

4.4.4 Ventajas y alcance de la solución propuesta

Entre las principales ventajas de este diseño destacan su simplicidad constructiva y su coherencia con los nodos de pletinas ya estudiados en el trabajo. La solución se basa en elementos sencillos —pletinas y pasadores estándar— fácilmente fabricables en un entorno de taller, sin necesidad de mecanizados complejos ni de componentes comerciales específicos.

Asimismo, la clara separación funcional entre la conexión de barras y la conexión de cables facilita el montaje, el desmontaje y la posible modificación del nodo en futuras iteraciones experimentales. Esto resulta especialmente valioso en un contexto de investigación, donde la flexibilidad y la capacidad de adaptación son factores clave.

Como en el caso del diseño inicial, conviene señalar que la conexión directa de dos barras en un mismo nodo se aleja del concepto más puro de tensegridad. Por este motivo, esta solución no se plantea como un sustituto de los nodos clásicos analizados previamente, sino como una propuesta exploratoria que amplía el abanico de configuraciones posibles y permite estudiar nuevas formas de ensamblaje dentro del marco del proyecto.

5. Modelado y simulación en SolidWorks

La fase más importante de la modelización fue el análisis estructural del nodo. Con SolidWorks Simulation se realizó un ensayo virtual donde se aplicaron cargas equivalentes a las que soportaría en la estructura tensegrítica en condiciones críticas, ya que se ha simulado con cargas límite de los cables (3,171 kN) en los 4 cables.

Orientación de las cargas

Una particularidad clave es que los cables del prototipo están orientados según la geometría de un octaedro expandido. Esto significa que las fuerzas no actúan en un único plano, sino en direcciones oblicuas que deben representarse correctamente en el análisis. Esta disposición espacial de los cables puede observarse en la Figura 34, donde se muestra la numeración de los nodos y la dirección de los cables asociados al nodo estudiado.

Por ello, cada vector de carga se aplicó con la orientación real medida sobre el modelo geométrico de la estructura, en la cual cada barra presenta una longitud de 1 m. Si el nodo que vas a modelizar es el número 1, las coordenadas que necesitas para ver la dirección de los cables son las siguientes:

Nodo 1: (-0.5, 0., -0.25). Estas serían las coordenadas del centro del cáncamo

Nodo 5: (-0.25, -0.5, 0). Primer cable que sale del nodo 1 hacia el 5.

Nodo 7: (-0.25, 0.5, -0). Segundo cable que sale del nodo 1 hacia el 7.

Nodo 9: (0, -0.25, -0.5). Tercer cable que sale del nodo 1 hacia el 9.

Nodo 12: (-0, 0.25, -0.5). Cuarto cable que sale del nodo 1 hacia el 12.



Figura 34. Numeración de nodos y dirección cables nodo 1 estudiado

5.1 Nodo cáncamo

5.1.1 Modelado en SolidWorks

Una vez definido el concepto del nodo tipo cáncamo y seleccionados los componentes comerciales a emplear, se procedió a su modelado geométrico mediante el software SolidWorks, con el objetivo de disponer de una representación fiel del conjunto y poder realizar posteriormente el análisis numérico del mismo. El resultado de este proceso de modelado puede observarse en la Figura 35, correspondiente al modelo tridimensional del cáncamo.

Para la elaboración del modelo se tomaron medidas directas en el laboratorio utilizando un pie de rey, ya que la ficha técnica proporcionada por el fabricante no incluía información detallada sobre la geometría completa del anclaje. Este proceso permitió capturar dimensiones clave como el diámetro del cáncamo, el espesor del ojal, la longitud roscada, la geometría de la camisa de expansión y las transiciones entre los distintos elementos del conjunto.

El modelo se realizó reproduciendo de forma simplificada, pero suficientemente precisa, las partes estructuralmente relevantes del nodo. No se buscó una reproducción exacta de todos los detalles secundarios, sino una geometría que permitiera representar correctamente la transmisión de esfuerzos y la localización de posibles concentraciones de tensiones. En este sentido, se prestó especial atención al ojal del cáncamo, al ser el punto donde previsiblemente podrían aparecer los mayores niveles de sollicitación. En el anexo Planos se podrá ver el plano realizado de este nodo.



Figura 35. Modelado del cáncamo realizado en SolidWorks

5.1.2 Simulación numérica (SolidWorks Simulation)

Una vez completado el modelo geométrico del nodo tipo cáncamo, se procedió a realizar su análisis numérico mediante el módulo SolidWorks Simulation, empleando el método de los elementos finitos. El objetivo principal de esta simulación no fue predecir con exactitud el comportamiento último del nodo, sino verificar que el diseño propuesto cumple los criterios estructurales establecidos, en particular el requisito fundamental de que el nodo no falle antes que el cable o la barra a los que se conecta.

Para ello, se definió un caso de carga representativo de las solicitaciones que el nodo puede experimentar dentro de la estructura tensegrítica. La orientación de las fuerzas aplicadas se estableció de acuerdo con la geometría real de los cables en el octaedro expandido, tal y como se muestra en la Figura 36, donde se ilustra la dirección de las cargas aplicadas sobre el modelo, tal y como vimos en la Figura 34.

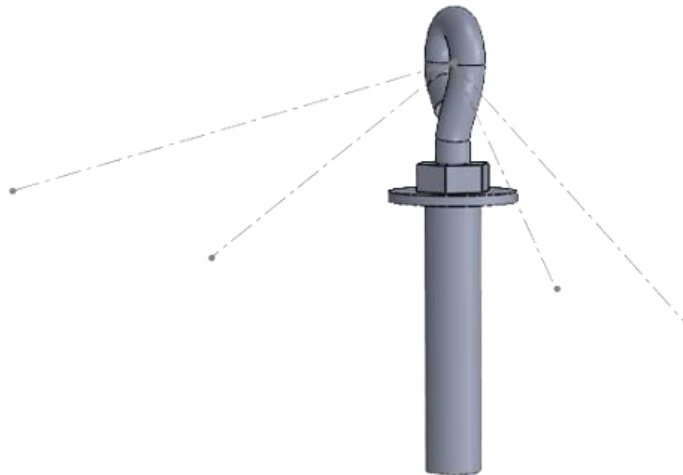


Figura 36. Definición de la dirección de cargas

Condiciones de contorno

La definición de las condiciones de contorno es uno de los aspectos más delicados del análisis numérico, ya que condiciona de forma directa los resultados obtenidos. En este estudio se adoptaron una serie de hipótesis orientadas a reproducir, de forma lo más realista posible, el comportamiento del nodo en servicio. Las principales condiciones consideradas se describen a continuación y se resumen gráficamente en la Figura 37.

En primer lugar, la superficie del anclaje en contacto con el interior de la barra se consideró completamente restringida, simulando el efecto del apriete del anclaje de expansión. Esta hipótesis representa un estado ideal de fijación, coherente con un montaje correcto del nodo y con el par de apriete definido previamente en los ensayos experimentales realizados en laboratorio.

La aplicación de la carga se realizó directamente en las zonas de contacto entre los cables y el nodo. Para ello, se definieron líneas de partición en la geometría del cáncamo, coincidentes con las posiciones donde los cables transmitirían la tracción al nodo. De este modo, cada fuerza se aplicó siguiendo la dirección real del cable correspondiente, evitando concentrar la carga en una única superficie y reproduciendo de forma más fiel el comportamiento del nodo en condiciones reales de servicio. Este planteamiento permite una distribución más realista de los esfuerzos en el ojal del cáncamo, reduciendo concentraciones de tensiones artificiales y proporcionando una estimación más representativa del estado tensional del conjunto bajo las solicitaciones propias de la estructura tensegrítica.

Por último, se empleó un mallado refinado en aquellas zonas donde se esperaba una mayor concentración de tensiones, especialmente en la rosca del cáncamo y en el área de contacto entre el anclaje y la barra. En el resto del modelo se utilizó un mallado más grueso, optimizando el equilibrio entre precisión numérica y coste computacional.

El conjunto de estas decisiones permite obtener resultados conservadores y coherentes desde el punto de vista estructural, garantizando que el nodo trabajará de forma segura en condiciones reales de funcionamiento.

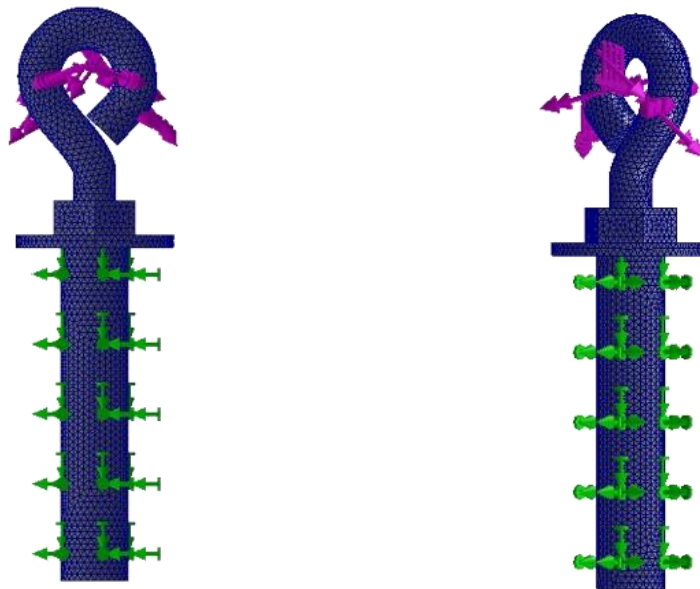


Figura 37. Fijación, mallado y fuerzas en nuestro nodo cáncamo

Resultados

Los resultados obtenidos a partir del análisis por elementos finitos permiten evaluar el comportamiento mecánico del nodo tipo cáncamo bajo las cargas consideradas, aportando información relevante sobre la distribución de tensiones y los posibles puntos críticos del diseño.

El campo de tensiones equivalentes de Von Mises muestra que, de forma general, la mayor parte del nodo trabaja con niveles de tensión inferiores al límite elástico del acero, especialmente en el cuerpo del anclaje y en la zona de contacto con el interior de la barra. No obstante, se observan valores puntuales de tensión que superan el límite elástico en zonas muy localizadas del ojal del cáncamo, concretamente en los puntos de aplicación de las cargas correspondientes a los cables (Figura 38).

Estas concentraciones elevadas de tensión deben interpretarse con cautela. Se trata de picos locales asociados a la aplicación concentrada de fuerzas y a la geometría curva del ojal, típicos de los análisis por elementos finitos en zonas de contacto o cambio brusco de sección. En este tipo de regiones, el modelo numérico tiende a sobreestimar las tensiones, generando singularidades que no representan necesariamente un inicio real de plastificación global del componente.

Desde el punto de vista estructural, resulta significativo que las zonas donde se superan localmente los valores elásticos son muy reducidas y no se extienden al resto del nodo, manteniéndose el comportamiento global del conjunto esencialmente elástico. Además, estas zonas no coinciden con regiones críticas para la estabilidad del anclaje dentro de la barra, ni con áreas susceptibles de provocar un fallo frágil o un mecanismo de colapso.

Las deformaciones obtenidas en el modelo son pequeñas y compatibles con un uso estructural seguro, sin indicios de deformaciones excesivas que puedan comprometer la funcionalidad del nodo ni alterar de forma apreciable la geometría de la estructura tensegrítica. No se observa una plastificación generalizada ni un mecanismo de fallo progresivo en el anclaje, lo que indica que el nodo mantiene su integridad estructural bajo las cargas analizadas.

En conjunto, el análisis numérico confirma que el nodo tipo cáncamo cumple el criterio de diseño adoptado, ya que su comportamiento es estable y su capacidad resistente resulta suficiente frente a las solicitaciones impuestas. Aunque aparecen tensiones locales elevadas en el ojal, el fallo global del sistema sigue estando gobernado por el agotamiento del cable o, en su caso, por el pandeo de la barra, y no por un fallo prematuro del nodo.

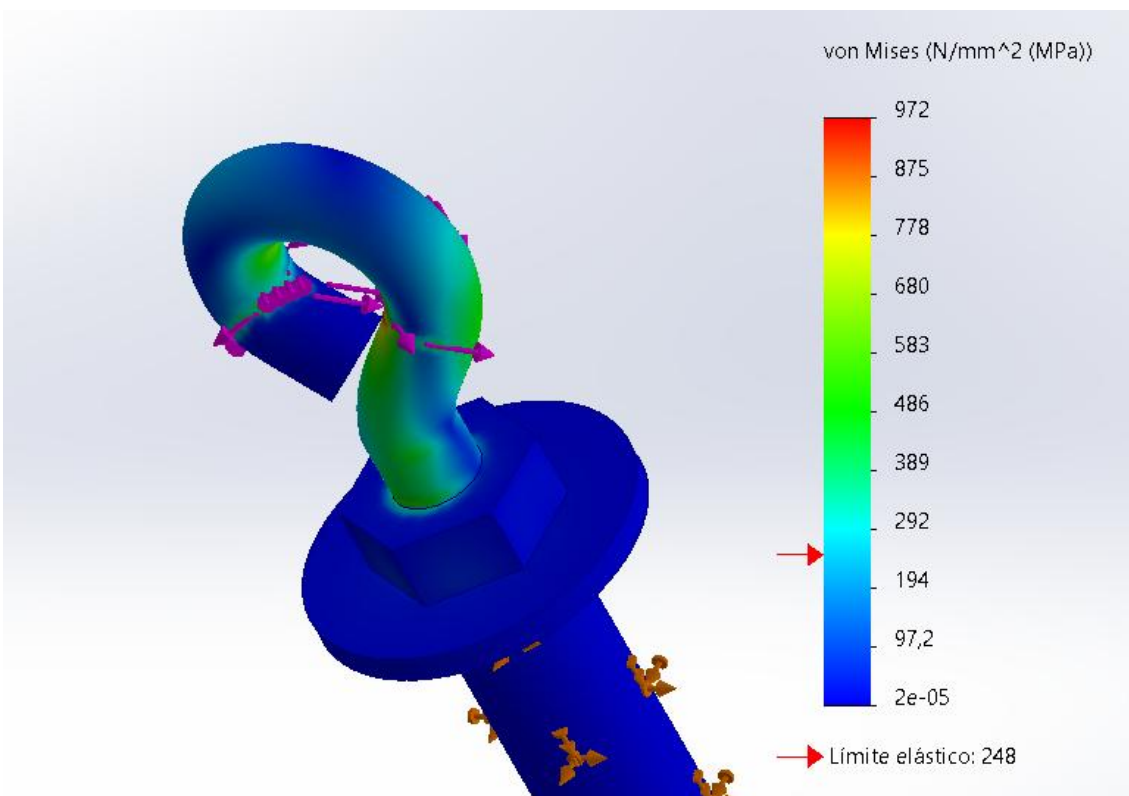
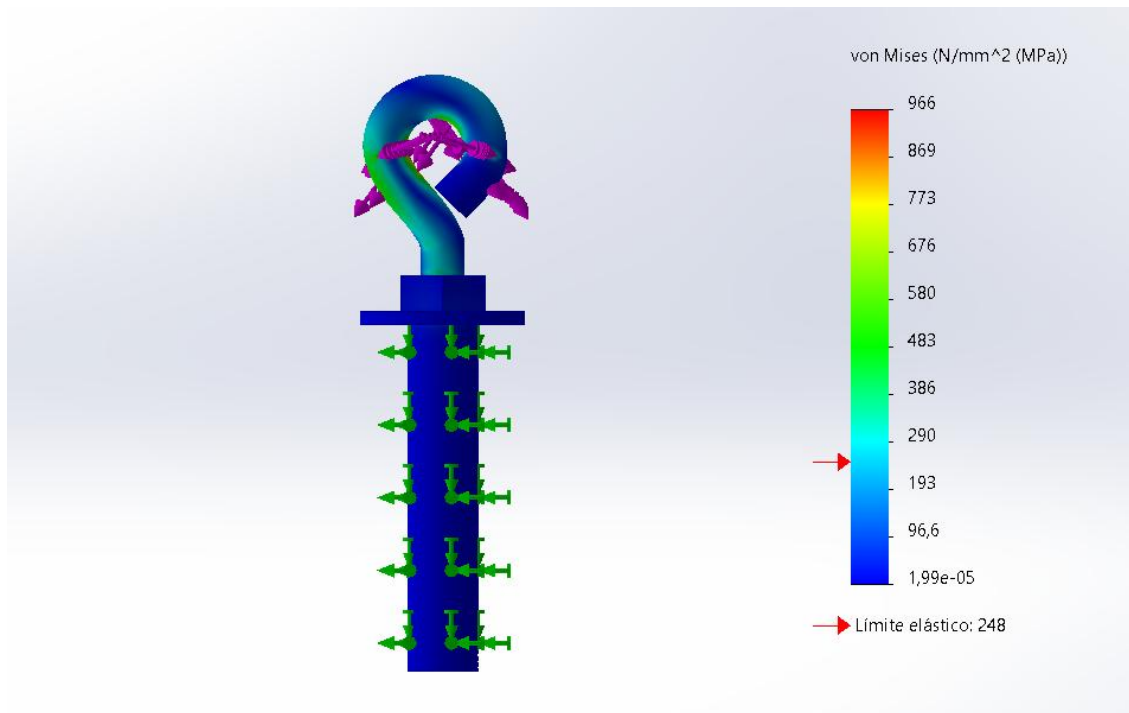


Figura 38. Distribución de tensiones equivalentes de Von Mises obtenida mediante el análisis por elementos finitos del nodo tipo cáncamo.

Consideraciones finales del diseño

El proceso de modelado geométrico y el análisis numérico realizado mediante SolidWorks Simulation permiten extraer conclusiones claras sobre la idoneidad del nodo tipo cáncamo como solución de unión en estructuras tensegríticas. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el diseño propuesto presenta un comportamiento estructural global adecuado, incluso bajo hipótesis de carga conservadoras.

El análisis confirma que se trata de un nodo que ofrece una capacidad resistente suficiente frente a las solicitaciones impuestas, manteniendo un comportamiento estable y sin mecanismos de fallo prematuro. Aunque aparecen concentraciones locales de tensión en zonas puntuales del ojal, estas se limitan a regiones muy reducidas y no comprometen la integridad global del conjunto, lo que resulta coherente con la naturaleza del modelo numérico y con el tipo de aplicación considerada.

Desde el punto de vista funcional, el nodo se comporta como una unión esencialmente articulada, permitiendo que los cables se orienten libremente en función de la geometría y del estado tensional de la estructura. Esta característica es clave en sistemas tensegríticos, donde se busca evitar la transmisión de momentos no deseados a las barras comprimidas.

Además, el uso de componentes comerciales estándar convierte al nodo en una solución económica, fácilmente reproducible y sencilla de montar y desmontar, lo que resulta especialmente ventajoso en entornos experimentales y de laboratorio. La ausencia de mecanizados complejos en la barra contribuye, además, a preservar su capacidad resistente y a reducir la variabilidad asociada al proceso de fabricación.

En conjunto, la simplicidad del diseño no supone una limitación, sino una ventaja clara, ya que permite centrar el análisis en el comportamiento mecánico real de la estructura y en la interacción entre cables, barras y nodos, sin introducir complejidades innecesarias. Por todo ello, el nodo tipo cáncamo se presenta como una solución especialmente adecuada para prototipos experimentales y como referencia comparativa frente a nodos de fabricación propia desarrollados en este trabajo.

5.2 Nudo pletinas

5.2.1 Modelado geométrico en SolidWorks

Una vez definido el concepto del nudo de pletinas y fabricado el primer prototipo en taller, se procedió a su modelado geométrico en SolidWorks con el objetivo de analizar su comportamiento estructural y compararlo posteriormente con el nudo tipo cáncamo. A diferencia de este último, basado en un elemento comercial, el nudo de pletinas presenta una geometría completamente definida por el propio diseño del trabajo, lo que hace especialmente relevante una correcta representación en el entorno CAD.

El nudo está formado por cuatro pletinas rectangulares de acero, de dimensiones $70 \times 30 \times 3$ mm, que se apilan sobre una varilla central. Cada pletina se modeló de manera individual, reproduciendo tanto su espesor como los dos orificios característicos: uno destinado a la fijación del cable y otro alineado con el eje de la varilla para permitir el apilamiento del conjunto, tal y como se observa en el modelo ensamblado mostrado en la Figura 39.

Un aspecto clave del modelado fue la correcta definición del doblado de las pletinas, ya que la orientación de cada una de ellas condiciona directamente la dirección de los cables. En el modelo se reprodujeron los ángulos reales utilizados en el prototipo físico:

- Dos pletinas con un ángulo de doblado de $35,26^\circ$,
- Dos pletinas con un ángulo de $65,91^\circ$.

Esta diferenciación permite que cada cable trabaje aproximadamente alineado con su dirección real dentro de la estructura tensegrítica, reduciendo desviaciones y esfuerzos secundarios en el nudo.

El ensamblaje completo incluye, además de las pletinas, la varilla central, la tuerca de cierre y una porción representativa de la barra tubular, dentro de la cual se introduce la varilla. Esta aproximación permite estudiar el comportamiento del nudo como un conjunto solidario con la barra, de forma análoga a lo que ocurre en el prototipo real.

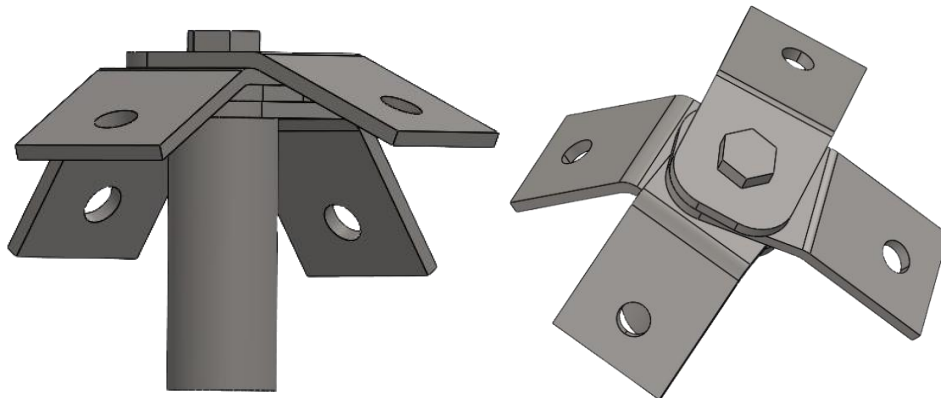


Figura 39. Nudo ensamblado en SolidWorks

5.2.2 Simulación numérica (SolidWorks Simulation)

Con el modelo geométrico completo, se llevó a cabo el análisis estructural del nodo de pletinas mediante SolidWorks Simulation, utilizando el método de los elementos finitos. Al igual que en el caso del nodo tipo cáncamo, el objetivo principal de esta simulación fue evaluar si el diseño propuesto es capaz de soportar las cargas previstas sin alcanzar deformaciones excesivas ni estados de plastificación que comprometan su funcionamiento estructural.

Definición de las cargas y su orientación

Para la aplicación de las cargas se siguió el mismo criterio adoptado en el análisis del nodo tipo cáncamo, con el fin de garantizar la coherencia y comparabilidad entre ambos modelos. En este caso, las fuerzas se aplicaron siguiendo la orientación real de los cables dentro de la estructura tensegrítica, correspondiente a la geometría de un octaedro expandido.

Cada pletina recibe la tracción de un cable de forma individual, reproduciendo así el modo real de trabajo del nodo dentro de la estructura. Esta estrategia de carga permite analizar con mayor detalle cómo se distribuyen los esfuerzos entre las distintas pletinas y cómo responde el conjunto ante sollicitaciones oblicuas y no coplanares. La definición de la geometría fija, así como la orientación y aplicación de las fuerzas consideradas en la simulación, se muestran en la Figura 40.

Este planteamiento resulta especialmente adecuado desde el punto de vista estructural, ya que reproduce con bastante fidelidad la situación real del nodo en servicio y permite identificar posibles concentraciones de tensiones o deformaciones asociadas a la geometría y disposición de las pletinas.

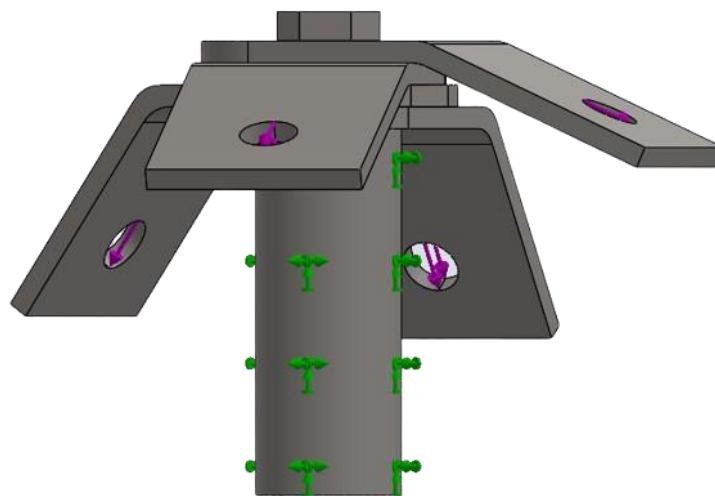


Figura 40. Definición de geometría fija y fuerzas

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definidas en el modelo numérico se establecieron con el objetivo de reproducir de forma realista el comportamiento del nodo de pletinas dentro de la estructura tensegrítica, manteniendo al mismo tiempo un enfoque conservador desde el punto de vista estructural. Las principales hipótesis adoptadas fueron las siguientes:

- La parte representativa de la barra tubular incluida en el modelo se consideró completamente restringida. Esta condición simula la fijación del nodo a la barra y la acción de la tuerca de cierre sobre la varilla central, garantizando que el conjunto trabaja solidariamente con el elemento comprimido, de manera análoga a lo observado en el prototipo físico.
- Las fuerzas se aplicaron en los orificios exteriores de cada pletina, reproduciendo la tracción transmitida por los cables de forma individual. De este modo, cada pletina recibe la carga correspondiente a su cable asociado, permitiendo analizar la respuesta independiente de cada elemento y la distribución de esfuerzos dentro del conjunto del nodo.
- Se empleó un mallado refinado (ver Figura 41) en aquellas zonas donde se preveía una mayor concentración de tensiones, en particular:
 - en los orificios de las pletinas, donde se transmiten directamente las fuerzas de tracción,
 - en las zonas de doblado, sometidas principalmente a esfuerzos combinados de flexión y tracción,
 - y en el contacto entre las pletinas y la varilla central, donde pueden aparecer tensiones de cortante y compresión local.



Figura 41. Mallado empleado en el modelo numérico del nodo de pletinas.

Resultados del análisis numérico

Los resultados obtenidos a partir del análisis por elementos finitos permiten caracterizar con bastante claridad el comportamiento estructural del nodo de pletinas bajo las cargas consideradas. En la Figura 42 se muestra la distribución de tensiones equivalentes de Von Mises para la configuración analizada, donde puede observarse que el estado tensional no es uniforme y presenta concentraciones localizadas en zonas concretas del conjunto.

En particular, los valores máximos de tensión aparecen en el entorno de los orificios de las pletinas por donde se aplica la carga del cable, así como en las zonas próximas a los radios de transición generados durante el doblado de las pletinas. Estas regiones concentran simultáneamente esfuerzos de tracción, flexión y cortante, lo que explica la aparición de picos elevados de tensión en el modelo numérico. En algunos puntos muy localizados, los valores calculados superan el límite elástico del material considerado.

No obstante, es importante señalar que estos máximos se producen en áreas muy reducidas y están fuertemente influenciados por la idealización del modelo numérico. En concreto, la aplicación de la carga de forma concentrada en el contorno del orificio y la ausencia de fenómenos como el deslizamiento real del cable, la redistribución de tensiones o el aplastamiento local del material tienden a amplificar artificialmente las tensiones en el entorno inmediato del punto de aplicación de la fuerza. Este tipo de concentraciones es habitual en modelos de elementos finitos cuando se representan contactos cable-orificio de manera simplificada.

En el resto de la pletina y del conjunto del nodo, los niveles de tensión se mantienen claramente por debajo del límite elástico, mostrando un comportamiento mayoritariamente elástico y estable. La varilla central y la zona de contacto con la barra presentan tensiones reducidas, lo que indica que la carga se transmite principalmente a través de las pletinas, tal y como se pretendía en el diseño.

En conjunto, el análisis numérico reproduce adecuadamente las zonas críticas del nodo y anticipa el modo de respuesta observado posteriormente en los ensayos de laboratorio, confirmando que el diseño trabaja cerca de su límite resistente cuando se alcanzan cargas elevadas, pero sin mostrar mecanismos de colapso inmediato.

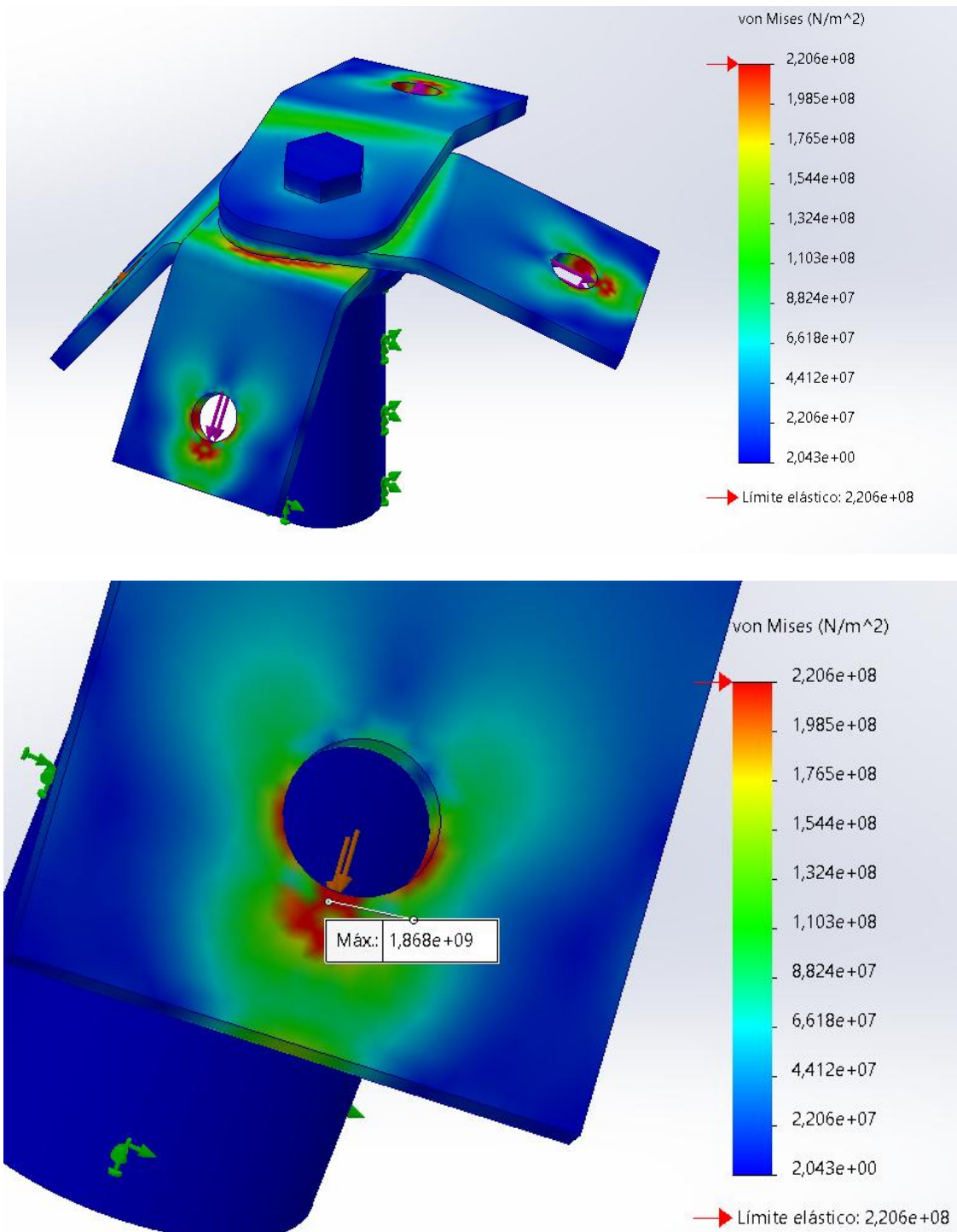


Figura 42. Distribución de tensiones equivalentes de Von Mises obtenida mediante el análisis por elementos finitos del nodo de pletinas.

Consideraciones finales del diseño

El estudio numérico realizado pone de manifiesto que el nodo de pletinas constituye una solución estructural viable dentro del marco experimental de este Trabajo Fin de Grado, siempre que se interpreten correctamente los resultados y se tenga en cuenta la filosofía de diseño adoptada.

La aparición de tensiones elevadas en zonas localizadas no invalida el diseño, sino que señala con claridad cuáles son los puntos críticos del nodo y qué aspectos deben controlarse con mayor cuidado durante la fabricación y el montaje. En este caso, los resultados subrayan la importancia de una correcta ejecución del doblado de las pletinas, así como de un buen acabado en los orificios destinados a la conexión de los cables, ya que pequeñas imperfecciones geométricas pueden incrementar de forma significativa las concentraciones de tensión.

Desde el punto de vista del comportamiento global, el nodo cumple el criterio de diseño fundamental establecido en el trabajo: el elemento que alcanza el fallo es el cable, mientras que el nodo mantiene su integridad estructural. El modelo numérico muestra que, incluso cuando se alcanzan estados tensionales elevados en puntos concretos, el conjunto no presenta un mecanismo de fallo catastrófico, sino una respuesta progresiva dominada por la deformación de las pletinas.

Además, la solución presenta ventajas claras en términos de simplicidad constructiva, flexibilidad geométrica y adaptabilidad a distintas configuraciones de cables. A diferencia de soluciones basadas en componentes comerciales, el nodo de pletinas permite ajustar directamente la orientación de cada cable, lo que resulta especialmente valioso en estructuras tensegríticas donde la geometría juega un papel determinante en el equilibrio interno.

En definitiva, el análisis numérico, junto con los ensayos experimentales realizados posteriormente, confirma que el nodo de pletinas es una solución coherente con los objetivos del trabajo. No se trata de un diseño optimizado para un uso industrial inmediato, sino de un nodo experimental que permite estudiar de forma controlada la interacción entre cables, barras y uniones, aportando información valiosa sobre los mecanismos de transmisión de esfuerzos y los límites estructurales de este tipo de conexiones.

6. Ensayos experimentales

6.1 Ensayos para el nodo cáncamo

Una vez completadas las fases de diseño y análisis numérico de los nodos, se consideró imprescindible contrastar los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales en laboratorio. Aunque las simulaciones permiten anticipar el comportamiento estructural de los nodos bajo distintas solicitaciones, la naturaleza real de una estructura tensegrítica —con tolerancias, imperfecciones geométricas y condiciones de montaje manual— hace necesario validar experimentalmente las hipótesis planteadas.

Estos ensayos no buscan reproducir todas las condiciones posibles de servicio, sino determinar parámetros clave para un uso seguro y controlado del nodo dentro de la estructura.

6.1.1 Descripción

El nodo tipo cáncamo ya ha sido analizado desde el punto de vista geométrico y numérico, asumiendo un comportamiento ideal acorde con su función dentro de la tensegridad. No obstante, su utilización práctica requiere conocer ciertos límites reales asociados al montaje y a posibles situaciones excepcionales de carga.

En particular, se identificaron dos parámetros fundamentales que debían ser evaluados experimentalmente:

- el par de apriete máximo seguro, necesario para garantizar una fijación adecuada del anclaje sin dañar la barra,
- y la capacidad del nodo frente a una tracción directa, aun sabiendo que este no es su modo habitual de trabajo.

Con este objetivo se diseñaron y ejecutaron dos ensayos independientes: un ensayo de par de apriete y un ensayo de extracción del cáncamo.

Ambos ensayos se realizaron en el laboratorio del área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, utilizando equipamiento estándar de taller y de laboratorio mecánico. Las pruebas se llevaron a cabo sobre barras idénticas a las empleadas en la estructura final, de forma que los resultados obtenidos fueran directamente extrapolables al prototipo real.

El enfoque adoptado fue conservador: se buscó identificar valores límite claros, priorizando la seguridad y la repetibilidad frente a la optimización extrema del diseño. Este planteamiento es coherente con la filosofía del trabajo, centrada en la validación experimental de soluciones sencillas y robustas.

6.1.2 Ensayo par de apriete

Objetivo del ensayo

Antes de incorporar el nodo tipo cáncamo a la estructura final, era necesario establecer un par de apriete adecuado. Un apriete insuficiente podría provocar deslizamientos del anclaje bajo carga, mientras que un apriete excesivo podría generar deformaciones permanentes en la barra tubular, comprometiendo tanto su resistencia como su estética.

Por este motivo, se diseñó un ensayo específico para determinar un rango de apriete que garantizase un agarre eficaz sin producir deformaciones excesivas en el tubo.

Descripción del procedimiento experimental

Para la realización del ensayo se utilizaron tres barras de acero de 300 mm de longitud, con las mismas características geométricas que las barras empleadas en la estructura tensegrítica.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. La barra se inmovilizó firmemente en un tornillo de banco, asegurando que no pudiera girar ni desplazarse durante la aplicación del par
2. Se introdujo el cáncamo de expansión en uno de los extremos del tubo.
3. Se aplicó el par de apriete de forma progresiva, en incrementos de 2 Nm, utilizando una llave dinamométrica calibrada (ver Figura 43), lo que permitió controlar con precisión el valor aplicado en cada paso.



Figura 43. Llave dinamométrica utilizada

Tras cada incremento, se midió el diámetro exterior de la zona afectada utilizando un calibre con 0,01 mm de precisión.

Se registró el diámetro medio y su desviación estándar a partir de diez mediciones en cada nivel de par de apriete.

El criterio considerado como límite fue que el incremento de diámetro no superase el 0,5% respecto al valor inicial. A partir de ese punto, la deformación empieza a ser visible a simple vista y se considera excesiva para un nodo operativo.

Los resultados del ensayo se recogen en la Tabla 1, donde se muestra la evolución del diámetro medio del tubo en función del par aplicado, junto con la desviación y el porcentaje de deformación correspondiente.

Par de apriete (Nm)	Media (mm)	Desviación (mm)	% deformación
0	19,94	0,02	
10	19,97	0,02	0,12%
12	20,00	0,01	0,26%
14	20,01	0,01	0,33%
16	20,03	0,02	0,42%
18	20,05	0,02	0,51%
20	20,06	0,02	0,58%
22	20,08	0,02	0,70%
24	20,11	0,03	0,84%
26	20,16	0,03	1,07%

Tabla 1. Resumen ensayo Par de apriete

El análisis de los datos muestra claramente que, a partir de valores próximos a 18–20 Nm, el incremento de diámetro comienza a superar el límite establecido. En concreto, en torno a 20 Nm la deformación ya es apreciable, y a partir de ese valor el ensanchamiento aumenta de forma más acusada.

En base a estos resultados, se adoptó 20 Nm como par de apriete máximo seguro, valor que garantiza una fijación eficaz del anclaje sin producir deformaciones excesivas en la barra.

Este par se utilizó como valor estándar de montaje para todos los nodos tipo cáncamo empleados en la estructura final.

6.1.3 *Ensayo extracción cáncamo*

Aunque el nodo tipo cáncamo está diseñado para trabajar principalmente transmitiendo compresión hacia la barra, se consideró necesario evaluar su comportamiento frente a una tracción directa. Este tipo de sollicitación no es habitual en servicio, pero puede aparecer en situaciones excepcionales.

Un ejemplo claro es el caso de una estructura que actúe como soporte para placas solares. En presencia de viento, pueden generarse fuerzas con una componente capaz de inducir una tracción axial sobre el nodo, con tendencia a “arrancarlo” del interior del tubo en lugar de comprimir la barra.

Para garantizar la seguridad frente a este escenario, se decidió realizar un ensayo de extracción, cuyo objetivo era determinar si el nodo podía resistir, al menos, una fuerza equivalente a la capacidad resistente de los cables empleados en la estructura.

Procedimiento:

- Se empleó una máquina universal de ensayos en modo tracción (ver Figura 44).

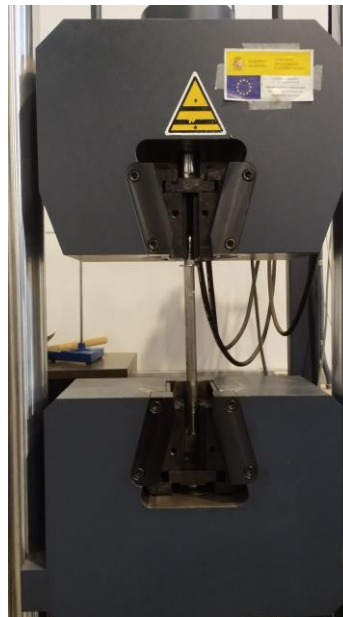


Figura 44. Máquina universal de ensayos del laboratorio de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela de Ingeniería Industrial

- Cada probeta consistía en una barra tubular con el cáncamo ya instalado (ver Figura 45) y apretado al par definido previamente (20 Nm).



Figura 45. Cáncamo instalado en la barra

- La barra se colocó en la máquina de forma que la tracción aplicada fuese axial, alineada con el eje del tubo, como se aprecia en la Figura 46. A continuación, la máquina aplicó una carga creciente mientras se registraban de forma continua los pares carga–desplazamiento.

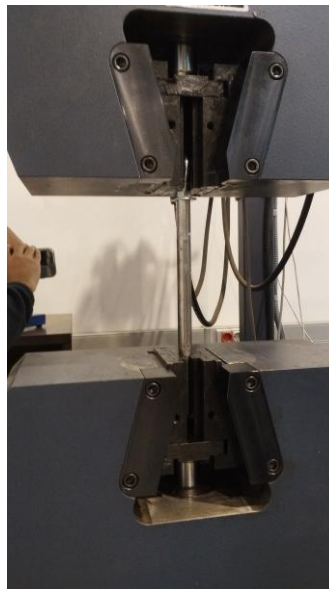


Figura 46. Barra ensayada en la máquina

El valor objetivo del ensayo se fijó en 3500 N, correspondiente aproximadamente a la carga de rotura de los cables utilizados en la estructura. De este modo, se garantizaba que el nodo no fallaría antes que el cable, incluso bajo una sollicitación desfavorable.

Resultados

En todas las probetas, las gráficas fuerza–desplazamiento (ver Figura 47) mostraron un comportamiento estable hasta aproximadamente 3500 N, manteniéndose el nodo sin deslizamiento apreciable.

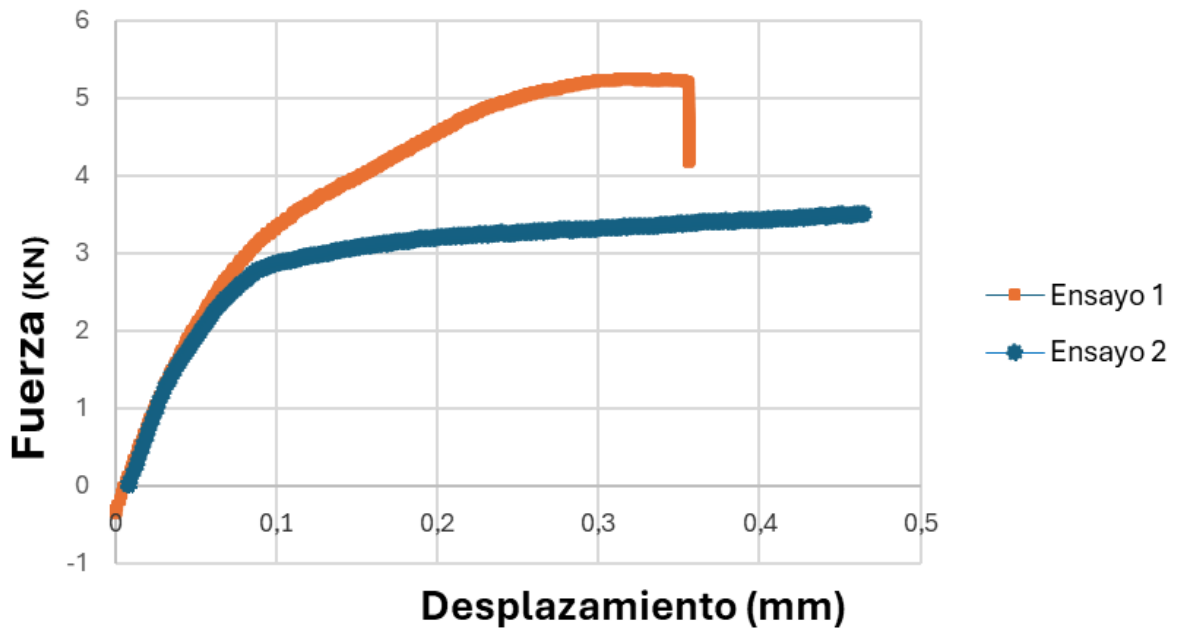


Figura 47. Gráficas fuerza-desplazamiento de los ensayos de extracción realizados

A partir de esta carga, se observó el inicio de un deslizamiento progresivo del cáncamo, asociado a la superación de la fuerza de adherencia o unión entre el anclaje y la barra. Sin embargo, este proceso se produjo de forma gradual, sin rotura brusca ni fallo repentino.

Este tipo de respuesta es especialmente relevante desde el punto de vista de la seguridad estructural, ya que evita fallos catastróficos y permite detectar el problema antes de que se produzca una pérdida completa de capacidad resistente. Tal y como se observa en la Figura 48, tras el ensayo el cáncamo inicia una salida gradual de la barra sin producirse una rotura brusca ni un colapso repentino del conjunto.



Figura 48. Cáncamo y barra tras ensayo

Dado que el nodo fue capaz de soportar una fuerza equivalente a la capacidad resistente de los cables y que la pérdida de agarre se produjo de manera progresiva y no catastrófica, el ensayo se consideró satisfactorio. En consecuencia, el nodo se considera apto para su uso en la estructura tensegrítica, cumpliendo el criterio de diseño establecido de que el fallo del sistema se produzca preferentemente en el cable y no en el propio nodo.

6.2 Ensayos experimentales del nodo de pletinas

Una vez definido el diseño del nodo de pletinas y analizado su funcionamiento esperado, se consideró necesario validar experimentalmente el comportamiento mecánico de este tipo de unión. Dado que se trata de un nodo de fabricación manual, basado en elementos simples de acero conformado, los ensayos permiten comprobar si la solución adoptada es capaz de trabajar de forma segura bajo cargas elevadas y en situaciones desfavorables.

Es importante señalar que, con el objetivo de aislar el comportamiento mecánico del elemento más crítico, los ensayos no se realizaron sobre el conjunto completo de cuatro pletinas, sino sobre una única pletina individual. Esta decisión permite analizar de forma conservadora la respuesta del nodo, ya que cada pletina trabaja de manera independiente transmitiendo la fuerza del cable hacia la barra. De este modo, si una pletina individual es capaz de resistir adecuadamente la carga máxima, el comportamiento del conjunto completo resulta, en principio, favorable.

Se llevaron a cabo dos ensayos distintos:

- un ensayo de tracción, destinado a evaluar la resistencia última de la pletina hasta la rotura del cable,
- y un ensayo de conservación del ángulo, diseñado para comprobar si la pletina mantiene su geometría cuando el cable tira en una dirección desfavorable.

En ambos casos, los ensayos se realizaron utilizando una máquina universal de ensayos, registrándose de manera continua la fuerza aplicada y el desplazamiento correspondiente, hasta provocar la rotura del cable.

6.2.1 Ensayo de tracción de una pletina

Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo fue evaluar la capacidad resistente de una pletina individual sometida a tracción directa, llevándola deliberadamente hasta una situación de fallo. Aunque en la estructura real el nodo de pletinas trabaja repartiendo esfuerzos entre varios cables y varias pletinas, el ensayo de una sola pletina representa una situación conservadora y permite identificar posibles debilidades del diseño.

Además, este ensayo permite verificar que el criterio de diseño se cumple: que el fallo del sistema se produzca por la rotura del cable y no por la plastificación excesiva o rotura de la pletina.

Descripción del montaje experimental

El ensayo se realizó mediante una máquina universal de ensayos, configurada en modo tracción. La pletina se fijó entre las mordazas superior e inferior de la máquina mediante

elementos auxiliares que garantizaban una correcta alineación del cable y evitaban flexiones parásitas.

Cada probeta estaba formada por:

- una pletina rectangular de acero con las dimensiones de diseño ($70 \times 30 \times 3$ mm),
- los orificios, a través los cuales se conectaban los cables,
- y los cables, que transmitían la fuerza aplicada por la máquina.

El esquema del ensayo se muestra en la Figura 49, donde se representa la aplicación de la carga axial sobre la pletina.



Figura 49. Montaje del ensayo de tracción a la pletina

Durante el ensayo, la máquina aplicó una fuerza creciente a velocidad controlada, registrando de forma continua los valores de fuerza y desplazamiento hasta la rotura completa del cable.

Resultados y observaciones

La Figura 50 muestra la curva fuerza–desplazamiento obtenida durante el ensayo de tracción de la pletina. En ella se aprecia un comportamiento claramente progresivo del conjunto pletina–cable a lo largo de todo el ensayo.

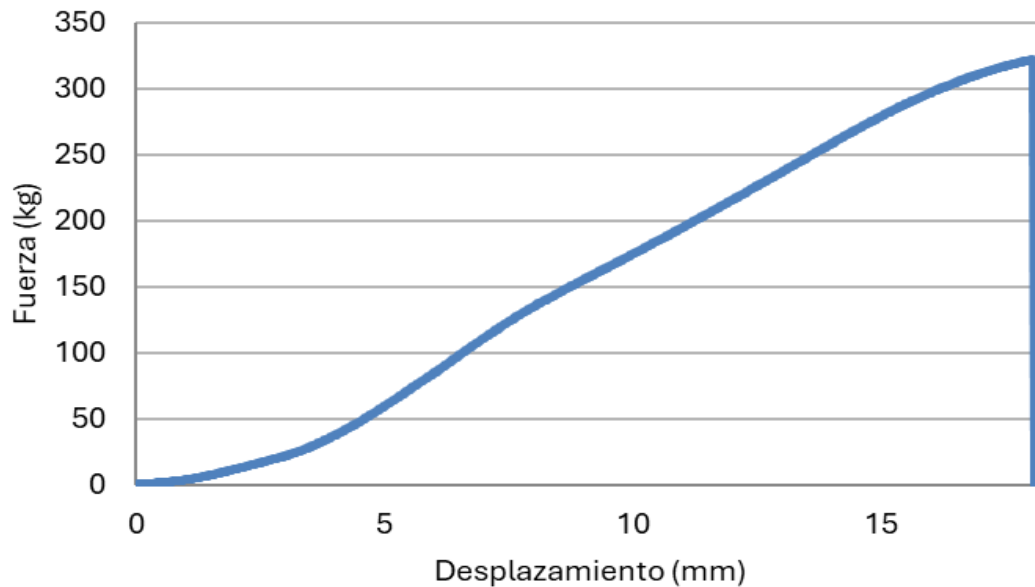


Figura 50. Gráfica fuerza- desplazamiento ensayo tracción pletina

En una primera etapa, correspondiente a desplazamientos reducidos, la curva presenta una pendiente moderada y prácticamente constante. Esta zona puede asociarse a un comportamiento mayoritariamente elástico del sistema, donde tanto el cable como la pletina trabajan sin deformaciones apreciables y la rigidez global se mantiene estable.

A medida que aumenta el desplazamiento, la pendiente de la curva se incrementa de forma gradual, lo que indica una redistribución interna de esfuerzos y una movilización progresiva del cable. Durante esta fase intermedia no se observa ningún cambio brusco en la respuesta mecánica ni pérdidas repentinas de rigidez, lo que sugiere que la pletina continúa trabajando de manera adecuada, sin plastificación localizada ni inestabilidades.

Finalmente, el ensayo alcanza una carga máxima próxima a 330 kg, tras la cual se produce una caída súbita de la fuerza registrada. Este descenso abrupto corresponde a la rotura del cable, que marca el final del ensayo. Es importante destacar que dicha rotura se produce sin que la gráfica muestre indicios previos de fallo estructural de la pletina, lo que confirma que el elemento metálico no es el punto débil del conjunto.

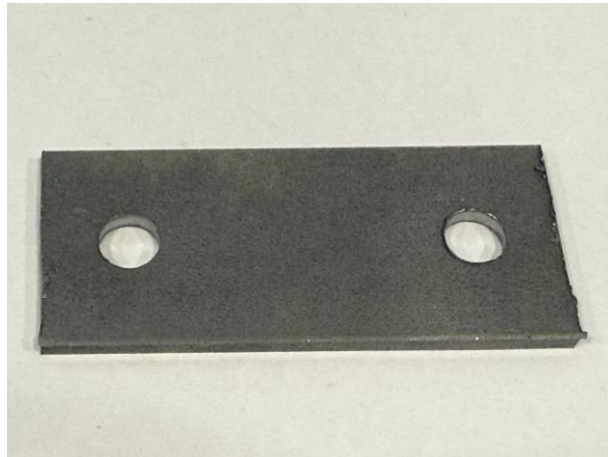


Figura 51. Pletina utilizada en el ensayo de tracción

Tras el ensayo, la inspección visual de la pletina no reveló roturas ni deformaciones severas (ver Figura 51), más allá de posibles deformaciones elásticas recuperables. Este comportamiento confirma que, incluso ensayando una única pletina de forma aislada y llevándola hasta la rotura del cable, el diseño cumple con el criterio estructural adoptado: el fallo del sistema se produce por agotamiento del cable y no por la pletina.

En consecuencia, el ensayo de tracción valida experimentalmente el diseño del nodo de pletinas desde el punto de vista resistente, demostrando que la solución propuesta es capaz de soportar cargas elevadas sin comprometer la integridad del elemento metálico que constituye la unión.

6.2.2 Ensayo de conservación del ángulo de la pletina

Objetivo del ensayo

El objetivo de este ensayo fue evaluar el comportamiento geométrico de una pletina individual cuando el cable aplica una fuerza cuya dirección no coincide con la orientación ideal de diseño, generando así un momento flector significativo sobre la pletina. Este escenario representa un caso claramente desfavorable, pero posible, en el que la dirección del cable se ve alterada por tolerancias geométricas, deformaciones globales de la estructura o situaciones excepcionales de carga.

A diferencia del ensayo de tracción, en este caso no se pretendía únicamente comprobar la capacidad resistente del elemento, sino analizar hasta qué punto la pletina es capaz de conservar su ángulo inicial y cómo evoluciona su deformación a medida que aumenta la carga aplicada.

Descripción del montaje experimental

Al igual que en el ensayo anterior, se utilizó una máquina universal de ensayos configurada en modo tracción. En este caso, la pletina se colocó de manera que el cable tirase formando el ángulo más desfavorable respecto al plano de la pletina.

El montaje experimental fue el siguiente (ver Figura 52), donde se aprecia claramente la dirección de la fuerza aplicada y el ángulo inicial de la pletina.



Figura 52. Montaje del ensayo de conservación del ángulo de la pletina

Durante el ensayo, la fuerza se incrementó progresivamente, registrándose de manera continua los valores de fuerza y desplazamiento. El ensayo se prolongó hasta alcanzar valores elevados de carga, sin llegar en ningún caso a la rotura del cable, salvo en el último ensayo de la pletina a $35,26^\circ$, que sí se quiso llegar hasta la rotura de este (ver Figura 55).



Figura 53. Pletina 35.26° (a) y pletina 65.91° (b) durante ensayo

Resultados y análisis

Las curvas fuerza–desplazamiento obtenidas, mostradas en la Figura 54 y Figura 55, evidencian un comportamiento claramente no lineal del sistema a partir de determinados niveles de carga. Tras una primera fase con respuesta aproximadamente elástica, la pendiente de la curva disminuye progresivamente, indicando la aparición de deformaciones significativas en la pletina.

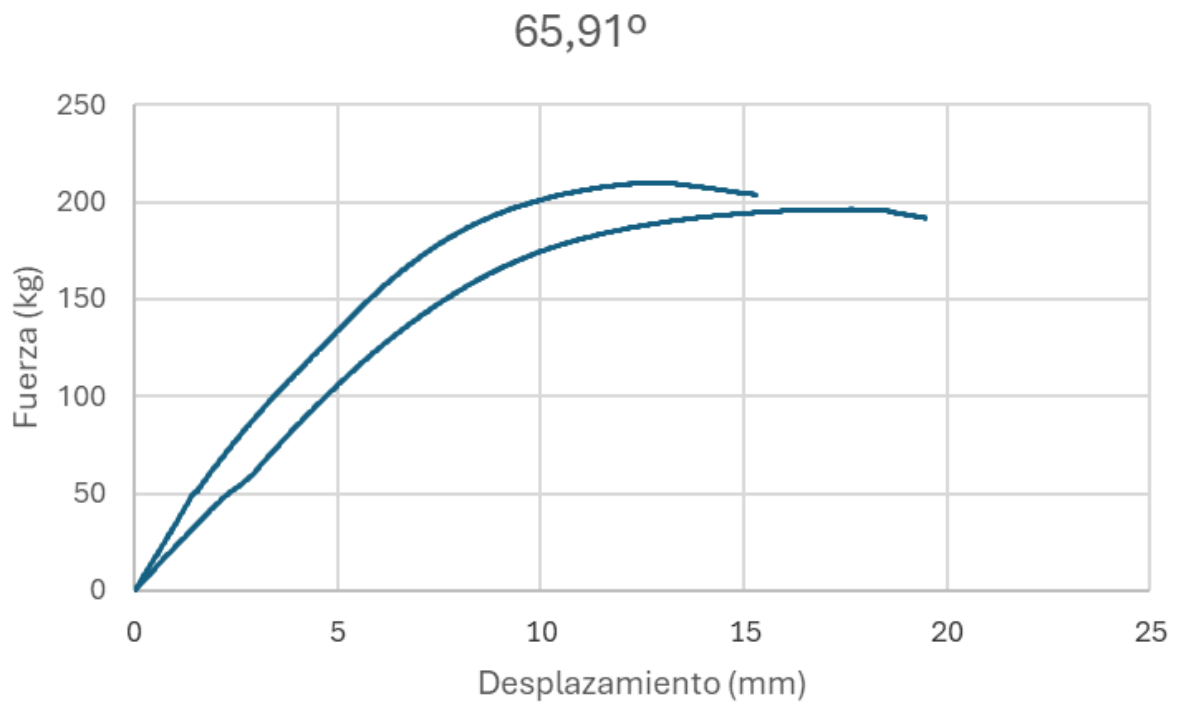


Figura 54. Gráfica Fuerza-Desplazamiento ensayo pletina 65.91°

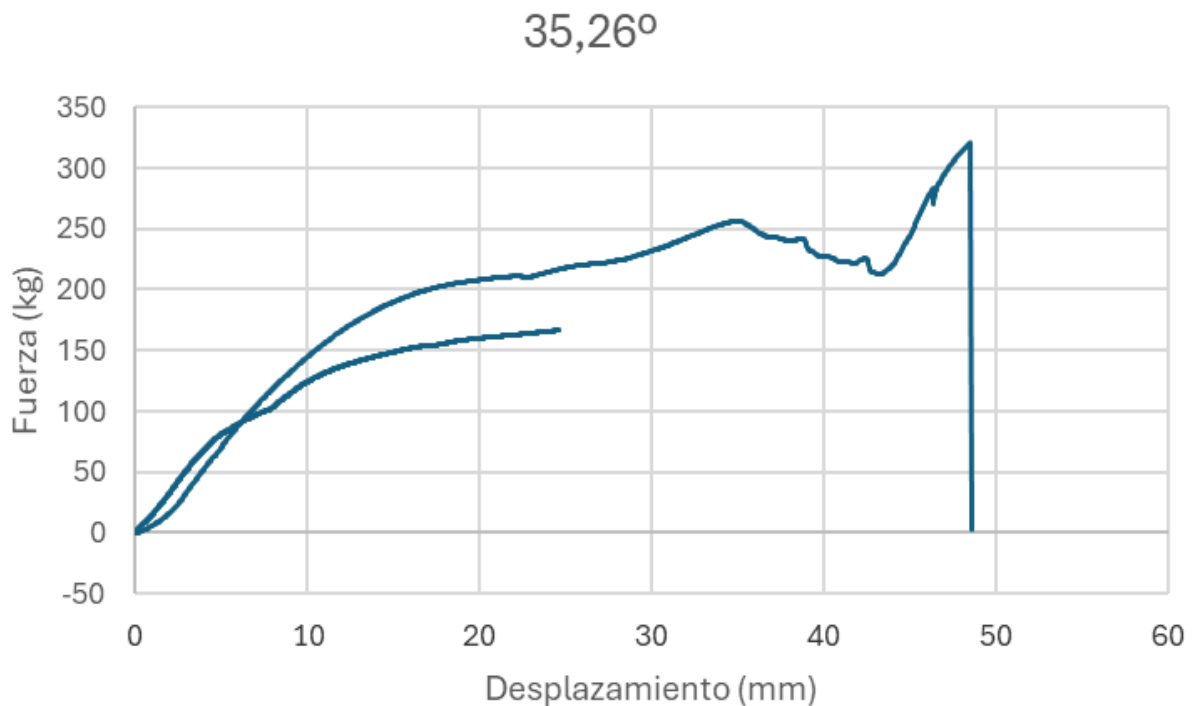


Figura 55. Gráfica Fuerza-Desplazamiento ensayo pletina 35.26°

A diferencia del ensayo de tracción, en este caso se aprecia de forma clara que la pletina comienza a doblarse de manera apreciable a medida que aumenta la carga. Esta deformación es consecuencia directa del momento flector inducido por la dirección desfavorable del cable y se produce antes de alcanzar la carga última de rotura del cable.

Es importante destacar que, aunque la deformación es notable, el comportamiento del sistema se mantiene estable y progresivo, sin fallos bruscos ni pérdida repentina de capacidad portante. La pletina continúa soportando el incremento de carga, acumulando deformación de manera gradual.

Inspección final de la pletina

Tras finalizar el ensayo, se realizó una inspección visual detallada de la pletina ensayada. En la Figura 56 se observa el estado final del elemento, donde se aprecia claramente la deformación angular permanente producida durante el ensayo.

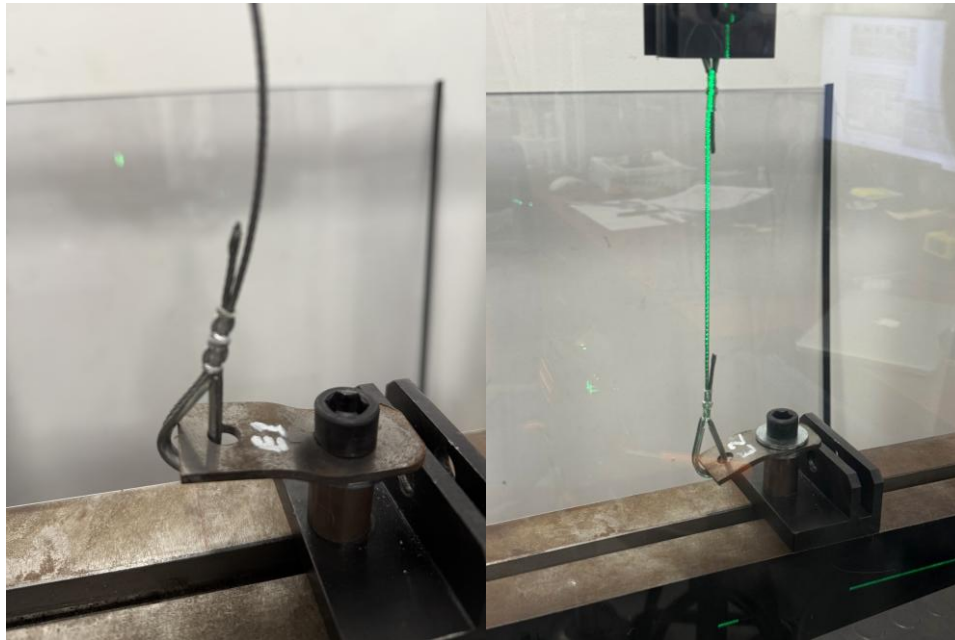


Figura 56. Pletina 35.26° (a) y pletina 65.91° (b) tras ensayo

No se detectaron roturas ni fisuras en el material, ni en la zona del orificio ni en el cuerpo de la pletina. La deformación observada corresponde principalmente a un doblado plástico localizado, coherente con el tipo de sollicitación aplicada.

6.2.3 Valoración global de los ensayos del nodo de pletinas

A la vista de los resultados obtenidos en ambos ensayos, puede afirmarse que el nodo de pletinas presenta un comportamiento mecánico satisfactorio. Incluso considerando una única pletina y situaciones de carga muy exigentes, el fallo del sistema se produce siempre por la rotura del cable, cumpliendo así el criterio de diseño establecido.

La deformación observada en el ensayo de conservación del ángulo es limitada y aparece únicamente bajo cargas máximas, lo que resulta aceptable desde el punto de vista estructural. En condiciones reales de servicio, donde las cargas son inferiores y se reparte el esfuerzo entre varias pletinas, este efecto será previsiblemente menor.

En conjunto, los ensayos confirman que el nodo de pletinas es una solución viable, robusta y coherente con los requisitos de una estructura tensegrítica experimental, validando su empleo en la estructura construida en laboratorio.

7. Análisis de datos

En este apartado se analizan de forma conjunta los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, tanto desde el punto de vista numérico como experimental. El objetivo no es únicamente presentar valores o gráficas, sino interpretar el comportamiento real de los nodos, comprobar si se cumplen los criterios de diseño establecidos y extraer conclusiones coherentes sobre su idoneidad dentro de una estructura tensegrítica.

Conviene recordar que el planteamiento general del Trabajo Fin de Grado no persigue optimizar una estructura completa, sino evaluar el comportamiento mecánico de distintos tipos de nodos, entendidos como elementos clave en la transmisión de esfuerzos entre barras y cables. Por tanto, el análisis se centra en verificar si los nodos diseñados cumplen su función estructural sin convertirse en el punto débil del sistema.

7.1 Relación entre criterios de diseño y resultados obtenidos

Desde las primeras fases del trabajo se estableció un criterio de diseño claro: el nodo debía presentar una capacidad resistente superior a la de los elementos que conecta, de manera que, ante una sobrecarga, el fallo se produjera preferentemente en el cable o, en su caso, en la barra, pero no en el nodo.

Los valores de referencia obtenidos en los ensayos previos de los elementos estructurales fueron:

carga crítica de pandeo de la barra: 7,203 kN,

carga última de rotura del cable: 3,171 kN.

Estos valores marcaron el umbral mínimo que los nodos debían ser capaces de soportar sin deformaciones plásticas apreciables ni pérdida de funcionalidad. A la luz de los resultados experimentales obtenidos, puede afirmarse que este criterio se ha cumplido de forma satisfactoria en los nodos analizados.

7.2 Comparación entre simulación numérica y comportamiento experimental (nodo cáncamo)

En el caso del nodo tipo cáncamo, el análisis numérico realizado mediante SolidWorks Simulation permitió identificar las zonas potencialmente críticas del diseño, especialmente en el entorno de la rosca, el contacto con el anclaje de expansión y el ojal del cáncamo. Las simulaciones mostraron niveles de tensión claramente inferiores al límite elástico del material, incluso bajo cargas equivalentes o superiores a la capacidad resistente del cable.

Los ensayos experimentales realizados en laboratorio corroboran estas predicciones. En el ensayo de par de apriete, se observó que el límite operativo venía impuesto por la deformación del tubo, y no por el fallo del cáncamo. El valor de 20 Nm adoptado como par estándar se sitúa en una zona segura, donde el anclaje es efectivo pero sin inducir deformaciones excesivas en la barra.

Por su parte, el ensayo de extracción mostró que el nodo es capaz de resistir cargas del orden de 3500 N sin deslizamientos apreciables, superando así la resistencia del cable. Además, el modo de fallo observado fue progresivo, con una salida gradual del cáncamo, lo que resulta especialmente positivo desde el punto de vista de la seguridad estructural.

En conjunto, los resultados experimentales validan el modelo numérico y confirman que la simulación constituye una herramienta adecuada para prever el comportamiento del nodo antes de su fabricación y ensayo.

7.3 Análisis de los resultados del nodo de pletinas

El nodo de pletinas presenta una filosofía de diseño diferente, al tratarse de una solución de fabricación manual y basada en elementos simples. Aun así, los ensayos realizados permiten extraer conclusiones claras sobre su comportamiento.

En el ensayo de tracción, llevado hasta la rotura del cable, las curvas fuerza–desplazamiento muestran una respuesta progresiva y estable. La ausencia de saltos bruscos o pérdidas repentinas de rigidez indica que la pletina trabaja de forma adecuada durante todo el rango de carga. El hecho de que la rotura se produzca sistemáticamente en el cable confirma que, incluso ensayando una sola pletina de manera conservadora, el diseño cumple con el criterio resistente establecido.

En el ensayo de conservación del ángulo, se analizó un escenario especialmente desfavorable, aplicando la carga en una dirección que favorece la flexión de la pletina. En este caso, sí se apreciaron deformaciones, pero estas resultaron limitadas y progresivas, incluso cuando el ensayo se llevó hasta la rotura del cable. Este comportamiento es coherente con lo esperado: la pletina no está diseñada para ser completamente rígida, sino para admitir cierto grado de deformación sin comprometer su funcionalidad.

El hecho de que la deformación observada sea reducida, a pesar de trabajar en condiciones extremas, permite concluir que el nodo presenta un comportamiento estructural aceptable y robusto dentro del contexto experimental del trabajo.

7.4 Comparación cualitativa entre los nodos analizados

Desde un punto de vista comparativo, los resultados permiten extraer diferencias claras entre las soluciones estudiadas. El nodo tipo cáncamo destaca por su simplicidad, repetibilidad y buen comportamiento tanto numérico como experimental, siendo especialmente adecuado para prototipos y estructuras donde se busca un montaje rápido y fiable.

El nodo de pletinas, por su parte, ofrece una mayor libertad geométrica y una adaptación más directa a las direcciones reales de los cables, a costa de un proceso de fabricación más artesanal. Sus ensayos muestran que, aun siendo una solución sencilla, cumple con los requisitos estructurales y no introduce modos de fallo no deseados.

En ambos casos, el análisis de datos pone de manifiesto que el diseño del nodo no puede abordarse únicamente desde una perspectiva resistente, sino que debe tener en cuenta aspectos como la articulación, la facilidad de montaje y el comportamiento bajo cargas no ideales.

7.5 Limitaciones del análisis y alcance de los resultados

Es importante señalar que los ensayos realizados se han centrado en configuraciones específicas y en un número limitado de probetas, lo cual es habitual en el contexto de un Trabajo Fin de Grado. Por tanto, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro de este marco y no como una caracterización exhaustiva de los nodos.

No obstante, la coherencia entre simulaciones y ensayos, así como la repetibilidad de los modos de fallo observados, permiten extraer conclusiones sólidas sobre la validez de los diseños propuestos y su comportamiento mecánico.

8. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido abordar el estudio de estructuras tensegríticas desde un enfoque eminentemente práctico, centrando la atención en uno de sus elementos más críticos y, a menudo, menos estudiados: los nodos estructurales. A lo largo del trabajo se ha puesto de manifiesto que el comportamiento global de una tensegridad no depende únicamente de su geometría o del pretensado de los cables, sino también —y de forma decisiva— de la fiabilidad y el diseño de sus uniones.

Partiendo de una revisión del estado del arte, se ha contextualizado el papel que desempeñan los nodos dentro de este tipo de estructuras, así como la diversidad de soluciones existentes en la literatura científica y en prototipos experimentales. Esta revisión ha servido de base para definir criterios de diseño claros, coherentes con la filosofía de la tensegridad y con las exigencias prácticas de una estructura real.

En este marco, se han diseñado y analizado distintos tipos de nodos, combinando el uso de herramientas de modelado y simulación numérica con ensayos experimentales realizados en laboratorio. El nodo tipo cáncamo, basado en elementos comerciales, ha demostrado un comportamiento mecánico robusto, tanto en simulación como en ensayo, cumpliendo el criterio fundamental de no fallar antes que los cables o las barras a los que se conecta. Asimismo, los ensayos realizados han permitido definir parámetros de montaje seguros, como el par de apriete adecuado, y evaluar su respuesta frente a acciones no habituales, como la tracción directa.

Por su parte, el nodo de pletinas, concebido como una solución de fabricación manual, ha mostrado que es posible obtener un comportamiento estructural satisfactorio mediante diseños sencillos, siempre que se respeten los criterios geométricos y resistentes adecuados. Los ensayos realizados hasta la rotura del cable han confirmado que, incluso en configuraciones conservadoras y desfavorables, el nodo no se convierte en el elemento crítico del sistema.

El análisis conjunto de los resultados pone de relieve la importancia de combinar simulación y experimentación. Mientras que el modelo numérico permite anticipar zonas críticas y validar decisiones de diseño, el ensayo experimental aporta una comprensión realista del comportamiento del conjunto, incluyendo efectos difíciles de modelar como holguras, contactos o deformaciones locales.

Finalmente, la propuesta de un nodo adicional para la conexión de dos barras, desarrollada como extensión del trabajo, demuestra la flexibilidad del enfoque adoptado y abre la puerta a futuras líneas de investigación. Aunque esta solución no ha sido ensayada experimentalmente, su diseño y modelado constituyen una base sólida para estudios posteriores.



En conjunto, este Trabajo Fin de Grado ha permitido adquirir una visión integrada del diseño, análisis y validación de nodos para estructuras tensegríticas, reforzando la idea de que el éxito de estas estructuras no reside únicamente en sus principios teóricos, sino en la correcta materialización de sus elementos constructivos. Los resultados obtenidos confirman que un diseño cuidadoso de los nodos es esencial para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de una tensegridad real, y subrayan la relevancia de seguir investigando en este ámbito.

9. Bibliografía

- [1] EADIC – Escuela Abierta de Desarrollo en Ingeniería y Construcción. (2014, 11 de marzo). *Estructura tensegrity: qué es y cómo funciona*.
<https://www.eadic.com/estructura-tensegrity/>
- [2] Godzala, M. (2011, 29 de octubre). *Hirshhorn* [Fotografía]. WordPress.
<https://mgodzala.wordpress.com/2011/10/29/hirshhorn/dscn3974/>
- [3] Yorokobu. (s.f.). *Richard Buckminster Fuller: Ideas que cambiaron el mundo*.
<https://www.yorokobu.es/richard-buckminster-fuller/>
- [4] ArchDaily. (s.f.). *Tensoestructuras: cómo funcionan y qué tipos existen*.
<https://www.archdaily.cl/cl/789312/tensoestructuras-como-funcionan-y-que-tipos-existen>
- [5] Pinterest. (s.f.). *Tensegrity structures*.
<https://www.pinterest.es/search/pins/?q=tensegrity%20structure>
- [6] Fuller, R. B. (1962). *Tensile-integrity structures*. U.S. Patent No. 3,063,521.
<https://patents.google.com/patent/US3063521A>
- [7] ScienceAlert. (s.f.). *NASA's Super Ball Bot: A tensegrity robot concept*.
<https://www.sciencealert.com/nasa-s-super-ball-bot-is-a-robot-that-can-roll-bounce-and-survive-impacts>
- [8] Orden, D. (s.f.). *Tensegridades: arte en equilibrio*. Universidad de Alcalá.
<https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/3789>
- [9] Animal Osteopathy College. (s.f.). *Tensegrity in animal osteopathy*.
<https://animalosteopathycollege.com/tensegrity/>
- [10] EstructuraTec. (2016). *Tensegrity: principios básicos y aplicaciones estructurales*. EstructuraTec.
<https://estructuratec.com/tensegrity/>
- [11] InTension Designs. (s.f.). *New approaches to mechanizing tensegrity structures*.
<https://www.intensiondesigns.com/>
- [12] ResearchGate. (s.f.). *Spherical tensegrity structure with intermediate filaments*.
https://www.researchgate.net/figure/Spherical-tensegrity-structure-with-intermediate-filaments_fig1_221920159

- [13] Tensegrity Wiki. (s.f.). *Cube (tensegrity structure)*. Tensegrity Wiki.
<https://tensegritywiki.com/wiki/Cube>
- [14] J. Feron, L. Rhode-Barbarigos, P. Latteur, Experimental testing of a tensegrity simplex: self-stress implementation and static loading, *J. Struct. Eng.* 149 (2023).
doi:10.1061/JSENDH.STENG-11517.
- [15] N. Hagiwara, Y. Fujishiro, Experimental and numerical analysis of a novel structure obtained by joining two tensegrity-based units using simple construction methods, *Int. J. Sp. Struct.* 39 (2024) 157–171. doi:10.1177/09560599241267780.
- [16] Fernández Ruiz, M. A. (2025). *Diseño de nodos articulados de estructuras tensegríticas*. Proyecto TENSOLUTION, Universidad de Málaga.
(Documento interno no publicado)
- [17] S. Lee, J. Jeong, S. Ahn, Q.X. Lieu, J. Lee, Performance of quadruplex module tensegrities using new pin-jointed connections, *J. Constr. Steel Res.* 172 (2020) 105763.
doi:10.1016/j.jcsr.2019.105763.
- [18] Hernández, E., Becerro, R., & Festas, P. (2019). Octahedral tensegrity structures: Geometry, equilibrium and applications. En *Proceedings of the COMMoST 2019 Conference*.
<https://www.researchgate.net/publication/338602459>
- [19] DAMESA. (s.f.). *Anclaje de expansión con cáncamo*.
<https://www.damesa.com/anclaje-expansion-cancamo>
- [20] Fuller, R. B. (1961). *Tensile-integrity structures*. U.S. Patent No. 3,063,521.
<https://patents.google.com/patent/US3063521A>
- [21] Wikipedia. (s.f.). *Tensegrity*. Wikipedia, la enciclopedia libre.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Tensegridad>
- [22] Torné, L. (2008). *Tensegridad*. Revista IPP, Universidad de Barcelona.
<https://revistes.ub.edu/index.php/ipp/article/view/11894>
- [23] Fernández-Ruiz, M. A., Huerta-Gómez-Merodio, M., López-Jiménez, P., & Carbonell-Márquez, J. F. (2025). *Design and construction of a prototype tensegrity structure with integrated pretensioning and instrumentation features*. **Buildings**, 15(24), 4506.
<https://doi.org/10.3390/buildings15244506>
- [24] Gómez Jáuregui, V. (2007). *Tensegridad: estructuras tensegríticas en ciencia y arte*. Universidad de Cantabria.
<https://www.researchgate.net/publication/287487548>



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Diseño y comportamiento mecánico
de nodos articulados para estructuras tensegríticas
Francisco José García Moreno



ANEXOS



ÍNDICE

ANEXO A: Fichas materiales

- Ficha técnica de barras
- Ficha técnica de pletinas
- Ficha comercial cables
- Ficha comercial cáncamo

ANEXO B: Planos

- Plano cáncamo
- Plano pletinas
- Plano nodo dos barras



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Diseño y comportamiento mecánico
de nodos articulados para estructuras tensegríticas
Francisco José García Moreno



ANEXO A

Cliente/Customer: ACEROS MULHACEN, S.L.

 CAMINO DEL JAU, 50
18320 SANTA FE

Fecha/Date: 07.03.2025 N° Albarán/Delivery: 80371283

CERTIFICADO DE ENSAYOS QUÍMICOS Y PRUEBAS MECÁNICAS
CERTIFICATE OF CHEMICAL TESTS AND MECHANICAL TESTS
 Testificación de Inspección 2.2 según Norma EN 10.204
 QUALITY CERTIFICATE 2.2. EN 10.204

IDENTIFICACIÓN PRODUCTO IDENTIFIES PRODUCTS					COMPOSICIÓN QUÍMICA % DE: Chemical Analysis (%)						ENSAYOS MECÁNICOS Mechanical Property			REC.	RUC
Producto Product	Bobina Coil	Colada Heat Number	Calidad Steel Grade	Norma Standar	C	P	S	Si	Mn	Al	Re	Rm	Alarg.		
T G 50x30 1,5 6 E195/S4 Z140 GN	2434110000	24C002378	E195/S4	EN 10305-5	50	16	3	20	160	26	413	443	27	Z140	OK
T G 80x40 2 6 E195/S4 Z180 GN	2502760000	24400701		EN 10305-5	51	15	6	15	435	44	373	450	27	Z180	OK
T D 50x30 1,5 6 E195/S2 GN	2421920000	A026205		EN 10305-5	57	10	8	16	171	45	260	339	39	SR	OK
T D 20x0 1,5 6 E195/S2 GN	2441240000	730417753		EN 10305-3	79	14	6	12	742	35	383	408	40	SR	OK
T D 60x40 1,5 6 E195/S2 GN	2431690000	1240894		EN 10305-5	55	9	2	13	420	48	330	370	40	SR	OK
T D 60x40 1,5 6 E195/S2 GN	2431790000	F6908		EN 10305-5	150	14	6	10	390	1	330	370	40	SR	OK

Notas/Notes :

Dimensiones en mm./Dimensions in mm.

C, Si, Cr, Ni, Cu, Mn, N, Al, P, S y B Milésimas./C, Si, Mn, Al, P, S thousandths.

 L. Elástico (Re) y Carga de Rotura (Rm) en MPa (N/mm²)./Yerd and Tensile in MPa (N/mm²).

Alargamiento en %./Elongation %.

Rug. - Rugosidad/Rugosity

Rec. - Recubrimiento

ALFONSO GALLARDO, S.A.

Ctra. Badajoz, 32

Telfs. 924 75 90 00 (25 líneas)

Fax. 924 76 00 10

05200 JEREZ DE LOS CABALLEROS (Badajoz)

D.I.B. S. - 000000000



POR CONTROL DE CALIDAD /

BY QUALITY CONTROL



 ESTE DOCUMENTO CARECE DE VALIDEZ SI NO FIGURAN EN EL,
SELLO Y FIRMA ORIGINALES.

THIS DOCUMENT TACKS ORIGINAL VALIDITY IF THEY DO NO

CERTIFICATO DI COLLAUDO INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICATE DE RECEPTION ABNAHMEPRÜFZEUGNIS B*

Acciai Speciali Terni S.p.A.
Viale B. Bim, 218 - 05100 Terni - Italia
AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE CERTIFICATO SECONDO ISO 9001

AVV. DI SPEDIZ. N°: 0180891199 ORDINE CLIENTE N°: **MR. 33 - MARZO**
SHIPPING NOTICE N°
AVIS D'EXPEDITION N°
VERSANDANZEIGE N°

PRODOTTO: STAINLESS STEEL COILS
PRODUCT
PRÜFGEGENSTAND

ORDINE INTERNO N°: 8X250287 CERTIFICATO N°: **02357929** CARICON N°: **0010106083**
INTERNAL ORDER N°
COMMANDE INT. N°
WERKS N°

CIENTE: S.I.P.I. S.p.A.
CUSTOMER **VIA PARADIGNA 97**
CLIENT: **PARMA**
BESTELLER: **43122 - PR - Italia**

DESTINATARIO: OLKI ACCIAI IMOSSIDABILI SPA
SHIP TO PARTY: **VIA PARADIGNA 95/A 95/A**
CLIENT LIVRE: **PARMA**
WARENEMPFANGER: **43122 - PR - Italia**

COMPOSIZIONE CHIMICA / CHEMICAL COMPOSITION / CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG													
N° ROTOLO COIL N° N° BOBINE BAND N°	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% N	% Ti	CU %	%	%
662312	0,025	1,710	0,360	0,031	0,001	18,06	8,050	0,420	0,067		0,440		

SPECIFICA, SPECIFICATION, ANFORDERUNGEN	TIPO D'ACCIAIO, STEEL TYPE, TYPE D'ACIER, MARKENBEZEICHNUNG
EN 10088-2 EN 10088-4 AD2000W2/W10 EN 10028-7 ASTM A 240 ASME SA 240-21 ASTM A/ASME SA 480 AST	1.4307 1.4307/1.4301 1.4307/1.4301 304L/304 304DI

TRATT. TERMICO - RICOTTURA DI SOLUBILIZZAZIONE A 1050°C. ARIA. ACCIAI INDESSIDABILI.
THERM. TREATMENT - HYPERTEMPERATURE ANNEALING AT 1050°C. AIR. STAINLESS STEEL.
WÄRMEBEHANDLUNG - ABSCHRECKEN "CALUTT" - SPRÜHWASSER - WASSER

PROCESSO DI ELABORAZIONE: F + A00 + CC
MANUFACTURING PROCESS - F + A00 + CC
PROCEDE DE L'ELABORATION
ERSCHMELZUNGSART

**IL MATERIALE È RESISTENTE ALLA CORROSIONE INTERGRANULARE SECONDO:
LE MATERIEL EST RESISTANT A LA CORROSION INTERGRANULAIRE SELON:
DAS MATERIAL IST BESTÄNDIG GEGEN INTERKRISTALLINE KORROSION DEIMASS:**

**EN ISO 3651-2
ASTM A262 E**

N° COLLO PACKAGE N° N° COLIS KISTEN N°	N° ROTOLO COIL N° N° BOBINE BAND N°	DIMENSIONI DIMENSIONS ABMESSUNGEN mm	N° PEZZI PIECES STÜCKZAHL	FINITURA FINISH FINITION AUSFUHRG	PESO WEIGHT POIDS GEWICHT Kg.	TRAZIONE / TENSILE / TRACTION / ZUGVERSUCH ACCORDING TO EN 6892-1				DUREZZA HARDNESS DURETE HARTE	PIEGA BEND PLIAGE FALTVERSUCH	GRANO GRAIN KORN (size)
						RP 0.2%	RP 1%	Rm	A %			
						N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%			
C0817942	662312	3.00X1520.0	1	2E-	26.430	≥ 220	≥ 250	520-700	≥ 40	≥ 45	92	S
C0817942						333	385	655	44,6	47,1	88,0	86,0

**CERTIFICATO EMESSO AUTOMATICAMENTE
COMPLIES WITH ED 2000/53/EC
THE MATERIAL MEETS THE HARDNESS REQUIREMENTS OF NACE MR0175/MR0103 EN ISO 15156-3
MATERIAL IDENTIFICATION CHECK, SURFACE QUALITY AND DIMENSIONS = OK
The material meets the hardness requirements of NACE MR0175/MR0103/ISO 15156-3**

CE
2592
13
2592.CPR.0038
Declaration of Performance:
0006
0002

Acciai Speciali Terni S.p.A.
FIRMA DEL RESPONSABILE INCARICATO
INSPECTOR SIGNATURE
SIGNATURE DU RESPONSABLE CHARGE UNTERSCHRIFT
DES WERKSACHVERSTÄNDIGEN

Acciai Speciali Terni S.p.A.
FIRMA DEL RESPONSABILE INCARICATO
INSPECTOR SIGNATURE
SIGNATURE DU RESPONSABLE CHARGE UNTERSCHRIFT
DES WERKSACHVERSTÄNDIGEN

Acciai Speciali Terni S.p.A.
FIRMA DEL RESPONSABILE INCARICATO
INSPECTOR SIGNATURE
SIGNATURE DU RESPONSABLE CHARGE UNTERSCHRIFT
DES WERKSACHVERSTÄNDIGEN

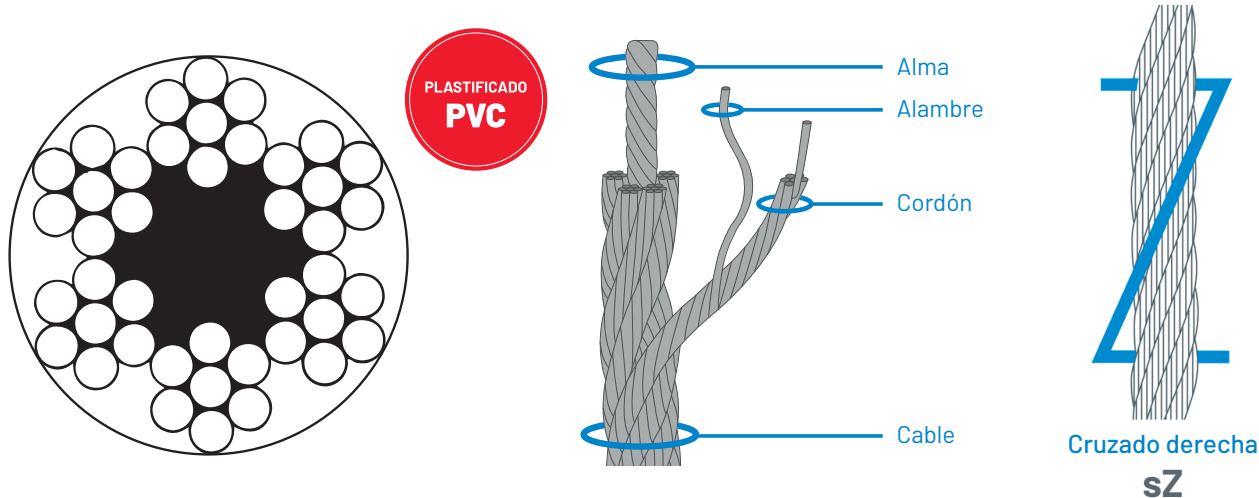
Subjected to the control system by the Notified Body n°2592
Qualicert - Stradone F.anesio 39C 25121 Piacenza (Italy)
System of assessment 2+

Quality Assurance System in accordance with the Pressure Equipment Directive
2014/68/EU, Annex I, Section 4.3 as well as AD 2000 - Merkblatt W 0 By TÜV SÜD
Certificate No.: DGR.0036.OS.W09.2007/MUC.001

is to declare that the material as described in here as been cut to :
otto CES.304L F1 30,00X3,000 Length: 6000,000



Cable de acero galvanizado - 6 x 7 + 1 PVC



El cable de acero galvanizado con recubrimiento de PVC 6 x 7 + 1 (FC) es un elemento mecánico fabricado para mantener un equilibrio entre dureza, resistencia, abrasión, aplastamiento, fatiga y corrosión. El cable de acero se encuentra en un constante desarrollo en la tecnología de su fabricación. Su principal característica son los alambres que lo conforman, el modo en que se encuentran dispuestos, cómo se forman los cordones y cómo se arrollan alrededor del alma. Gracias a su resistencia, fuerza, durabilidad, grosores y flexibilidades, los cables de acero son utilizados en infinidad de aplicaciones y lugares. El cable de acero UNIQ se identifica por su fiabilidad, seguridad y las altas prestaciones ofrecidas.

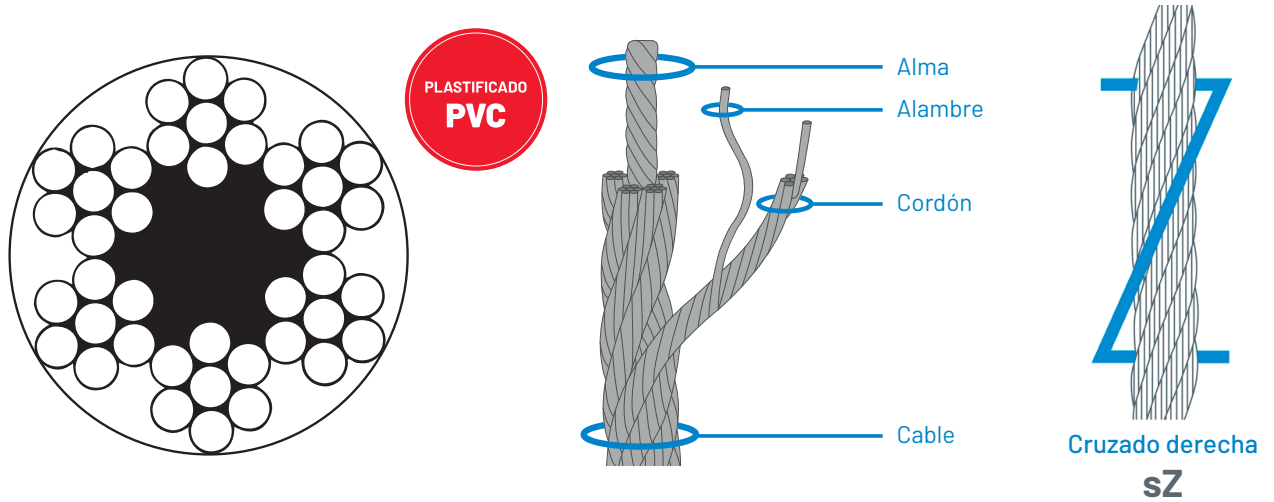
Certificación UNE-EN 12385-4.

ALMA:	Textil
ARROLLAMIENTO:	Cruzado
ACABADO:	Galvanizado con recubrimiento de PVC
USOS:	Cable estático, Agricultura - Ganadería

Presentación: Carrete

Medida Ø Nominal	Referencia	Longitud m	Carga Mínima de Rotura 1770 N/mm ²	Peso kg/100 m	Formato de presentación	Medidas carrete	
						Ø Interior mm	Ø Exterior mm
2 x 4	09201010	15	2,35	2,87	Carrete plástico	48	140
2 x 4	09201021	25	2,35	2,87	Carrete plástico	48	140
2 x 4	09201032	50	2,35	2,87	Carrete plástico	48	133
2 x 4	09201043	100	2,35	2,87	Carrete plástico	50	200
3 x 5	09201114	15	5,29	5,12	Carrete plástico	48	114
3 x 5	09201125	25	5,29	5,12	Carrete plástico	27	200
3 x 5	09201136	50	5,29	5,12	Carrete plástico	50	200
3 x 5	09201147	100	5,29	5,12	Carrete plástico	50	200

Cable de acero galvanizado - 6 x 7 + 1 PVC



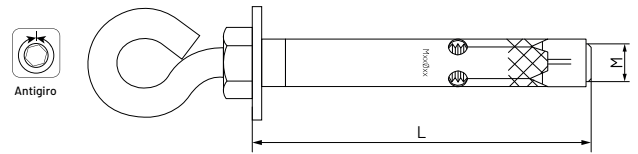
Presentación: Carrete

Medida Ø Nominal	Referencia	Longitud m	Carga Mínima de Rotura 1770 N/mm ²	Peso kg/100 m	Formato de presentación	Medidas carrete	
						Ø Interior mm	Ø Exterior mm
4 x 6	09201218	15	9,40	8,12	Carrete plástico	50	200
4 x 6	09201229	25	9,40	8,12	Carrete plástico	27	200
4 x 6	09201230	50	9,40	8,12	Carrete plástico	50	200
4 x 6	09201241	100	9,40	8,12	Carrete plástico	55	200
5 x 7	09201312	15	14,70	11,80	Carrete plástico	27	200
5 x 7	09201323	25	14,70	11,80	Carrete plástico	50	200
5 x 7	09201334	50	14,70	11,80	Carrete plástico	50	200
5 x 7	09201345	100	14,70	11,80	Carrete plástico	48	250
6 x 8	09201416	15	21,20	16,53	Carrete plástico	27	200
6 x 8	09201427	25	21,20	16,82	Carrete plástico	50	200
6 x 8	09201438	50	21,20	16,82	Carrete plástico	50	200
6 x 8	09201449	100	21,20	16,82	Carrete plástico	48	300

Presentación: Retractilado

Medida Ø Nominal	Referencia	Longitud m	Carga Mínima de Rotura 1770 N/mm ²	Peso kg/100 m	Formato de presentación
2 x 4	09201013	15	2,35	2,87	Retractilado
3 x 5	09201115	15	5,29	5,12	Retractilado
4 x 6	09201219	15	9,40	8,12	Retractilado
5 x 7	09201313	15	14,70	11,80	Retractilado
6 x 8	09201417	15	21,20	16,53	Retractilado

Anclaje de expansión cáncamo



El funcionamiento es el mismo que los anclajes metálicos con tornillo. Es necesario realizar un taladro previamente donde ubicar el anclaje y mediante la expansión de la camisa una vez realizado el roscado del cáncamo se produce el anclaje por presión en las paredes del material base. El cáncamo permite fijar el elemento a sujetar o fijar empleando un cable, un pasador o cualquier otro elemento que permita la unión.

MATERIAL: Acero al carbono
Anillo de nylon rojo

ACABADO: Cincado blanco

Medida M x L	Referencia	Ø Broca mm	Par de apriete Nm	Envase	Embalaje
6 x 45	09108282	8	15	150	900
6 x 45	09108135	9	15	150	900
8 x 60	09108258	10	25	50	300
8 x 60	09108143	11	25	50	200
10 x 70	09108321	12	35	25	200
10 x 70	09108357	14	35	50	200
12 x 80	09108330	16	50	25	200

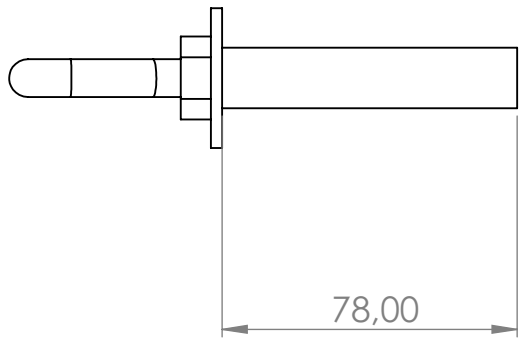
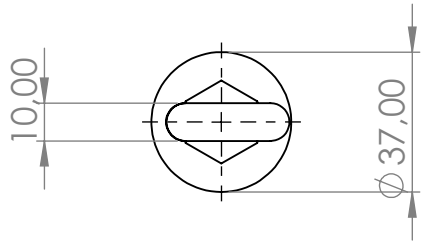
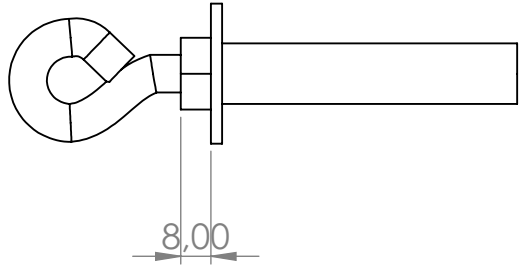
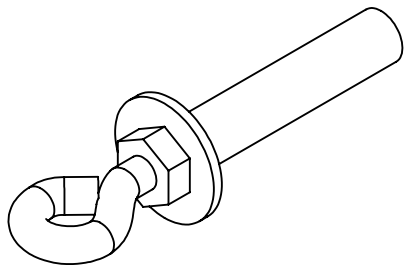


UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Diseño y comportamiento mecánico
de nodos articulados para estructuras tensegríticas
Francisco José García Moreno



ANEXO B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO: Cincado blanco		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		TÍTULO:	
DIBUJ.		FECHA		<h1>Cáncamo</h1>	
VERIF.					
APROB.				N.º DE DIBUJO	
FABR.				A4	
CALID.		MATERIAL: Acero al carbono		ESCALA:1:2	
		PESO:		HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

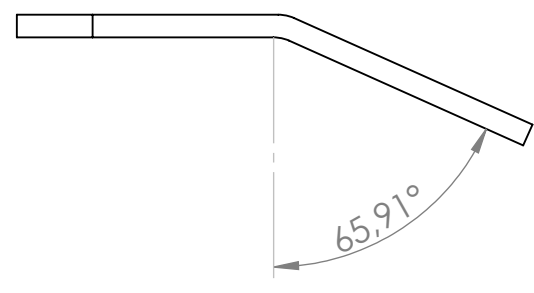
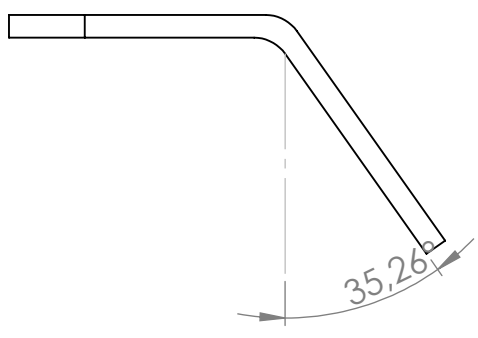
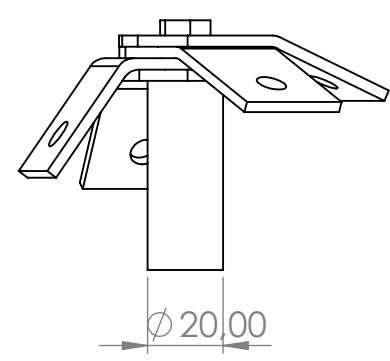
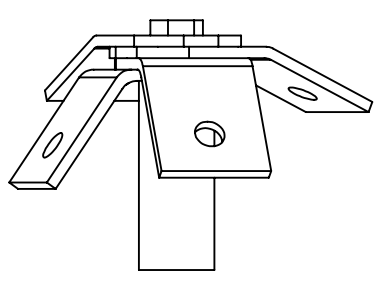
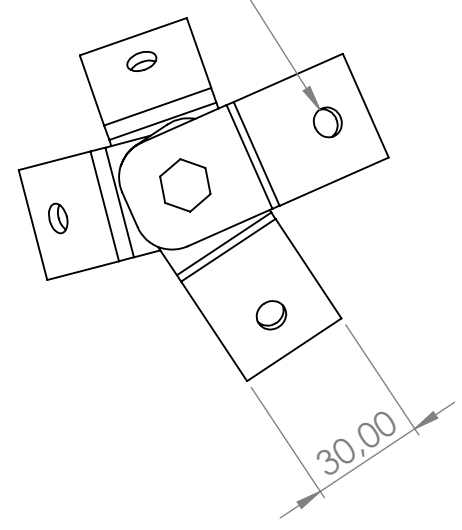
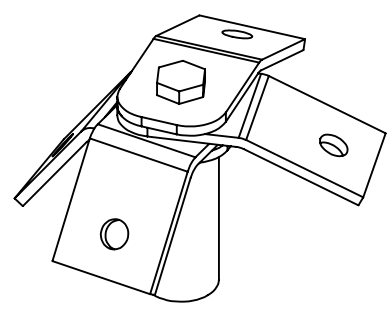
C

C

B

B

R VERDADERO 4,00



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

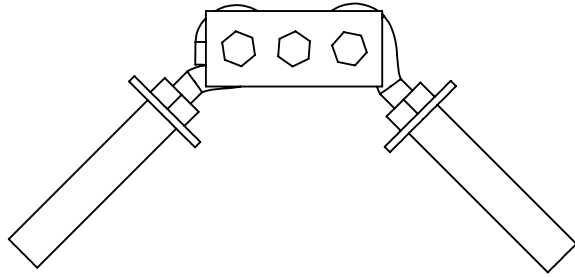
TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	
<h1>Nodo pletinas</h1>	
	A4
PESO:	
ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

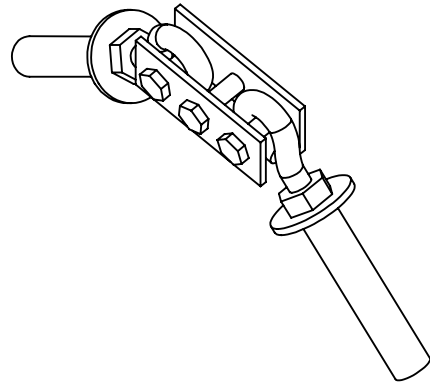
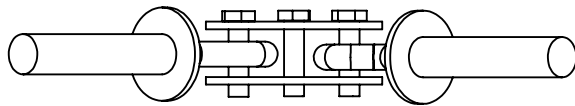


E

E

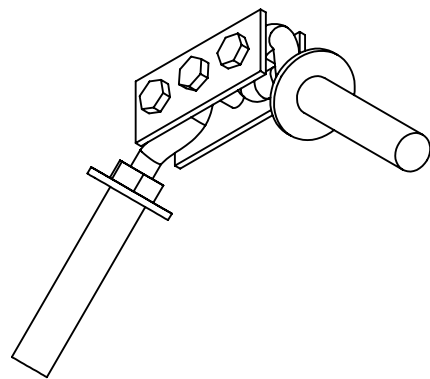
D

D



C

C



B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					

CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
				Nodo dos barras	
			PESO:	ESCALA:1:3	HOJA 1 DE 1

A

A

4 3 2 1