

Fachadas de cables tensados

Aspectos de diseño a través del análisis mecánico

Gumersindo Freire López
Santiago de Compostela, junio de 2023

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

MÁSTER EN FACHADAS TECNOLÓGICAS Y ENVOLVENTES SOSTENIBLES



Índice general

Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivo	2
1.2. Ámbito de este trabajo	3
1.3. Contenido y estructura	3
2. Evolución y estado de la técnica	7
2.1. Antecedentes. Las SGFs antes de las fachadas de cables tensados	8
2.2. Fachadas de cables tensados	9
2.3. Evolución de la técnica	15
2.4. Continuidad y evolución	18
3. Análisis mecánico y aspectos de diseño	25
3.1. Los retos de las estructuras tensadas	25
3.2. Método de análisis de fachadas tensadas	26
3.3. Implementación del método de análisis	28
3.3.1. Software y herramientas para el desarrollo y uso de FTES	28
3.4. Proceso de trabajo	30
3.4.1. Preprocesado. Definición de la estructura	31
3.4.2. Procesado	33
3.4.3. Postprocesado	34
3.5. Parámetros de diseño de fachada	36
3.5.1. Parámetros que afectan de manera global a la fachada . .	37
3.5.2. Parámetros que afectan al diseño de fijaciones de vidrio .	40
3.5.3. Parámetros que afectan a los anclajes de la fachada . . .	43
4. Casos de estudio	49
4.1. Cargas para el análisis de fachadas	50
4.2. Deformaciones máximas en las fachadas	51
4.3. Fuerzas máximas en cables y reacciones	55
4.4. Deformaciones angulares en la geometría de fachada	58
4.5. Deformaciones en los paños de vidrio de fachada	60
4.6. Análisis en mayor profundidad y otros datos	63
5. Conclusiones y futuras líneas de trabajo	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Futuras líneas de trabajo	70

A. Código de FTES. Documentación técnica	73
A.1. Ejecución del código	73
A.2. Estructura del código	73
A.3. Clases y funciones de la herramienta FTES	74
A.3.1. Clases	74
A.3.2. Funciones de la clase FTES_Structure	74
B. Método de análisis. Descripción	81
C. Ejemplo de ejecución de un análisis	83
C.1. Código para ejecución de análisis	83
C.2. Resultados de un análisis de cálculo	88
Bibliografía	89

Resumen

Entre las soluciones conocidas actualmente para la construcción de fachadas de vidrio estructurales, las fachadas soportadas por redes de cables pretensados son las soluciones más ligeras para resolver de manera cercana a la transparencia total cerramientos acristalados de grandes dimensiones.

Este trabajo se centra en el estudio de estas fachadas soportadas por cables, que cuentan con estos elementos a tracción como único soporte estructural. La proposición de partida es que la forma estructural y el diseño arquitectónico de fachadas de este tipo deben estar ligados de manera muy estrecha.

Partiendo de un estudio de la evolución y estado actual de la técnica, se han estudiado las características generales y detalles de fachadas construidas para extraer una serie de parámetros que forman parte de las decisiones de diseño durante la elaboración de un proyecto de fachada de cables tensados.

Por otra parte se ha creado una herramienta de análisis estructural específica para estructuras de cables tensados, que se ha puesto en uso a través del estudio de una serie de casos propuestos de fachadas en distintas variaciones, para estudiar de esta forma el comportamiento en estos casos.

La metodología en este trabajo es principalmente empírica, a través de la proposición de una serie de experimentos de cálculo, debido al comportamiento no lineal de estas estructuras, que impide un acercamiento más analítico a su comportamiento mecánico.

1

Introducción

Las fachadas en el proyecto de Arquitectura constituyen actualmente un campo con entidad propia por su especialización, y un ámbito particularmente activo en soluciones innovadoras y retos técnicos. Cuestiones como el comportamiento energético de los edificios o la búsqueda de una transparencia cada vez mayor han dado lugar a continuas innovaciones. Este trabajo se enmarca en una de las tipologías de fachadas de vidrio surgidas de la búsqueda de la máxima transparencia. Las tipologías de fachadas abordadas, soportadas por estructuras de cables tensados, son las soluciones más ligeras conseguidas hasta la fecha en fachadas de gran escala.

Desde sus inicios hasta el momento se han edificado diversos casos con una evolución en la técnica y en las tipologías de fachadas. El conocimiento acerca de estas estructuras se mantiene en gran parte en la práctica profesional, y en un grado mucho menor en publicaciones científicas o especializadas. Desde el punto de vista de la ingeniería se han estudiado y ejecutado construcciones de cables sin un enfoque específico en las fachadas tecnológicas. Las estructuras de cables se han desarrollado en ámbitos tan diferentes como los tendidos eléctricos, las estructuras petrolíferas, las estructuras de cubiertas textiles o las estructuras de máquinas como grúas o elevadores. La aplicación de estructuras de cables tensados a fachadas ha aprovechado el conocimiento y tecnología disponibles de estos otros campos, pero las cuestiones específicas relativas a fachadas no han sido recopiladas en publicaciones especializadas.

Este trabajo se propone estudiar las fachadas de cables tensados a través de un enfoque basado en el estudio de su comportamiento mecánico. El tema central del trabajo ha consistido en desarrollar un método de análisis para poder hacer cálculo estructural en este tipo de fachadas, y a través del uso de esta herramienta se han analizado un grupo de tipos con el objetivo de obtener conclusiones y reunir un cierto conocimiento específico sobre este campo.

Este trabajo constituye claramente una incursión parcial en el tema de estudio. Sin embargo, el enfoque basado en el estudio a través de la mecánica de estas estructuras resulta fructífero ya que, en estructuras de tal ligereza como estas, las consideraciones de proyecto y constructivas están muy estrechamente ligadas con el comportamiento estructural de la fachada, dado que la totalidad de estos cerramientos se reduce a vidrio y a unos finísimos elementos estructurales trabajando en un régimen de tensiones, geometría y tolerancias altamente afinado y eficaz.

Este estudio a través del desarrollo de una herramienta de cálculo y del estudio de ciertos casos tipo ha permitido obtener algunas conclusiones no solamente del comportamiento estructural de las fachadas de cables tensados, sino también de qué parámetros entran en juego en un proyecto de estructura, y de qué manera se relacionan con el comportamiento estructural u otros factores de la fachada. La propia herramienta de cálculo tiene por objetivo, además, resultar de utilidad para el cálculo y análisis de otras estructuras de fachada más allá de su uso en los casos tipo de estudio, como pueden ser las distintas variantes de cerchas aplicadas a fachadas, formadas tanto por cables como por elementos rígidos o combinaciones de ambos.

Este trabajo se enmarca en el contexto del curso de Máster en Fachadas Tecnológicas y Envolventes Sostenibles de la Universidad Politécnica de Madrid. Está desarrollado a lo largo de la edición 2022-2023 de este Máster y el presente documento recoge los resultados de investigación a lo largo del curso. Como recurso adicional a este texto, la documentación que puede resultar útil pero no es factible introducir en este documento (como puede ser código fuente o archivos CAD o resultados de cálculo) se encuentran accesibles a través de la siguiente web:

https://github.com/gumerfreire/FTES_Cablestructures

1.1. Motivación y objetivo

La tipología de fachada de cables pretensados se originó a principios de la década de 1990 a partir de una idea contraria a la intuición y la práctica común hasta el momento como era basar las fachadas de vidrio en estructuras rígidas. La idea de aplicar estructuras de cables tensados, características por su alta flexibilidad, a fachadas acristaladas, dio lugar a una categoría de fachadas de entre las más ligeras en cuanto a estructura para cubrir grandes luces. Desde este primer proyecto hasta la actualidad se ha construido otros grandes ejemplos donde se destaca siempre su gran escala, su ligereza y las grandes deformaciones que pueden alcanzar estas estructuras.

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de conocer los mecanismos de funcionamiento de este tipo de fachadas, que se alejan de las nociones estructurales que solemos encontrar en los ámbitos de la Arquitectura y en el ámbito de las estructuras aplicadas al diseño de fachadas tecnológicas. Parte además de la siguiente proposición: En este tipo de fachadas un número reducido de elementos de pequeña sección soportan el conjunto funcionando con una alta eficacia estructural, de manera que el diseño de la fachada debe estar ligado de manera muy estrecha al comportamiento estructural de la misma. De esta forma, la esta investigación no tiene únicamente por objetivo conocer cómo funcionan estructuralmente las fachadas de cables, sino que pretende obtener conocimiento útil para el diseño y el proyecto de esta tipología de cerramientos.

Por otra parte, el cálculo de estructuras de cables pretensados es menos usual entre la disciplina de la Arquitectura que otros tipos de estructuras más comúnmente utilizadas en edificación, y de cuya experiencia se nutre a menudo el cálculo estructural de fachadas tecnológicas. Como parte del trabajo se la propuesto el desarrollo de una herramienta de cálculo específica para estructuras de cables y adaptada al trabajo con fachadas de cables pretensados. Se ha

desarrollado a lo largo de esta investigación un software en forma de código en lenguaje Python que constituye una herramienta abierta, genérica y fácilmente adaptable a las necesidades concretas de cada proyecto. Otro de los objetivos en este trabajo es precisamente explorar el potencial de este tipo de herramientas para apoyar el trabajo en el proyecto de fachadas tecnológicas.

En las primeras fases de estudio se ha comprobado, además, que gran parte del conocimiento sobre este tipo de fachadas pertenece a la práctica profesional y no está sistematizado en publicaciones más allá de artículos que recogen los datos generales de soluciones de proyectos en particular. Si bien existen autores, como Patterson [17], que han publicado obras fundamentales de referencia en el ámbito de las fachadas tecnológicas, no existen en general publicaciones más específicas sobre los aspectos prácticos de desarrollo de proyectos de fachada. En este sentido, se busca también que este trabajo constituya una pequeña contribución al tema, abordada desde un punto de vista práctico.

1.2. Ámbito de este trabajo

El ámbito en el que se enmarca este trabajo es el de las fachadas ligeras acristaladas cuya estructura está formada por redes de cables pretensados. En las tipologías estudiadas los cables tensados son el único elemento de soporte de la fachada, que prescinde completamente de elementos a compresión. Dentro de esta categoría pueden distinguirse tres tipos principales.

En primer lugar, las fachadas de redes de cables planas de una capa, en las que la estructura de cables está formada por una serie de elementos verticales y horizontales formando una retícula en un plano. Estos elementos se pretensan y se anclan en sus extremos, y las intersecciones entre cables se equipan con elementos puntuales de fijación que unen cables entre sí y permiten instalar los paños de vidrio, generalmente sujetos por sus esquinas.

La segunda tipología básica correspondería a las fachadas de montantes formados por cables, que se componen únicamente de cables verticales actuando como estructura. Estos cables tienen la misión de soportar las cargas de peso de vidrios y viento.

El tercer caso corresponde a las fachadas de doble curvatura. En este caso la estructura portante está formada por una red de cables que forman una superficie anticlástica o de curvaturas opuestas en cada dirección. Estas fachadas funcionan de manera similar a las descritas en la primera tipología, aunque consiguen mediante su forma una rigidez mucho mayor aun con pretensados menores.

Esta división en tipologías sigue el criterio de Mic Patterson [17] y, aunque pueden hacerse otras clasificaciones atendiendo a su comportamiento mecánico, resulta correcta en todo caso como clasificación general.

En el plano 1.01 al final de este capítulo puede verse gráficamente representada cada subtipo de fachada.

1.3. Contenido y estructura

La estructura del trabajo se divide en cinco capítulos, el primero de los cuales está dedicado a introducción.

El segundo capítulo se dedica a la evolución y estado de la técnica, y se hace en este capítulo un repaso breve de proyectos representativos desde el Hotel Kempinski en Munich de 1993, que marca de manera clara el inicio de esta tipología de fachadas, hasta proyectos recientes. A través de este recorrido puede verse cierta evolución para, al final del recorrido, hacer un balance entre los elementos que evolucionaron y aquellos aspectos que representaron una continuidad a lo largo del desarrollo de estos proyectos. Por otro lado, se realiza en paralelo una pequeña recopilación de los estudios y artículos científicos acerca de diversos intereses de estudio relacionados con esta tipología de fachadas.

El tercer capítulo se dedica a la descripción de la herramienta de cálculo, donde se da una visión general y una exposición más detallada sobre las capacidades del software creado. En paralelo se recogen una serie de parámetros que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una fachada de cables pretensados, que están relacionados en mayor o menor medida con el comportamiento mecánico de la estructura de fachada, que pueden evaluarse a través de la herramienta de cálculo.

El cuarto capítulo está dedicado a exponer resultados de una serie de casos de estudio. Como aplicación práctica de la herramienta de cálculo expuesta en el capítulo anterior se han propuesto una serie de casos, a modo de experimento, sobre los que se realiza análisis estructural utilizando la herramienta de cálculo, y se analizan varios aspectos de los resultados obtenidos.

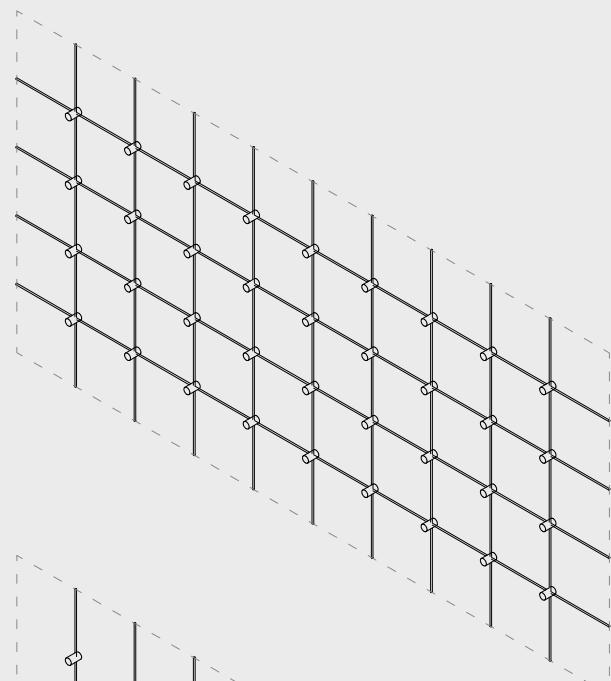
Por último, el quinto capítulo resume conclusiones y apunta algunas líneas de trabajo futuras. En los tres anexos se recoge información adicional acerca del método utilizado para la implementación de la herramienta de cálculo, así como información técnica sobre esta.

Los capítulos están además acompañados de planos que reúnen al final del texto en cada capítulo. Es posible, además, tener más información de la herramienta de cálculo accediendo al código a través de la dirección web indicada en el anexo final relativo a la documentación técnica de esta.

Tipologías de fachadas de cables pretensados

Fachadas de redes de cables planas Flat cable net facades

El tipo fundamental de fachada plana de cables tensados está formada por una retícula de cables horizontales y verticales unidos por puntos de fijación en sus intersecciones. Estas piezas de fijación sirven además para soportar los vidrios al exterior de la malla de cables. La malla forma un plano.



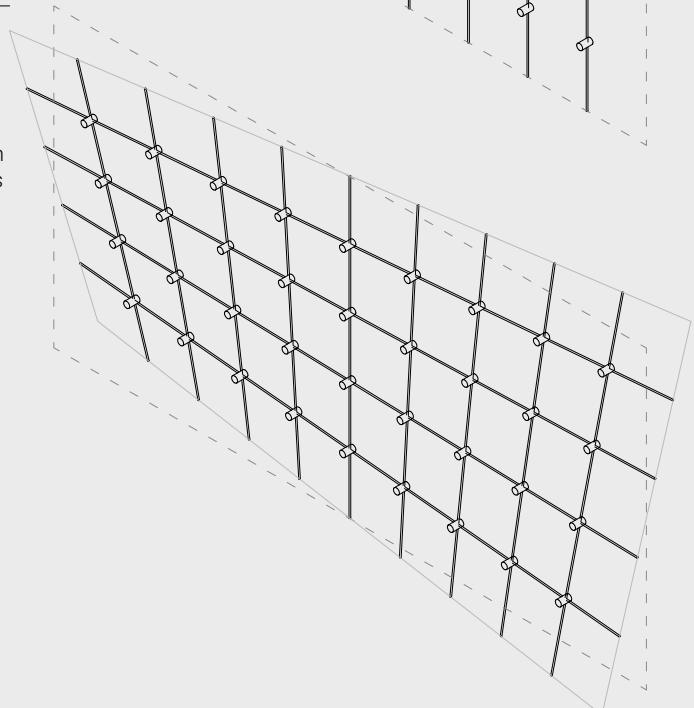
Fachadas de montantes de cables Cable mullion facades

La fachada de montantes de cables tiene una estructura formada únicamente por cables verticales, prescindiendo de elementos horizontales. Estos cables funcionan como montantes soportando el peso de vidrios y cargas de viento. A lo largo de los cables se disponen elementos de fijación para alojar los vidrios.



Fachadas de cables de doble curvatura Double-curves cable net facades

La fachada de doble curvatura está formada por una red de cables en dos direcciones que forman una superficie anticlástica, en la que la curvatura en una dirección y su perpendicular son opuestas. A diferencia de las fachadas anteriores, la forma completa de la fachada es activa, es decir, depende del estado tensional de sus elementos. Esta doble curvatura permite alcanzar rigideces mucho mayores con respecto a las fachadas planas.



2

Evolución y estado de la técnica

En este capítulo haremos un recorrido por la evolución de la técnica y de proyectos de fachadas soportadas por cables tensados. Este recorrido nos permitirá a continuación trazar una serie de características propias de esta tipología de fachadas estructurales.

De manera general, la evolución de las fachadas estructurales está íntimamente ligada a la búsqueda de la transparencia en los cerramientos de edificación, que impulsó tanto la búsqueda de límites técnicos cada vez más ambiciosos para el vidrio, como la búsqueda de sistemas estructurales más sofisticados. En las estructuras, esta búsqueda se tradujo en el diseño de soluciones cada vez más ligeras, complejas y precisas con las que se conseguía una desmaterialización cada vez mayor de la fachada, a la vez que dejaba cada vez más expuestos estos elementos estructurales. Esta exposición cada vez mayor de la estructura y la concentración de la solución en elementos más ligeros hizo también que el diseño de las fachadas estructurales trascendiese la solución puramente mecánica para convertirse en un problema de diseño arquitectónico con entidad propia.

Si bien los aspectos puramente mecánicos y físicos que intervienen en el diseño de fachadas estructurales no son diferentes a los de otras estructuras convencionales, existen muchos aspectos que hacen que el problema de diseño de fachadas estructurales sea una disciplina específica. La interacción con el vidrio, un material frágil con una mecánica completamente diferente al resto de materiales usuales en construcción, el manejo de tolerancias mucho más ajustadas que el resto de la edificación, y la combinación del propio diseño mecánico con otros requisitos como el comportamiento térmico del conjunto, las prestaciones acústicas, los requisitos de estanqueidad y otros factores como el uso, la capacidad para compartimentar el edificio a efectos de incendio o la accesibilidad para bomberos, a menudo en elementos complejos con varias capas y elementos móviles, hacen que el problema sea objeto de una especialización profesional específica. Todo ello contando, además, con que estas fachadas son a menudo el elemento más distintivo de un proyecto de Arquitectura, por lo que la resolución del problema no se reduce a la resolución técnica sino que debe ir de la mano con el proyecto de arquitectura.

En este trabajo nos enfocamos en las fachadas estructurales de cables ten-

sados. Al igual que otros tipos de SGFs (Structural Glass Facades, según el término introducido por Mic Patterson [17], o Fachadas acristaladas estructurales), el desarrollo de esta tipología se vio impulsada por una serie de proyectos de gran impacto que sirvieron como casos fundacionales, a partir de los cuales se proyectaron nuevas soluciones como variantes y evoluciones de los proyectos iniciales. Las fachadas soportadas por cables representan una tipología relativamente nueva, que tienen como referencia a la figura de Frei Otto y sus desarrollos de estructuras espaciales de cables [17] aplicados a las cubiertas del estadio olímpico de Munich, y otros proyectos posteriores. Durante los años 60 y 70 en los que se desarrollaron soluciones estructurales de este tipo cabe destacar que no existían los métodos computacionales para hacer análisis estructurales de este tipo de construcciones, y el desarrollo se basaba en una serie de prácticas empíricas y geométricas basadas en ensayos y modelos a escala. El desarrollo de estos proyectos condujo en paralelo al desarrollo de métodos analíticos para el estudio del comportamiento de estas estructuras.

No fue hasta más tarde, en 1993, cuando las estructuras de cables se aplicaron e fachadas de grandes luces como elemento estructural exclusivo. En desarrollos anteriores sí se habían introducido cables en los elementos portantes de fachadas, formando parte de elementos tipo cercha en los que se utilizaban para solucionar aquellas barras que soportaban esfuerzos de tracción. Este mecanismo utilizado para aligerar las estructuras de las fachadas dirigió los esfuerzos de diseño a la búsqueda de configuraciones con un número cada vez mayor de elementos a tracción que minimizase los elementos a compresión para poder utilizar cables en la mayor cantidad posible de elementos, reduciendo el impacto visual del conjunto portante de la fachada.

2.1. Antecedentes. Las SGFs antes de las fachadas de cables tensados



Fig. 2.1: Imagen interior de la fachadas de Les Serres en Parc de la Villette, RFR. Fuente de la imagen: [19]

Precedente destacado de este camino en la búsqueda de transparencia lo ocupa el proyecto de Les Serres en la Cité des Sciences et de l'Industrie del Parc de la Villette, en París, diseñado en 1983 y construido entre 1984-86 por el arquitecto Adrien Fainsilber y con RFR a cargo del desarrollo de la ingeniería de fachada. En este proyecto la búsqueda de transparencia en las fachadas llevó al diseño de grandes paños de vidrio con 32 m de altura para los que se diseñó una estructura formada por cerchas de cables de las que surgió la denominación acuñada por Peter Rice de “cable mullion” [17]. Rice descubrió también la posibilidad de utilizar estas cerchas de cables en horizontal para rigidizar la estructura a la acción de viento y potenciar la transparencia del conjunto. Estas cerchas de cables se soportaban en una estructura de acero que actuaba como estructura principal del conjunto de fachadas y cubiertas.

En este proyecto se desarrolló también la fijación de rótula para el vidrio, un anclaje puntual para la sujeción de los vidrios de fachada que no sobresalía del plano exterior, potenciando la imagen de transparencia del proyecto. Este anclaje, denominado rotule fitting” permite la rotación libre gracias a una rótula que impide la transmisión de momentos de la estructura al vidrio.

En estos mismos años otro proyecto de gran impacto se convirtió en referencia en el desarrollo de soluciones transparentes para grandes estructuras de fachada. El proyecto para el nuevo Museo del Louvre en París, del arquitecto I. M. Pei, desarrolló dos estructuras para sus pirámides de vidrio (una principal, que se eleva sobre la plaza del museo, y otra invertida en el interior) que suponen dentro del propio proyecto un ejemplo de evolución de la técnica. En una detallada descripción de Ignacio Fernández Solla [10] se descubre la evolución desde la solución de la fachada principal, una estructura espacial formada por elementos de acero y cables en la fachada principal, en la que el vidrio funciona como cerramiento, a la solución en la pirámide invertida, de menor tamaño, en la que el vidrio toma el papel de material estructural y funciona en conjunto con la estructura espacial de cables para dar a la segunda pirámide una solución más transparente que en la primera.

2.2. Fachadas de cables tensados

La solución de una fachada soportada únicamente por cables llegaría de la mano de Jorg Schlaich, un ingeniero discípulo de Frei Otto, que desarrolló la solución de fachada para el proyecto de Hotel Kempinski en Munich con el arquitecto Helmut Jahn. Proyectado entre los años 1989-90, Schober [24] califica con acierto de “invención” la solución que se convertiría a partir de este proyecto en una tipología de fachada con características propias, en lo que será la solución hasta la actualidad que permite la construcción de fachadas más transparentes de grandes dimensiones.

La fachada de Hotel Kempinski es una fachada plana de cables tensados. Con unas dimensiones generales de 40x25 m, está formada por cables pretensados horizontales y verticales que forman una retícula de aproximadamente 1,5 m de lado, que coincide con las dimensiones de las piezas de vidrio que cierran la fachada. En las intersecciones entre cables verticales y horizontales se disponen piezas puntuales que unen los cables entre sí y fijan las piezas de vidrio en sus esquinas. Se trata de un sistema por tanto sin marco, cuya junta entre vidrios se cierra posteriormente con un sellado elástico.



Fig. 2.2: Hotel Kempinski, Minuch (1993)

La estructura de esta fachada, por tanto, se reduce a una retícula de cables de 22 mm de diámetro y a las piezas puntuales que conectan los cables entre sí. Estos cables se pretensaron con una carga de 25 kN y 75 kN para los cables verticales y horizontales respectivamente, para dar rigidez a la estructura y limitar las deformaciones ante cargas de peso propio y viento.

La idea de esta fachada contravenía la práctica convencional hasta el momento y la intuición de que las estructuras que soportan piezas de vidrio deben ser lo más rígidas posible para evitar que las deformaciones produjesen la rotura por la fragilidad del vidrio. Si bien las estructuras mencionadas anteriormente, formadas por cerchas de cables resultan menos rígidas que otros tipos convencionales de fachadas, esta tipología de retícula de cables tiene una deformabilidad que no se había planteado hasta el momento en fachadas ligeras.

El control de la deformación de la estructura fue, a lo largo de todo el desarrollo, el criterio principal de diseño de la solución [24]. En fase inicial se realizaron ensayos para comprobar la capacidad de las piezas de vidrio para admitir deformaciones fuera de su plano, y una vez comprobado que estas deformaciones eran admisibles, se procedió a diseñar la fachada atendiendo al resto de parámetros necesarios para asegurar que los vidrios tuvieran la capacidad suficiente de movimiento (lateralmente entre los apoyavidrios, y angularmente en los soportes en sus esquinas) para funcionar sin colapsar ante los movimientos de la estructura. Esta fachada, según Schlaich [17], llegaba a deformaciones de hasta 90 cm pero, sorprendentemente, los efectos locales sobre cada vidrio para estas deformaciones son admisibles sin la rotura del paño. Pese a que con estas deformaciones el conjunto del vidrio sufría grandes desplazamientos fuera de su plano teórico, los movimientos relativos entre sus vértices eran de orden mucho menor como veremos más adelante en este trabajo.

Este caso fundacional daría lugar a otros desarrollos en la búsqueda de llevar cada vez más al límite la consecución de grandes fachadas transparentes. Los

proyectos en los que podemos encontrar estas tipologías de fachadas se centran, curiosamente, en un pequeño grupo de estudios de arquitectura e ingeniería y concentrados en los ámbitos geográficos de Alemania y EEUU, con algunas excepciones como proyectos en Holanda o China, pero en los que participaron igualmente estos estudios altamente especializados. Asimismo, la construcción de estas fachadas corre a cargo de un selecto grupo de compañías fachadistas con alta capacidad técnica y especialización.

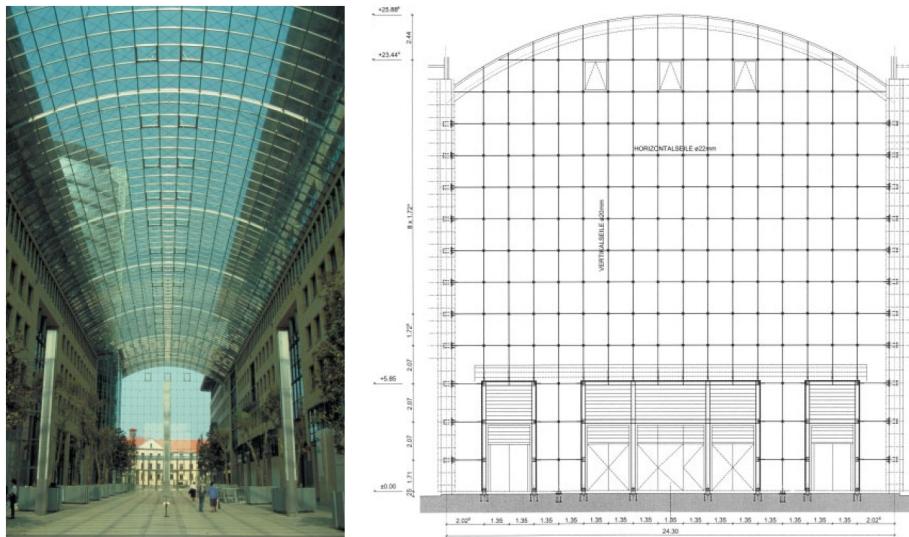


Fig. 2.3: WTC Dresden, 1995. Fachada al fondo en la imagen izquierda y alzado de fachada a la derecha, donde pueden apreciarse los encuentros con las puertas en la parte inferior de fachada. Fuente de la imagen: [24]

El equipo de Jorg Schlaich desarrolló poco más tarde el WTC de Dresden, una fachada de tipología similar al Hotel Kempinski con un tamaño de 20x26 m, que si bien tenía un tamaño más comedido, presentaba una serie de puertas en la parte inferior que supusieron un desafío a la hora de resolver el encuentro de los cables pretensados con huecos. Este encuentro había aparecido ya en el Hotel Kempinski (ver alzado en plano 2.01), donde las puertas se resolvían mediante pórticos que hacían de transición permitiendo el movimiento perpendicular al plano de la fachada dejando las puertas en su plano.

El proyecto posterior de fachada en las ruinas romanas de Badenweiler, de 2001, supone un ejemplo de aplicación de esta tipología a una fachada no hermética. Al no ser necesario el sellado entre vidrios se consiguió en este proyecto un grado de transparencia mayor en la fachada. Posteriormente el mismo equipo desarrolló otros proyectos de mayor tamaño como el Time Warner Center en New York (2003), con una fachada de 26 x 45 m y vidrios de mayor tamaño de 2,14 x 1,22 m, o la fachada del Ministerio de Exterior de Berlín, donde además de alcanzar tamaños de vidrio todavía mayores de 2,7 x 1,8 m se exploraban posibilidades expresivas adicionales de la fachada con la introducción de piezas de vidrio coloreado en el conjunto de la fachada.

El equipo de ingeniería de Werner Sobek, por su parte, ha tenido un papel destacado en la evolución de fachadas de cables. Tal como se recoge en las actas

de Challenging Glass 2 de 2010 [25], en ese momento tenían ya una experiencia de 15 años en el desarrollo de fachadas de cables. En proyectos como el Sony Center de Berlín las dimensiones de fachada alcanzaban ya 60x20 m. A diferencia de los proyectos anteriores, que compartían solución de fijación con la diseñada para el Hotel Kempinski, en este caso los vidrios se fijan mediante arañas con anclajes puntuales en perforaciones del vidrio.

En proyectos posteriores explorarían nuevas posibilidades. Así, en el proyecto para la Universidad de Bremen se desarrollan esquinas de vidrio libres mediante el uso de cartelas de vidrio que hacen el encuentro con la fachada de cables por medio de una unión entre los planos con cepillos en el borde del vidrio que permitían mantener una cierta estanqueidad al mismo tiempo que se permitían los grandes desplazamientos (de hasta 35 cm en este caso) de la fachada de cables.



Fig. 2.4: Sede de Bayer, Leverkusen. En la imagen puede pareciarse la resolución de una fachada de cables en esquina. En este proyecto los cables terminan en grandes muelles tensores que se dejan a la vista como elementos expresivos. Fuente de la imagen: [25]

En el proyecto de sede de Bayer en Leverkusen, construido en 2002, se proyectaron fachadas de cables tensados en distintos planos que incluían encuentros en esquina entre fachadas. El encuentro entre planos se conseguía mediante la introducción de barras rígidas horizontales en la esquina para transmitir los esfuerzos entre un plano y otro, consiguiendo de esta forma esquinas de vidrio libres. En este proyecto se utiliza, además, vidrio doble con cámara, a diferencia de otros casos anteriores en los que el vidrio era una hoja sencilla.

Posteriores desarrollos aprovechan el conocimiento de experiencias anteriores y así, en el centro de aviación Lufthansa en Frankfurt, construido en 2005, aparecen grandes paños de vidrio doble con cámara de 1,45 x 3,45 m. La estructura de cables duplica los cables verticales como mecanismo para reducir las deformaciones de la estructura, y en este caso aparece un doble cable vertical detrás de cada junta entre vidrios, separados entre sí 145 cm.

La introducción de vidrios dobles con cámara da lugar a nuevas posibilidades

de diseño. El proyecto para el Banco Europeo de Inversión en Luxemburgo es un caso interesante ya que, en este caso, la estructura vertical está formada por dos cables al igual que en el edificio de Lufthansa mencionado. Sin embargo, en este caso, los cables se separan más de la fachada pero el primero de los cables verticales se oculta en el plano del vidrio en el espacio entre las cámaras de vidrios. De esta forma, este primer cable vertical de diámetro 14 mm soporta el peso propio del vidrio, en tanto que los cables verticales de 30 mm de mayor tamaño en el interior soportan la carga de viento. En esta fachada, además, los vidrios de 3,54 x 1,75 m son soportados por seis puntos de fijación, tres en cada borde horizontal. Los cuatro puntos en las esquinas conectan con los cables de 14 mm ocultos entre las cámaras, además de los cables vistos en el interior, en tanto que las fijaciones adicionales en el punto medio se unen solamente a los cables interiores.



Fig. 2.5: Markthal, Rotterdam. Fuente de la imagen: web Octatube

En la esfera de la arquitectura más mediática podemos encontrar el ejemplo notable del Markthal de Rotteddam, del estudio neerlandés MVRDV, con un desarrollo de fachada de cables del fachadista Octatube [16] que lo reivindica como el proyecto de fachada de cables tensados más grande de Europa. Se trata de un caso interesante de evolución de la tipología, con un aspecto similar en lo general a los proyectos precedentes pero con diferencias sutiles en los detalles. Así, el nudo de fijación cuenta con un refinado diseño que reduce al mínimo la presencia de esta pieza. La modulación es muy similar al proyecto de Hotel Kempinski con vidrios de 149x149cm, de una hoja de vidrio termoendurecido. El pretensado en este caso es mayor, 300 kN, lo que permite deformaciones en la fachada de hasta 70 cm. En este proyecto encontramos de nuevo detalles de en-

cuentro con las puertas por medio de pórticos que permiten el libre movimiento de la estructura manteniendo en su posición las puertas de acceso.



Fig. 2.6: ThyssenKrupp Quartier Q1, Essen. Interior de la fachada del hall.
Fuente de la imagen: [12]

En este mismo año, 2014, se concluyó el proyecto Q1 del conjunto de edificios sede de ThyssenKrupp en Essen, en lo que constituye un ejemplo de fachada de cables pretensados notable en la intergración con el proyecto de arquitectura, en una muestra de la madurez y experiencia alcanzada en las últimas décadas en el desarrollo de fachadas ligeras mediante cables. Desarrollada por la ingeniería Werner Sobek sobre proyecto de JSWD Architekten, la fachada tiene unas dimensiones de 26x28 m y presenta un diseño más complejo de las piezas de fijación, que unen los cables dobles verticales con los cables horizontales y las enormes unidades de vidrio doble con cámara de 2,15 x 2,60 m con seis puntos de anclaje.

Ejemplos de otras tipologías podríamos ubicarlos en la terminal internacional del Seattle-Tacoma Airport [17] donde se construyó en 2005 una fachada de cables tensados con doble curvatura. La construcción de estructuras de cables con doble curvatura en lugar de planas presenta ciertas ventajas, como una rigidez muy superior a las fachadas planas que permite cubrir grandes luces con pequeños desplazamientos, pero al mismo tiempo supone dificultades técnicas que no se encuentran en las fachadas anteriores: por un lado, la complejidad geométrica de desarrollo de tipos distintos de nudos y piezas de vidrio. Por otro lado, la forma de la superficie es más compleja de tratar, tanto a nivel de análisis como de construcción.

En otra tipología de fachada, esta vez con cables únicamente en dirección vertical, podemos encontrarla en el Alice Tully Hall del Lincoln Center en New York, obra del estudio Diller + Scofidio + RENFRO. En esta fachada se utilizan cables únicamente en una dirección para soportar los vidrios de fachada. Las fijaciones de los vidrios, de 6 puntos, combinan una fijación en las esquinas con



Fig. 2.7: New Beijing Poly Plaza. Fuente de la imagen: Wikipedia

la fijación puntual en taladros en el vidrio para las dos fijaciones intermedias adicionales. En este caso el criterio de deformación, de acuerdo con los datos de Patterson, que recoge una exhaustiva descripción del proyecto [17], se reduce a $L/35$.

En la fachada de mayor tamaño construida hasta la fecha, llegando a 90 m de altura con una única estructura de cables, en el hotel New Poly Plaza en Beijing del estudio americano SOM, podemos encontrar una nueva variante en la que se introducen distintos órdenes de escala en los cables, con una primera estructura de grandes cables de 237-275 mm de diámetro de la que surge la retícula de cables de 26 y 34 mm de diámetro que constituye ya la retícula base coincidente con la modulación de vidrios. En este caso la fachada corrió a cargo de otro de los grandes fachadistas, Yuanda, en este caso de origen asiático [14].

2.3. Evolución de la técnica

Enfocándonos únicamente en las tipologías de fachadas de cables tensados, cuyo punto de origen establecemos en 1993 con la fachada del Hotel Kempinski, el desarrollo de los materiales y de la técnica era para ese momento un campo maduro en aplicaciones diferentes.

En cuanto a las posibilidades de análisis de estas estructuras, la implementación de métodos computacionales empezaba a ser común en el ámbito profesional. La publicación tomada como referencia de Broughton y Ndumbaro [6] es de 1994, y en este momento los métodos de análisis de elementos finitos eran ya relativamente comunes en entornos profesionales.

La disponibilidad de técnicas y materiales para la construcción de fachadas de cables tensados era inmediata debido al alto grado de desarrollo de la técnica

de cables para otras aplicaciones exigentes [18] como cables para elevadores y grúas o cables para tendidos eléctricos. En este tipo de aplicaciones la técnica exigía cables resistentes a grandes cargas, acciones dinámicas y servicios de fabricación y mantenimiento avanzados, por lo que la industria ofrecía una serie de productos como cables de distintos tipos de trenzado y material, con terminaciones comprobadas y listas para su puesta en carga, e instrumentación para la medición e inspección de la estructura. Esta disponibilidad técnica puede verse hoy reflejada en documentos normativos como los Eurocódigos y ETAs [8] sobre productos para estructuras.

En el desarrollo de la primera fachada en 1989-90 del Hotel Kempinski, tal como se refleja en [24], se reflejan ya conclusiones que muestran un desarrollo maduro de esta tipología de fachada ya en este primer proyecto. A partir de ensayos se pudo comprobar para esta fachada que los paños de vidrio templado podían tener deformaciones fuera de su plano de hasta 15 cm sin romper. En años más recientes se han popularizado en la técnica de SGFs el vidrio curvado en frío, aunque en el momento era una técnica menos explorada. De la descripción se conocen también los valores de pretensado y la especialización de los cables, con los verticales pretensados en menor medida y destinados a soportar el peso propio de vidrio, en tanto que los horizontales se pretensaban con un valor mayor para soportar la carga de viento. Esta configuración de pretensado resulta muy adecuada al proyecto ya que, como suele suceder en las fachadas de grandes dimensiones y tal como se aprecia en la propia fachada del hotel Kempinski (Imagen 2.2), el borde superior es una viga ligera de gran luz, más susceptible de deformarse con la acción de la fachada que los bordes verticales, que pueden soportar el pretensado con elementos estructurales de forjado a forjado con mucha menor luz.

En relación con esta configuración de pretensado, en el proyecto se conocía también el efecto de la diferencia de luz en el grado de trabajo de cada una de las direcciones de cables: relaciones de luz 2 a 1 dan lugar a que solamente los cables de una dirección trabajen efectivamente (lo cual está en la línea de las conclusiones extraídas en los experimentos presentados más adelante en este trabajo).

En este proyecto se especificaban también criterios de deformación, estableciendo el valor de $L/50$ como deformación límite, y se ponía esta deformación en relación con las dimensiones y características mecánicas de los insertos de neopreno en contacto con el vidrio, que absorbían los movimientos entre vidrio y fijación al producirse deformaciones en la estructura.

En los últimos años diversas líneas de investigación en el ámbito más general de las fachadas y estructuras de vidrio han servido como base de conocimiento aplicable a las fachadas tensadas de cables. Con frecuencia estas investigaciones provienen de grupos académicos y profesionales especialistas en la construcción de fachadas, como Fancesc Arbós Bellapart [4] que ha estudiado diversos aspectos de las estructuras de cables y fijaciones puntuales de vidrio. Desde la industria de la construcción de fachadas nace también la necesidad de estudiar las posibilidades del curvado en frío del vidrio [5], que si bien se estudia con el fin de instalar vidrios curvados en frío que mantienen esta forma permanentemente, es posible aprovechar ciertas conclusiones a la hora de prever el comportamiento del curvado de vidrio de manera temporal con las deformaciones producidas en las fachadas de cables.

En el ámbito de las estructuras ha habido también un enorme desarrollo en

la implementación de métodos para llevar a la práctica análisis estructurales con cables pretensados en diversos aspectos. Scheck publicó en 1974 [22] un método para obtener de manera numérica configuraciones viables de formas de mallas para estructuras formadas de cables. En fachadas de cables planas la forma de la fachada es trivial, pero no resulta así en fachadas con curvatura donde encontrar formas compatibles que pueden adoptar las estructuras de cables era una tarea empírica hasta la aparición de métodos computacionales. Posteriormente se publicaron métodos ampliados y alternativos para el proceso de form-finding que permiten establecer condiciones de diverso tipo para computar formas compatibles para las estructuras pretensadas de cables.

En el ámbito de los métodos de análisis estructurales se han publicado hasta el día de hoy diversos avances enfocados a distintos objetivos, como el diseño u optimización de nuevos métodos de análisis [21] [1]. Los métodos de análisis finitos han desarrollado también elementos específicos para introducir en los análisis las particularidades específicas del comportamiento de cables como elementos estructurales. Así, en diversos trabajos se han desarrollado formulaciones específicas para elementos tipo cable [11], incluyendo elementos tipo cable que pueden tener nudos deslizantes entre elementos [7]. En su aplicación a fachadas es interesante esta posibilidad ya que, aunque la retícula de cables está unida en sus intersecciones, los cables continuos tenderían a deslizar en las piezas de fijación para igualar la tensión en todo el cable. También en el estudio del proceso constructivo podría resultar de utilidad un análisis de este tipo.

En el ámbito de fachadas de cables se han hecho estudios generales desde departamentos de Ingeniería Civil y Arquitectura. El trabajo de M. Yussof [15] en forma de tesis doctoral hace un estudio general del comportamiento de las fachadas por medio de análisis de modelos de fachadas y ensayos en un modelo a escala. En este trabajo uno de los puntos destacados es la investigación de la contribución del vidrio a la rigidez total del conjunto. Este mismo punto se ha estudiado con resultados publicados en [9] con conclusiones diferentes. En el primer caso se concluye que el vidrio tiene un efecto significativo en la rigidez del conjunto de la fachada, en tanto que en el segundo caso se le da un papel mucho más limitado. Es posible que la escala de los modelos tenga que ver con esta disparidad de resultados.

La flexibilidad de las fachadas de cables pretensados ha suscitado otras investigaciones en el ámbito del comportamiento dinámico de estas estructuras. En efecto, al tratarse de estructuras tan deformables no es ya posible confiar los análisis a la consideración de cargas estáticas, sino que es de vital importancia tener en cuenta el carácter variable en el tiempo, incluyendo las características vibratorias y de periodicidad de las cargas que pueden inducir vibraciones en los modos propios de la estructura alimentando movimientos cada vez mayores hasta el colapso. Así, en [20] se estudian los efectos de cargas variables en el tiempo sobre estructuras de cables pretensados. La conclusión es, efectivamente, que los efectos de la variación en el tiempo de las cargas puede dar lugar a vibraciones y deformaciones de mayor magnitud que las obtenidas por análisis estáticos, incidiendo en la necesidad de ir más allá de los modelos de acciones proporcionados por las normativas para el estudio riguroso de estas soluciones de fachada. Estos estudios constituyen además ejemplos de metodologías de modelado y análisis que pueden servir como referencia a la hora de acometer nuevos análisis en el diseño de nuevas fachadas. Mecanismos para el control de las vibraciones son expuestos en [13] teniendo en mente no solamente cargas de viento sino tam-

bién comportamientos sísmicos. La flexibilidad de estas fachadas, lejos de ser un inconveniente, se ha visto como una ventaja ante cargas extremas como las de explosiones. Sobre estas acciones se han hecho también ensayos e investigaciones como la publicada en [3].

El desarrollo técnico en las últimas décadas tanto en aspectos afines como en cuestiones específicas de las fachadas soportadas por cables pretensados ha recibido gran atención. Gran parte de este conocimiento, no obstante, forma parte del know-how de los agentes implicados en el diseño y construcción de las fachadas como pueden ser los equipos de ingeniería especializada [25], [23], como en los fachadistas [4], de manera que no existe un corpus de conocimiento formalmente recopilado, sino una multitud de fuentes en forma de artículos, publicaciones y proyectos de los que puede extraerse información valiosa para el futuro desarrollo de nuevas soluciones.

2.4. Continuidad y evolución

El desarrollo de estas tipologías de fachadas es un proceso basado mayoritariamente en la continuidad. El proyecto de Hotel Kempinski, de 1993, constituye un caso fundacional de fachada de cables tensados de una capa sorprendentemente maduro en su resolución, que sirvió como punto de partida para otros proyectos posteriores que comparten muchas de las características que encontramos en este proyecto.

Fundamentalmente, las fachadas de cables tensados planas están formadas por una serie de cables verticales y horizontales que forman una retícula, en cuyas intersecciones encontramos las piezas de fijación que unen ambos cables y el vidrio de cerramiento. En el Hotel Kempinski esta retícula de 1,5 x 1,5 m aproximadamente. Este orden de magnitud es una constante en la evolución de estas fachadas, de modo que encontramos esta escala en la retícula en proyectos posteriores. Si se puede detectar, no obstante, una tendencia a incrementar paulatinamente el tamaño de los vidrios llegando a modulaciones mayores, y se ha experimentado con variaciones de la modulación en las que el tamaño de los vidrios se duplica ocupando dos cuadros de la retícula y pasa a tener seis anclajes en lugar de cuatro.

Las piezas de anclaje de los vidrios comparten las características fundamentales con aquellas diseñadas para el hotel en 1993, aunque con variaciones en la forma y con una tendencia a refinarse progresivamente el diseño de la pieza para reducir su impacto visual. En el proyecto de Markthall puede verse un ejemplo de refinamiento en el diseño de esta pieza, en tanto que en el proyecto de ThyssenKrupp se aprecia un ejemplo de anclaje más complejo en el que se aloja un vidrio doble de gran espesor con el uso de cables dobles en vertical. El proyecto original del Hotel Kempinski utilizaba anclajes en esquina para los vidrios, aunque ya eran conocidos los anclajes puntuales en perforaciones de vidrios como se había utilizado en Les Serres. Estos anclajes se introducirían también en las fachadas de cables tensados, como único anclaje o en combinación con los anclajes en esquina.

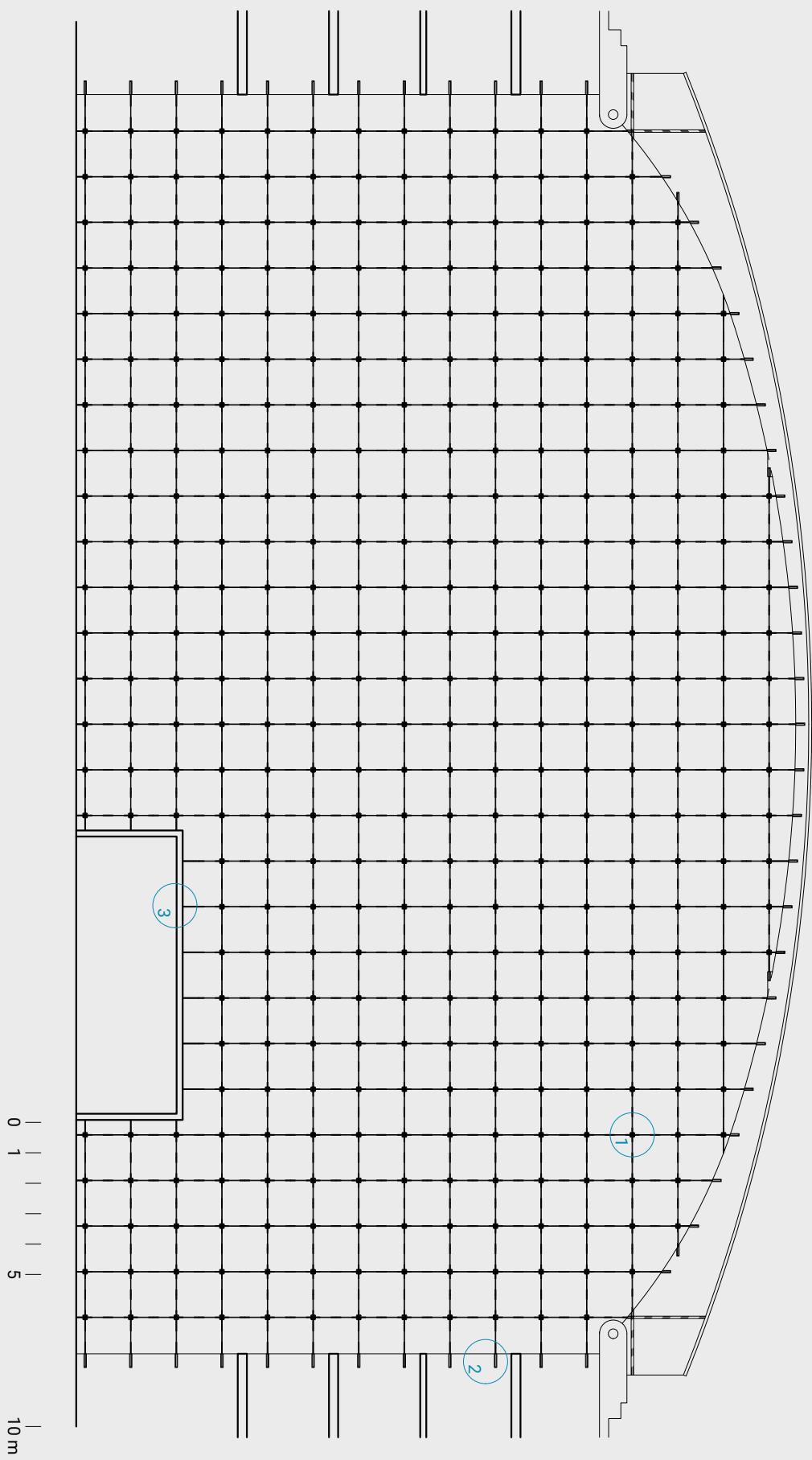
La disposición de los cables ha sido una constante en proyectos posteriores desde el inicio en 1993, si bien se han introducido variaciones como la duplicación de los cables verticales para reducir la deformación máxima de la fachada. La introducción de distintos órdenes de escala fue también una innovación en el

catálogo de soluciones posibles para llegar a escalas mayores. En las secciones utilizadas, el rango de diámetros entre 20 y 35 mm es una constante a lo largo de todos los proyectos, si bien puede detectarse una tendencia hacia el uso de valores cada vez mayores de pretensado en la búsqueda de dotar de una mayor rigidez a la estructura.

Una evolución clara ha sido la introducción de vidrios con cámara. En el proyecto de 1993 el vidrio es una hoja sencilla, aunque posteriormente se demostraría en otros proyectos la viabilidad de introducir vidrios dobles, proporcionando prestaciones térmicas a estas fachadas equiparables con las de cualquier otra fachada ligera convencional.

Plano 2.01

Alzado de fachada. Hotel Kempinsky, Munich



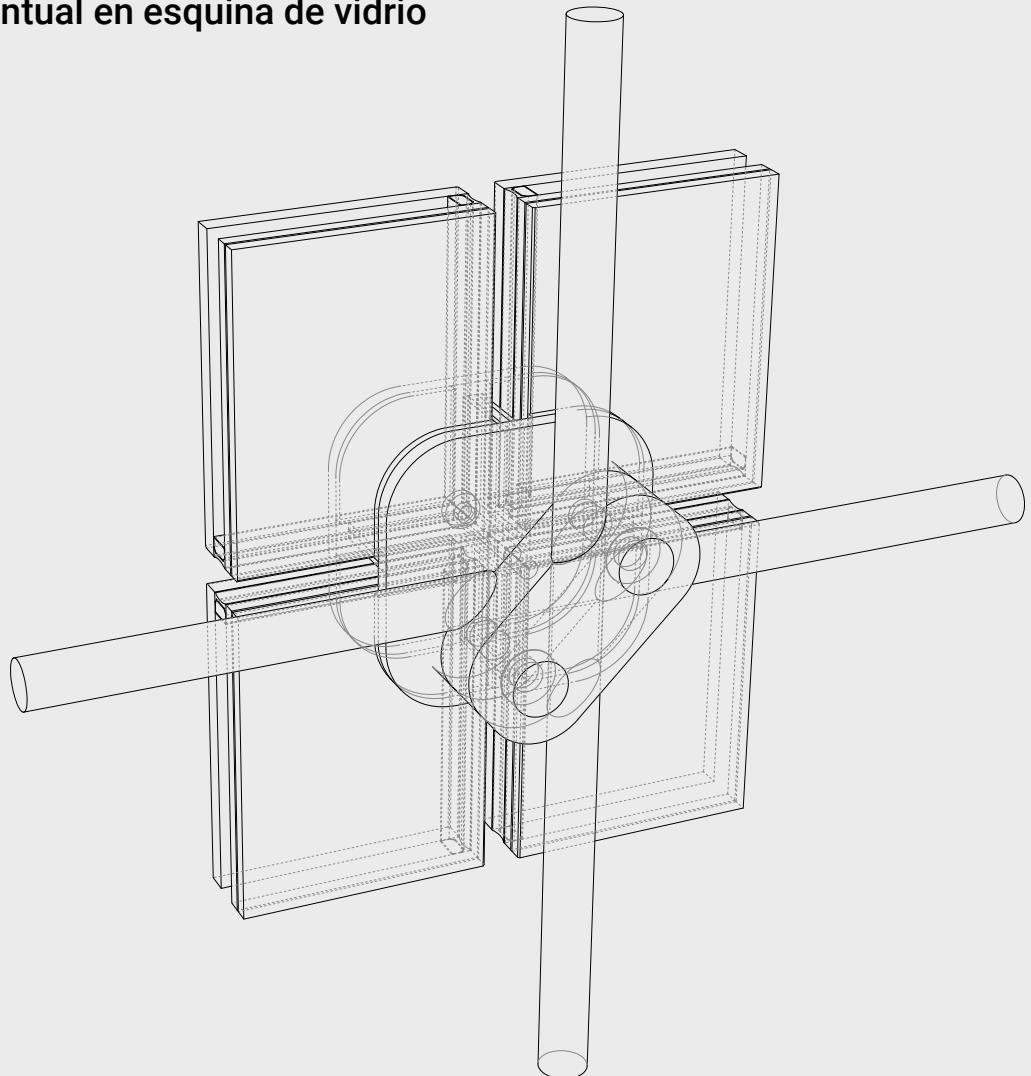
Alzado de fachada a partir de planos de proyecto publicados.
En el alzado se muestran los principales detalles tipo de esta
tipología de fachada:

1. Anclaje de vidrio
2. Anclaje de cable a edificio
3. Encuentro con puertas de acceso

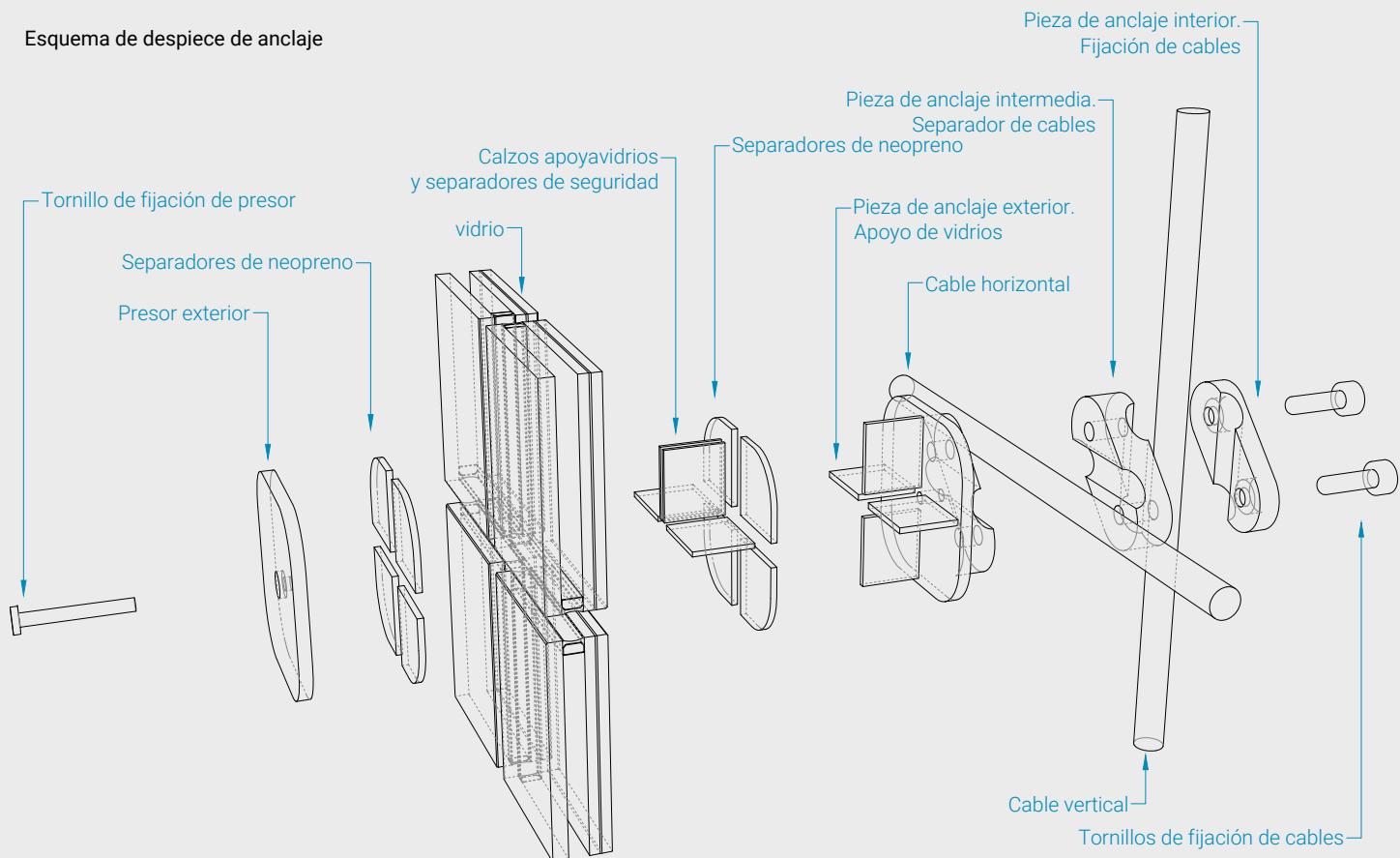
Plano 2.02

Esquema de anclaje puntual en esquina de vidrio

Vista interior de anclaje ensamblado

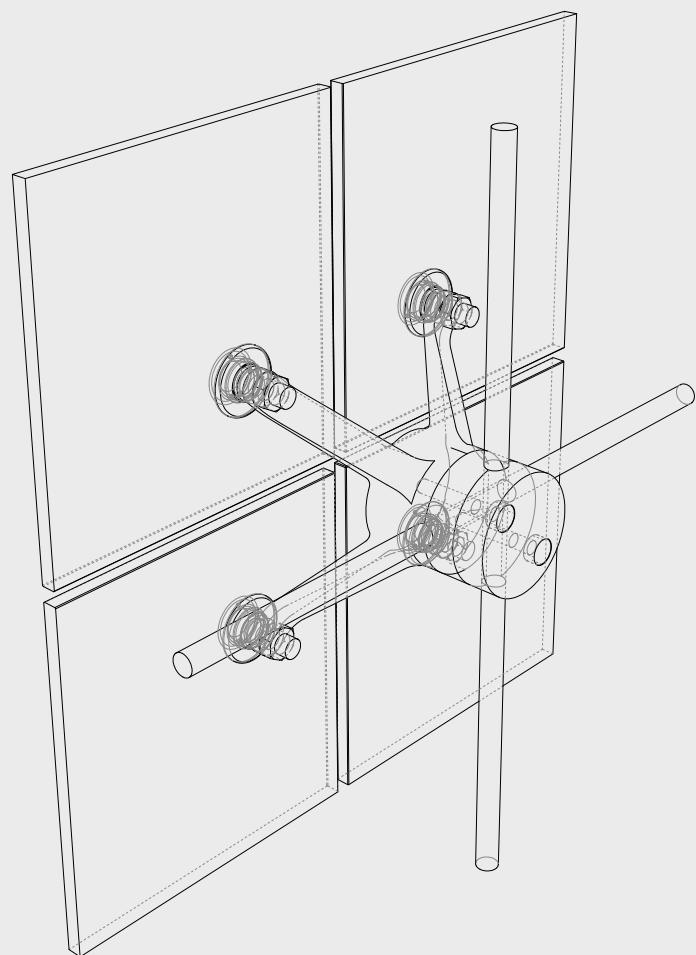


Esquema de despiece de anclaje

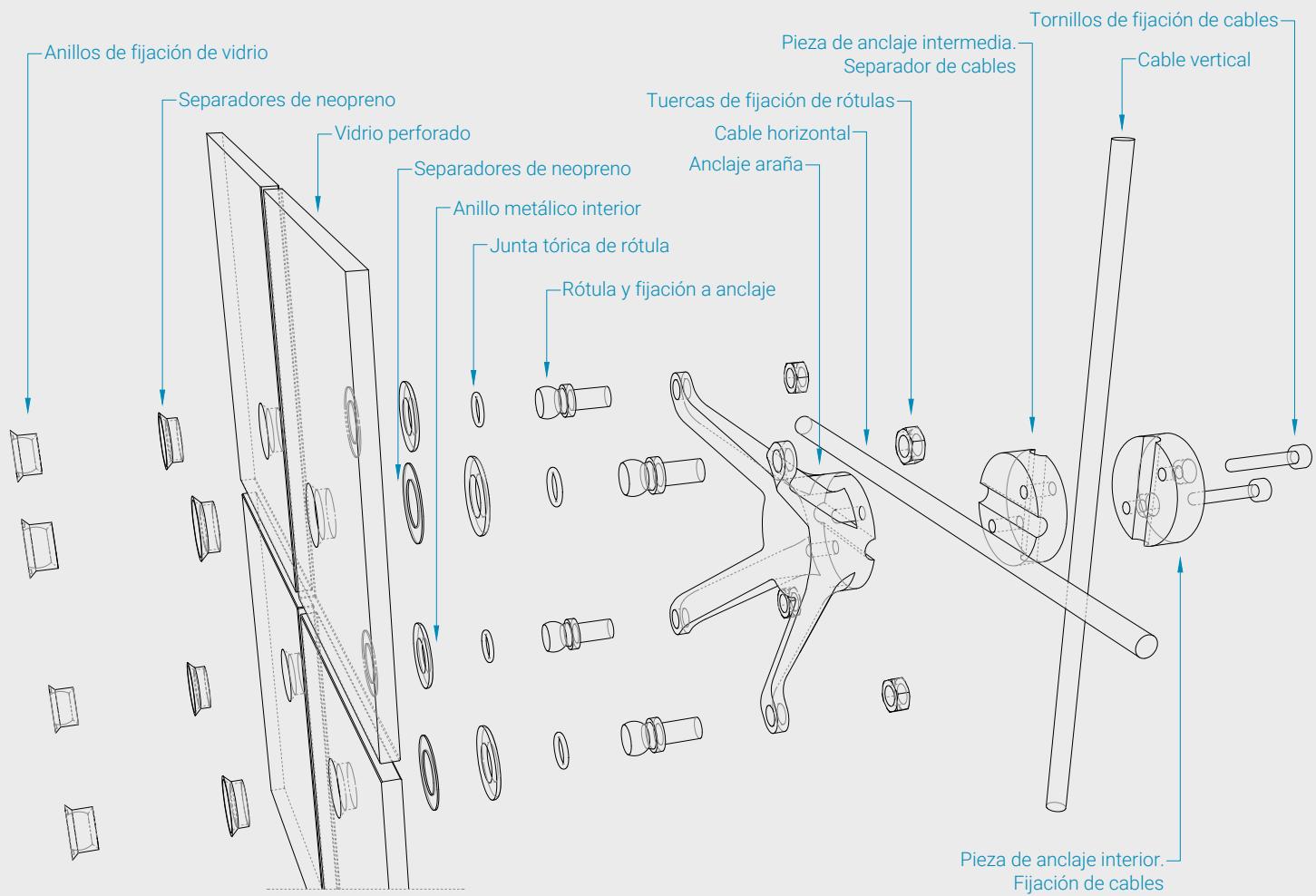


Esquema de anclaje puntual en perforación de vidrio

Vista interior de anclaje ensamblado

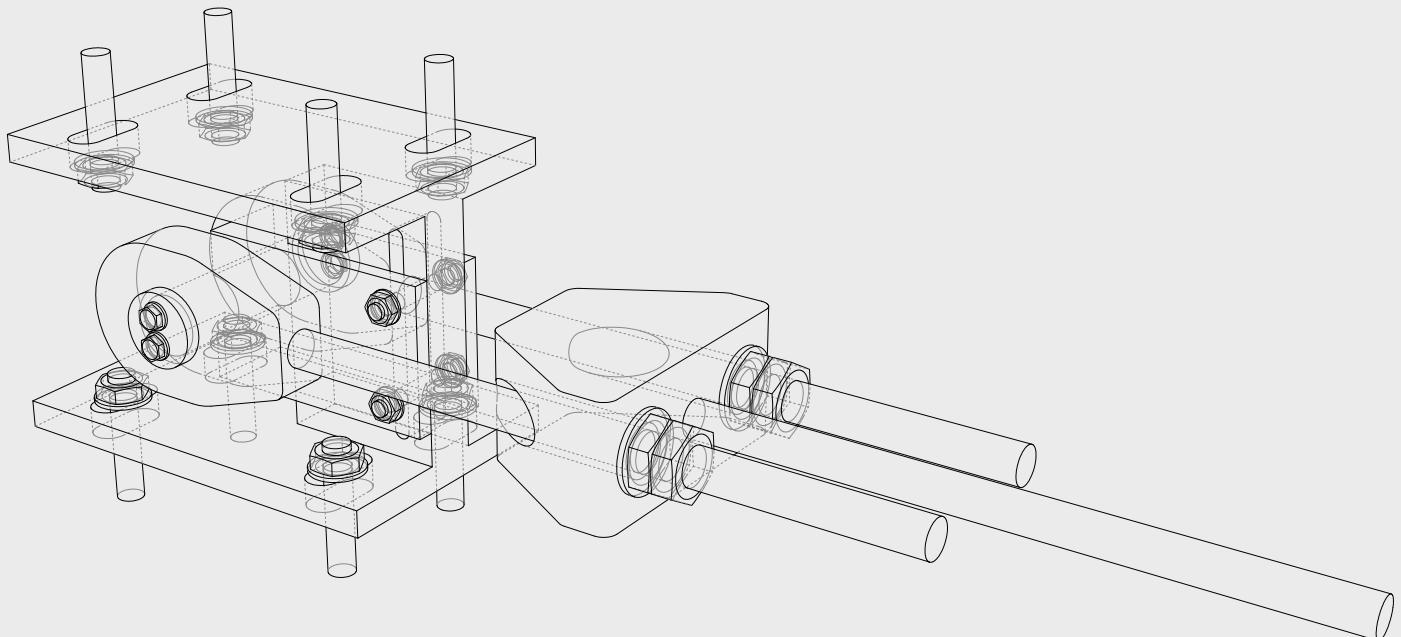


Esquema de despiece de anclaje

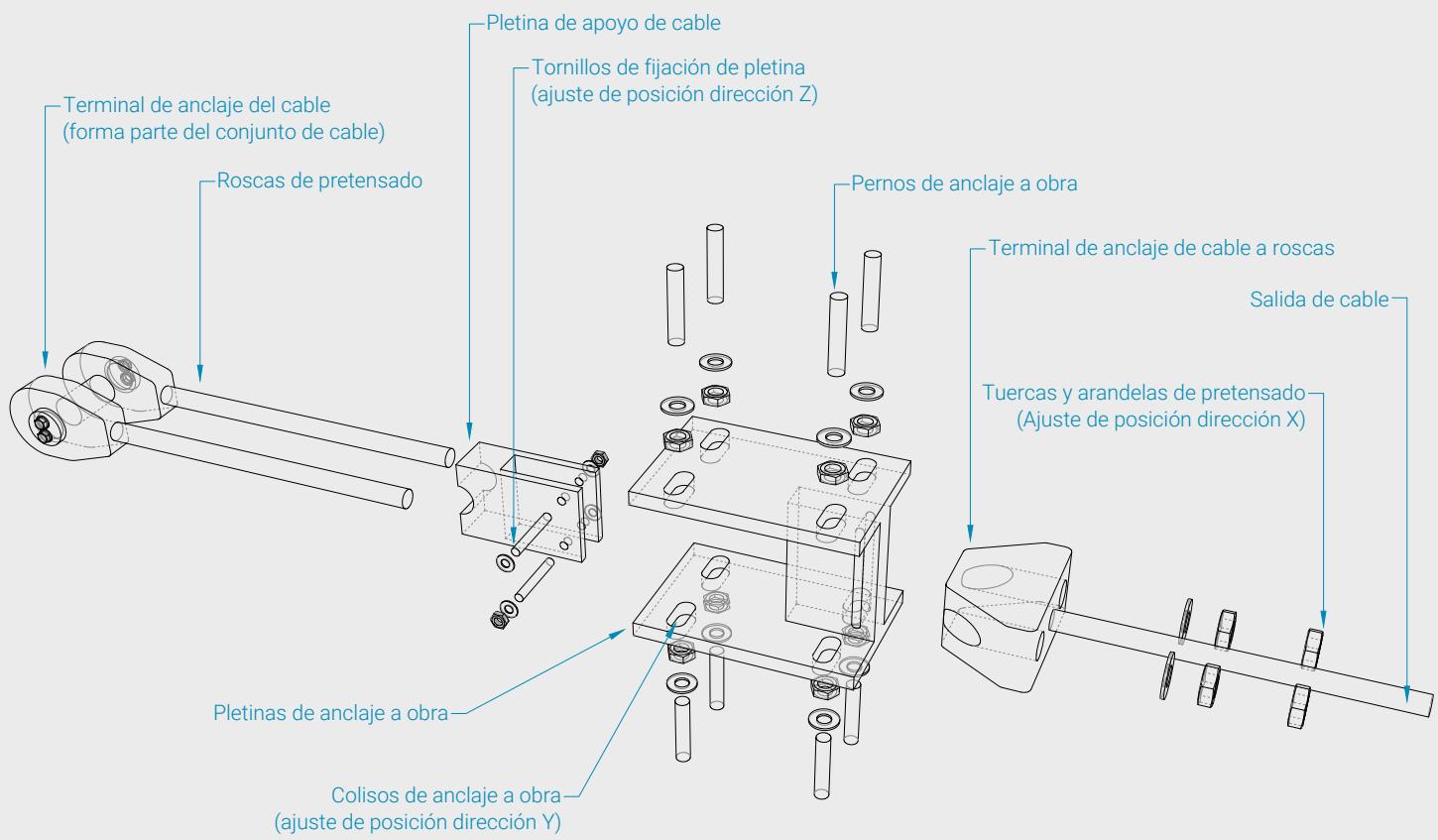


Esquema de un anclaje de cable pretensado a obra

Vista interior de anclaje ensamblado



Esquema de despiece de anclaje



3

Análisis mecánico y aspectos de diseño

En este capítulo se expone de manera general la herramienta de cálculo desarrollada para el análisis estructural de fachadas de cables tensados. A continuación se proporciona una explicación general del método de análisis y del proceso global para el trabajo de cálculo estructural. A continuación se exponen una serie de parámetros de diseño que forman parte de las variables a definir durante el proyecto de una fachada con estructura de cables. Estos parámetros se relacionan en mayor o menor medida, según las características de cada uno de ellos, con el comportamiento mecánico de la fachada. A través del cálculo, para el cual es de utilidad la herramienta desarrollada, es posible poner magnitud a las distintas variables que luego servirán para definir muchos de los parámetros indicados a continuación.

3.1. Los retos de las estructuras tensadas

Las estructuras formadas por cables tensados presentan una serie de singularidades que pueden añadir dificultad a su análisis con respecto al análisis de estructuras convencionales de edificación más rígidas.

En primer lugar, se trata de estructuras muy flexibles que salen del ámbito de las pequeñas deformaciones, de forma que los métodos de análisis habituales no sirven para abordar estructuras de este tipo. En segundo lugar, solamente ofrecen resistencia en esfuerzos a tracción pero no a compresión, y esto supone una dificultad adicional a la hora de analizar estructuras tensadas. Por otra parte, estas estructuras dependen de un pretensado inicial que tiene una relación compleja con la forma de la estructura. Como veremos a lo largo de los casos de estudio, forma y estado tensional de la estructura están estrechamente relacionados y es necesario en primer lugar encontrar un estado compatible entre tensiones y forma para conseguir una estructura viable.

Como podemos ver en los distintos tipos de estructuras, la clasificación de los tipos de fachadas se ha extendido teniendo en cuenta este comportamiento en la relación entre estado tensional y forma estructural. En la mayor parte de las fachadas con cables, al tratarse de estructuras contenidas en un plano, no existe como tal una relación entre estado tensional y forma global de la estructura.

En este tipo de casos, cada cable es responsable de su propia forma ya que se trata de líneas rectas entre sus puntos de apoyo, aunque se unan después en las intersecciones con los cables perpendiculares para colaborar entre los miembros de la estructura y proporcionar una respuesta conjunta a las acciones a las que se someten. Solamente a nivel local existe una relación entre el estado tensional y la forma de la estructura. En particular, existe una relación a nivel de cada cable entre su forma y su estado tensional, y esto excluiría incluso a los cables verticales. En efecto, un cable vertical no depende de su pretensado para obtener una forma inicial, ya que por su propio peso siempre forma de línea recta vertical. Un cable horizontal, por el contrario, sí depende de su estado de pretensado para adoptar la forma deseada, que generalmente suele ser la de una línea recta horizontal (o bien con inclinación, ya que esto aplica también a cualquier cable que tenga una inclinación fuera de la vertical).

La posibilidad de conseguir un cable perfectamente horizontal es un límite al que únicamente es posible acercarse, no alcanzarlo. En el anexo C, donde se hace la derivación de la ecuación de un cable y se extraen algunos resultados sobre el comportamiento de la unidad básica de estas estructuras, puede entenderse cómo el peso propio de un cable, en dirección vertical, no puede nunca equilibrarse con una reacción completamente horizontal en los extremos de un cable, y por tanto es necesaria cierta deformación que permita el equilibrio de fuerzas. Sin embargo, en tramos lo suficientemente pequeños es posible que la deformación del cable esté dentro de límites admisibles. Así, en una estructura de fachada formada por una cuadrícula los cables horizontales y verticales no se unen en sus intersecciones únicamente para dar apoyo al vidrio y para colaborar juntos en las acciones, sino también para proporcionar puntos de apoyo a los cables horizontales, de forma que su deformación se produce únicamente entre los tramos entre cables verticales.

En estructuras de fachadas con curvatura, sin embargo, la relación entre la forma de la estructura y el estado tensional de los cables que la componen es mucho más compleja y afecta a todo el conjunto de elementos y sus relaciones. De esta forma, no es posible en este caso decidir libremente la forma de la fachada, sino que es necesario encontrar una configuración compatible entre la forma y el pretensado de sus elementos, lo cual suele implicar un proceso iterativo de búsqueda que puede hacer más complejo el proceso de diseño y análisis de una estructura de este tipo.

3.2. Método de análisis de fachadas tensadas

En el ámbito de la disciplina de Arquitectura suele conocerse como métodos matriciales aquellos procedimientos de cálculo de estructuras que modelan sus partes a través de barras interconectadas entre sí con ciertas propiedades mecánicas, que bajo ciertos supuestos (comportamiento lineal de los materiales, pequeñas deformaciones, etc.) permiten establecer una relación entre las fuerzas aplicadas y la deformación de la estructura que da lugar a sistemas de ecuaciones organizados en forma matricial. En el ámbito del análisis estructural se trata de un caso particular de métodos de elementos finitos, en los que la estructura continua de la materia se modela como un conjunto finito de elementos, en este caso unidimensionales.

El análisis de fachadas de cables tensadas se lleva a cabo en este trabajo

siguiendo un método de elementos finitos para cálculos no lineales sobre el que veremos detalles a continuación, publicado en [6] y que cuenta con una exposición orientada a su implementación en software para la resolución numérica de estructuras.

La implementación de la herramienta de análisis se basa en el método citado, y consiste en última instancia en la resolución de un sistema de ecuaciones del tipo:

$$F = Kd \quad (3.1)$$

Es decir, un sistema de ecuaciones que relaciona las fuerzas aplicadas F a la estructura con las deformaciones que ocasionan d a través de una matriz K que contiene los términos de rigidez de los miembros de la estructura. En es caso de las estructuras que nos ocupan, sin embargo, existen las siguientes particularidades:

- La estructura es altamente flexible y producirá grandes deformaciones, de manera que el estado deformado supone cambios significativamente grandes en la geometría como para considerar que la aplicación de cargas permanece en una situación equivalente al estado inicial.
- La rigidez de la estructura no puede representarse por una matriz constante, ya que la rigidez de los cables varía incrementándose a medida que aumenta la tensión en los mismos.
- Los cables no tienen un comportamiento lineal a las cargas, ya que pueden soportar tracciones pero no soportan tensiones de compresión.

La forma de abordar el análisis teniendo en cuenta estas particularidades hace que la resolución de un sistema de ecuaciones de este tipo sea más complejo. El desarrollo de las ecuaciones del método y la referencia técnica del código que lo implementa pueden consultarse en los anexos correspondientes, sin embargo se describe a continuación de manera más general la forma en que es posible abordar el análisis de estructuras con estas particularidades.

En primer lugar, las grandes deformaciones de la estructura se abordan de forma que la aplicación de las cargas se produce de manera progresiva, a través de una serie de pasos incrementales. La carga total aplicada a la estructura se divide en una serie de pasos, cuyo número depende de la dificultad para la resolución de la estructura (en los casos de estudio se aplicaron números de pasos variables entre 2000 y 15000 pasos) y con la aplicación de cada paso se calcula la deformación de la estructura. Esta aplicación de una carga de pequeña magnitud producirá una deformación relativamente pequeña que sí es posible aproximar mediante la resolución de un sistema de ecuaciones del tipo citado. Una vez hallada la configuración deformada se aplica a la estructura y se aplica un nuevo paso de carga, de modo que la estructura puede ir deformándose progresivamente y su equilibrio de fuerzas externas y tensiones tiene en cuenta el estado real deformado anterior.

EN segundo lugar, la rigidez de la estructura se aborda a través de la formulación de la matriz de rigidez de la estructura. La matriz contiene términos que dependen de la tensión de la estructura. En una resolución lineal común, la aplicación de una carga produce una deformación proporcional y ciertas tensiones en los miembros de la estructura. En este caso, la aplicación del sistema de

ecuaciones produce un desequilibrio entre las cargas exteriores y las tensiones, de modo que es necesario aplicar un proceso iterativo, en el que se ajusta en cada paso la rigidez de la estructura (esto es, se recalcula de nuevo la matriz de rigidez) de modo que cada vez se acerque más al equilibrio entre las fuerzas externas aplicadas y las tensiones internas. Al tratarse de un proceso iterativo de ajuste se define un umbral a partir del cual se estima que la estructura ha alcanzado el equilibrio.

En tercer lugar, el comportamiento de los cables se comprueba definiendo en el método un indicador para cada uno de los miembros que forman parte de la estructura. Para aquellos miembros que están definidos como cables se comprueba en cada paso si entran en estado de compresión, y en este caso son eliminados de la estructura ya que dejarían de trabajar en este caso. En el método implementado es posible definir para cada barra si se trata de un cable o no, de modo que es posible introducir también elementos estructurales capaces de soportar compresiones.

Estas circunstancias hacen que el proceso de cálculo sea mucho más costoso que la resolución de un sistema matricial elástico común. La resolución de una estructura implica al menos la resolución de n sistemas de ecuaciones, donde n son los pasos en los que se divide la carga (valor que se decide al ejecutar un cálculo), multiplicado por las iteraciones que en cada paso sean necesarias para alcanzar el equilibrio en el cálculo.

Este procedimiento es una estrategia común a la hora de abordar estructuras no lineales. Como análisis no lineal que es, debe tenerse en cuenta que este método está sujeto siempre a la posibilidad de que el cálculo no sea exitoso por una serie amplia de motivos, desde configuraciones de la estructura que no son posibles resolver, a elecciones de la configuración de la propia resolución que no dan resultado, a cuestiones técnicas acerca de la resolución numérica de las matrices que pueden estar relacionadas con múltiples motivos tanto matemáticos como numéricos relacionados con la capacidad de manejo de precisión numérica de un ordenador. Todos estos factores hacen que en análisis de una estructura pueda llevar desde varios minutos a varias horas, debido a la cantidad intensiva de operaciones necesaria.

3.3. Implementación del método de análisis

La herramienta FTES de cálculo consiste en un código escrito en Python que no dispone de interfaz gráfica. Su uso es posible a través de pequeños scripts que permiten introducir los datos, lanzar el cálculo y obtener los resultados. En las secciones siguientes se da una pequeña descripción del uso de la herramienta al tiempo que se describe de manera general el proceso de preprocesado, procesado y postprocesado que se lleva a cabo en un proceso de análisis estructural.

3.3.1. Software y herramientas para el desarrollo y uso de FTES

Python es el lenguaje de programación de base utilizado para la implementación del método de análisis de estructuras FTES. Python es un lenguaje de programación de uso muy extendido en diversos ámbitos científicos. Se trata de un lenguaje moderno, creado en los años 80 por Guido Van Rossum como

lenguaje interpretado, con el objetivo de ser una herramienta fácil y rápida, enfocada en la legibilidad del código, la posibilidad de funcionar en diversos contextos y el ser una herramienta abierta.

En este trabajo se ha utilizado Python debido a las siguientes ventajas:

- Python es un lenguaje interpretado. Esto quiere decir que el código puede ejecutarse y funcionar directamente una vez que se ha escrito. En contraposición a los lenguajes compilados usuales, que necesitan una serie de pasos para generar un programa ejecutable en un proceso mucho más laborioso, los lenguajes interpretados permiten un trabajo ágil de prototipado al posibilitar la prueba del código al mismo tiempo que se escribe y se modifica.
- Python es un lenguaje fácil de comprender y de aprender. Al tratarse de un lenguaje interpretado, cuya ejecución se hace a partir directamente del texto del código, es posible inspeccionar el código y, en caso necesario, modificarlo o completarlo con las necesidades de cada caso. Producir una herramienta lo suficientemente genérica y modificable es un objetivo interesante en este trabajo, ya que la facilidad para poder adaptar las herramientas para cada caso es un valor adicional.
- Python es un lenguaje de código abierto, así como las herramientas necesarias para poder trabajar en este lenguaje, de forma que la ejecución de este código no implica una inversión económica.
- Python dispone de una enorme variedad de librerías para ampliar las funciones a las más diversas tareas, desde herramientas para el cálculo matemático hasta herramientas para la importación, manejo de datos y exportación, o librerías para el trabajo con archivos de CAD.
- Python puede ejecutarse en cualquier contexto ya que al tratarse de un lenguaje interpretado, no es específico de un dispositivo o sistema operativo.
- El aspecto del código y la manera en que se trabaja con Python puede recordar claramente a otras herramientas usuales en ámbitos científicos como puede ser Matlab.

Como lenguaje interpretado, es necesario que este lenguaje se ejecute en un entorno de desarrollo que pueda leer el código. Como software de base para todo el conjunto de elementos necesario para el trabajo con Python se ha utilizado Anaconda (www.anaconda.com), un paquete de programas que contiene tanto el intérprete de Python como sus librerías y su entorno de desarrollo integrado, Spyder, que tiene el aspecto mostrado en 3.1

Las librerías utilizadas en el desarrollo de esta herramienta son algunas de las más comunes en Python:

- Numpy. Librería científica que proporciona posibilidades de trabajo con vectores, matrices y cálculos matemáticos
- Pandas. Librería de análisis de datos, utilizada principalmente para el almacenado, importación y exportación de datos.

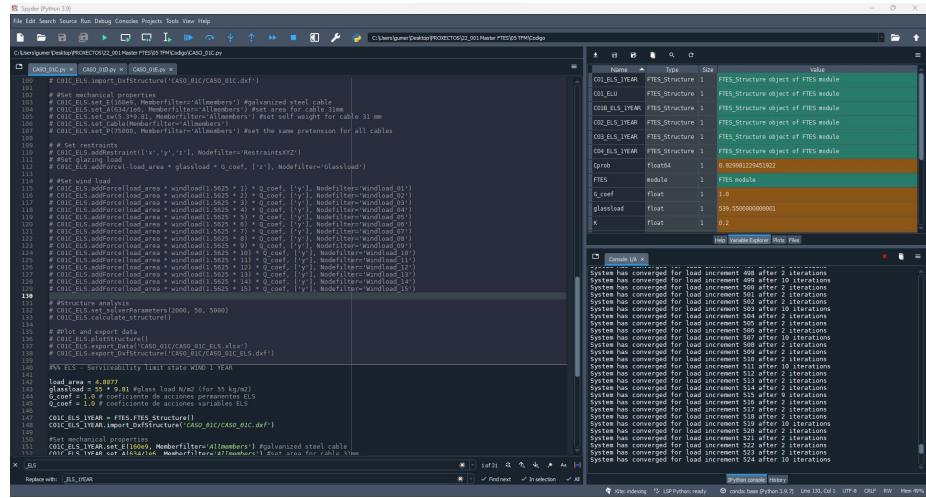


Fig. 3.1: Entorno de desarrollo (IDE) Spyder, parte del parquete de software Anaconda. En la aplicación puede verse una ventana de código a la izquierda, un explorador de variables en la zona superior derecha y los mensajes del intérprete durante la ejecución de un cálculo en la zona inferior derecha. El aspecto de la aplicación recuerda a programas de cálculo científico como Matlab.

- Matplotlib. Librería para la representación gráfica de datos. Con esta librería se generan algunos de los gráficos de las estructuras, así como las diversas gráficas que aparecen en este trabajo.
- Ezdxf. Librería para la lectura y escritura de archivos DXF de Cad. Esta librería posibilita la lectura de datos a través de archivos de AutoCAD, así como la exportación de la geometría de estructura calculada.

La generación o lectura de datos precisa además de otro software, principalmente:

- Blender. Software Open Source de diseño 3D con el que inicialmente se implementó la introducción de datos de geometría de la estructura al código.
- LibreOffice. Software Open Source a través del cual es posible leer los archivos de hoja de cálculo XLSX generados como resultado del cálculo. En el código se introdujo también la posibilidad de describir la estructura por medio de tablas en archivos CSV que contienen las coordenadas de los nudos de la estructura y los esquemas de conexión de sus miembros.
- Autodesk AutoCAD.

3.4. Proceso de trabajo

El proceso de análisis consta de los tres pasos habituales de preprocesado, procesado y postprocesado. El primero consiste en la preparación de los datos para el cálculo. En el procesado se hace el análisis propiamente y se obtienen

datos. A partir de estos datos y mediante transformaciones y cálculos de datos derivados se obtienen indicadores de utilidad para la comprobación y toma de decisiones durante el proyecto.

3.4.1. Preprocesado. Definición de la estructura

Durante el desarrollo del programa se ha tratado de facilitar en la medida de lo posible la agilidad y usabilidad, dentro de los límites que permite un software de este carácter sin interfaz gráfica. Inicialmente se planteó la posibilidad de modelar desde Blender, un programa Open Source para modelado de geometría 3D. A través de este software es posible exportar archivos CSV que contienen la información de la estructura.

A efectos de su descripción para introducir una estructura en un software de cálculo, la estructura se introduce como:

- Un listado de coordenadas X,Y,Z de puntos que forman los nodos de la estructura.
- Un listado de elementos descritos por dos números, que representan el número del nodo donde empieza y termina el elemento de la estructura.

De manera que para describir una estructura basta con una tabla de tres columnas, en la que cada fila representa un punto con tres datos de coordenadas X,Y,Z, y otra tabla que representa el listado de barras con dos columnas representando el número de nodo donde empieza y termina esta barra. A partir de esta descripción es necesario definir el resto de datos habituales (restricciones, propiedades mecánicas, aplicación de fuerzas) para completar la información necesaria.

Aunque esta definición es sencilla en concepto, el manejo de datos puede bloquear la operatividad en estructuras complejas, de modo que uno de los puntos importantes fue la búsqueda de un sistema que permitiese dentro de lo posible simplificar el proceso de cara a poder utilizar la herramienta de forma ágil en el proceso de diseño y toma de decisiones. Una manera operativa y ágil de introducir los datos necesarios en la estructura se ha encontrado a través del trabajo con archivos en CAD como se describe a continuación.

A través de un archivo DXF de Cad es posible definir la geometría de la estructura de forma visual. El dibujo en CAD es un mecanismo que resulta familiar en el desarrollo de proyectos por lo que crear un modelo con la geometría deseada es un proceso fácil. Para evitar la necesidad de identificar los elementos y nodos de la estructura a través de su numeración, lo que resultaría tedioso, se ha diseñado un sistema de filtros que permite identificar las partes que se desea en la estructura para aplicarle propiedades, sin que sea necesario identificarlos en una tabla numérica. De esta forma, gráficamente es posible identificar los elementos de la estructura para luego definir en el código la información que debe aplicarse.

Así, la definición de la estructura pasa por la creación de un archivo DXF que contiene la geometría representada por líneas que se conectan a través de sus extremos. Esta geometría debe estar formada por líneas que deben dibujarse en la capa 0. La conexión entre elementos se detecta automáticamente, pero las líneas representadas solamente pueden intersecar con otras en sus extremos. Esto se debe a que, de esta forma, es posible representar líneas que se cruzan

en el dibujo pero que no necesariamente deben conectarse entre sí en el modelo de estructura. Por ejemplo, en el caso de representar cruces de arriostramiento formadas por dos barras cruzadas entre sí, es posible dibujar dos líneas en "X" sin que el punto medio donde se cruzan se entienda como un nodo de la estructura. De esta forma, las dos barras pueden funcionar independientemente como lo harían en la estructura real (en caso de que se quisiese modelar una intersección entre estos dos elementos, bastaría con representar la cruz en "X" con cuatro barras cuyo punto final está en la intersección de la cruz).

A partir de la geometría es posible ahora representar información adicional para definir después propiedades de la estructura. Se ha ideado para esto el concepto de "filtro", que consiste en representar en el archivo de CAD información sobre la geometría para poder identificar los nodos o elementos a los que nos interesa aplicar información. Esto se hace por medio del dibujo en capas en el CAD con ciertas características. Así, tendremos la posibilidad de definir "Node filters" que contienen nodos, "Member filters" que contienen barras o "Glazing filters" que contienen identificación de unidades de vidrio. Para especificar los elementos etiquetados dentro de un filtro los identificaremos de la siguiente forma:

- Node filters. Las capas cuyo nombre comienza con NF_ se identifican con filtros de puntos. El modelo de estructura identificará cualquier punto dibujado en el DXF y que coincida con un nodo de la estructura como nodo dentro del filtro con el nombre de la capa. Así, una capa con el nombre NF_apoyos identificará los puntos dibujados en esta capa con una etiqueta llamada apoyos.
- Member filters. De la misma forma, las capas que comienzan con MF_ se identificarán con filtros de barras. El modelo identificará cualquier línea en una capa de este tipo, que coincide en posición con una barra de estructura, como un elemento dentro del filtro con el nombre indicado. Así, la capa "MF_cablesverticales" buscará líneas para crear un grupo de elementos llamado cablesverticales".
- Glazing filters. Las capas cuyo nombre comienza con GF_ se identifican con acristalamientos. En este caso se identificará un acristalamiento por cada capa. La definición de una unidad de vidrio se hace a través de cuatro puntos que representan sus esquinas, que se dibujan en el DXF en la capa correspondiente.

De esta forma es posible en el archivo DXF definir la geometría de la estructura e identificar subgrupos de nodos y elementos a los que aplicaremos la información necesaria para terminar el preprocesado de la estructura.

Una vez importada la información a través de `import_DxfStructure` se aplica el resto de información necesaria para poder proceder a un análisis estructural.

Sobre los nodos de la estructura pueden aplicarse las siguientes acciones:

- **addRestraint.** Añade una restricción a los nudos indicados y en el eje indicado, X, Y o Z. Los nudos a los que puede aplicarse la restricción pueden indicarse mediante los filtros de nodos descritos.

- **addForce.** Añade una fuerza en los nudos indicados, en la dirección X, Y o Z que se indique. Igualmente pueden utilizarse los filtros de nodos para definir a qué puntos afecta la definición.

Sobre los elementos de la estructura pueden aplicarse las siguientes definiciones. En todos los casos a continuación, al igual que en los anteriores, puede aplicarse la definición de "filtros de miembros" que se definieron en el archivo CAD.

- **set_P.** Establece el valor de pretensado de los elementos seleccionados.
- **set_A.** Establece el área de sección de los elementos seleccionados.
- **set_E.** Establece el módulo de Young de los elementos seleccionados.
- **set_sw.** Establece el peso propio por unidad de longitud de los elementos seleccionados.
- **set_cable.** Define los elementos seleccionados como cables.
- **set_Bar.** Define los elementos seleccionados como barras.

Finalmente, es posible configurar los parámetros de resolución del sistema mediante **set_solverParameters** con el que definimos el número de pasos en los que se divide la aplicación de carga, el umbral de equilibrio y el número máximo de iteraciones hasta detener el cálculo en caso de que las iteraciones no lleguen a resolver el sistema.

Una vez establecida la configuración puede procederse al procesado mediante **calculateStructure**.

3.4.2. Procesado

El modelo de estructura para el cálculo consta de un conjunto de elementos que representan la estructura real a través de las propiedades que consideramos relevantes. En este caso los elementos son barras unidimensionales rectas, definidas por sus dos puntos extremos. Cada uno de los elementos que forman la estructura posee las siguientes propiedades:

- Área de la sección
- Módulo de Young del material
- Pretensado
- Tipo de barra (convencional o tipo cable, que no soporta compresiones)
- Longitud
- Peso propio

Por su parte, los nodos de la estructura contienen las siguientes propiedades:

- Coordenadas del punto (X,Y,Z)
- Restricción al movimiento en cada dirección X, Y, Z

- Fuerza aplicada en cada dirección X, Y, Z

A partir de la información introducida se inicia el proceso de cálculo construyendo un sistema de ecuaciones con 6 ecuaciones para cada elemento de la estructura. Cada barra se define por las tres coordenadas de los nodos de sus extremos:

$$F = \begin{vmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \\ F_{jx} \\ F_{jy} \\ F_{jz} \end{vmatrix}, d = \begin{vmatrix} d_{ix} \\ d_{iy} \\ d_{iz} \\ d_{jx} \\ d_{jy} \\ d_{jz} \end{vmatrix}, \quad (3.2)$$

La parte de proceso consiste en la transformación de los datos introducidos para construir el sistema de ecuaciones, resolver de manera iterativa el sistema según se ha descrito anteriormente para cada incremento de carga y para cada iteración hasta alcanzar el equilibrio, y una vez terminado el proceso se obtienen los valores incógnita del sistema de ecuaciones, que son las coordenadas de los desplazamientos de los nudos de la estructura. A partir de estos datos puede comenzar el postprocesado para extraer datos relevantes para nuestro objetivo.

3.4.3. Postprocesado

El postprocesado incluye todo el trabajo de extracción de datos para su análisis y toma de decisiones. El resultado del análisis se extrae en un plano DXF que contiene la geometría deformada de la estructura, y un archivo XLS que contiene todos los datos postprocesados por defecto sobre la estructura calculada. En la figura 3.2 puede verse un ejemplo de salida en CAD obtenida del análisis de una estructura, y en los anexos se recoge información más completa acerca como ejemplo de preprocesado introducido para un cálculo e información obtenida.

Entre los datos exportados en tablas se encuentra la siguiente información:

- Información inicial de la estructura: Coordenadas de nodos e información de los elementos con indicación de sus nodos inicial y final.
- Información inicial para el cálculo introducida sobre la estructura: datos mecánicos de cada elemento (área, longitud, módulo de elasticidad, pretensado, definición como cable o barra) y de cada nodo (fuerza aplicada o restricción al movimiento).
- Información de los elementos calculada: longitud deformada, fuerza en cada elemento, tensión.
- Información de los nodos calculada: desplazamiento en X,Y,Z, desplazamientos calculados para los distintos planos y desplazamiento total, coordenadas finales del nodo desplazado, reacciones en los ejes X,Y,Z para los nodos definidos como restringidos.

Esta información se proporciona en las tablas "Nodes info" "Members info". Se proporcionan otras dos tablas de datos además, ".Angles variations" "Glazing

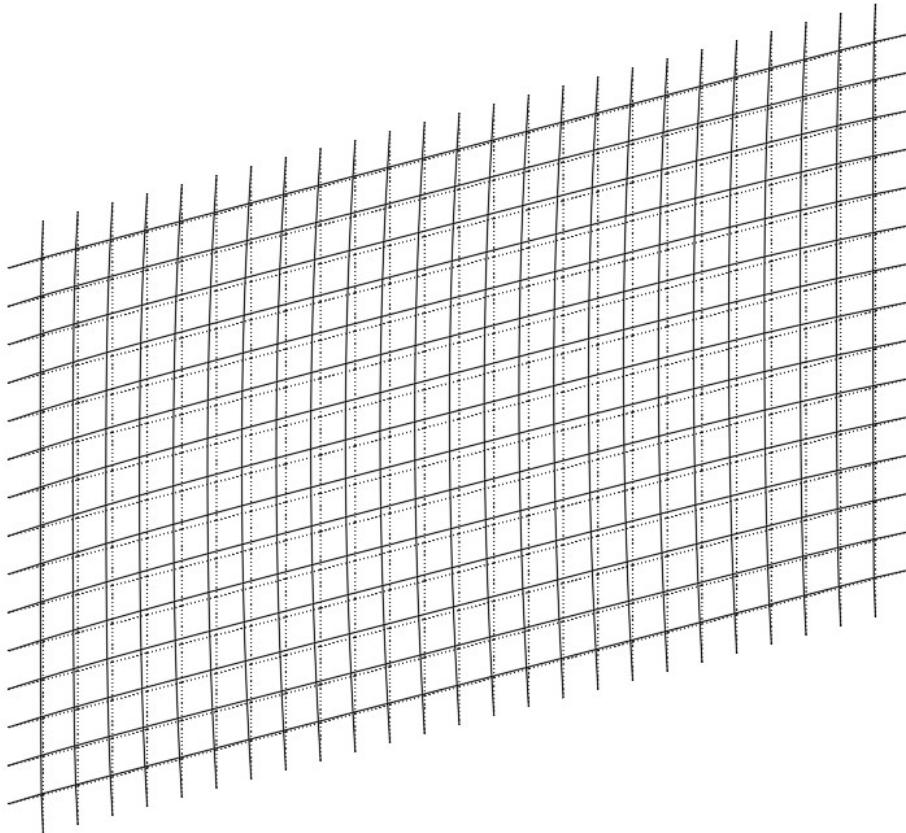


Fig. 3.2: Vista 3D de una estructura representada en estado deformado tras un cálculo. Cabe destacar que la deformada está representada a escala natural, sin aplicar ningún factor de escala.

deviation”. La primera proporciona información acerca de la variación de ángulo que se produce en los nudos de la estructura. Para cada nudo se analizan los elementos que inicialmente forman 180 grados entre sí, es decir, que forman parte de un cable que interseca en el nudo, y da el valor del ángulo que forman los dos tramos de cable una vez deformado. La segunda tabla, por su parte, da información acerca de los paños definidos como acristalamientos mediante los filtros GL_.

Los filtros de acristalamientos definen piezas de vidrio por medio de sus cuatro vértices. En el postprocesado se analizan estos cuatro vértices considerando que tres de ellos forman un plano, y se calcula la desviación del cuarto punto con respecto a los tres primeros. Esto puede dar una idea de a qué condiciones pueden estar sometidos los vidrios en la estructura. Se da además una métrica que depende de la relación entre el desplazamiento del vértice del vidrio y el tamaño del mismo, a modo de ángulo de deformación, de forma que permite comparar y establecer criterios comunes para vidrios de diferente tamaño.

Estas tablas pueden manejarse fácilmente a través de un software de hojas de cálculo, de forma que es posible aplicar nuevos cálculos sobre los datos pro-

porcionados, e incluso sería posible modificar el propio código de la herramienta FTES para proporcionar otros datos de postprocesado.

En todo el proceso no ha entrado en juego la identificación de los distintos nodos y elementos por su numeración, ya que toda la definición se hace a través de dibujo en CAD. El proceso de numeración se hace en el programa de manera automática y el resultado puede consultarse a través de la función **plotStructure** que da una representación gráfica de la estructura señalando la numeración de vértices y elementos. Se han implementado funcionalidades básicas para poder filtrar y señalar filtros de nodos o de miembros para poder facilitar la identificación. En la figura 3.3 puede verse un ejemplo de esta representación, que en pantalla permite navegar ampliando y moviendo la imagen para identificar correctamente la numeración.

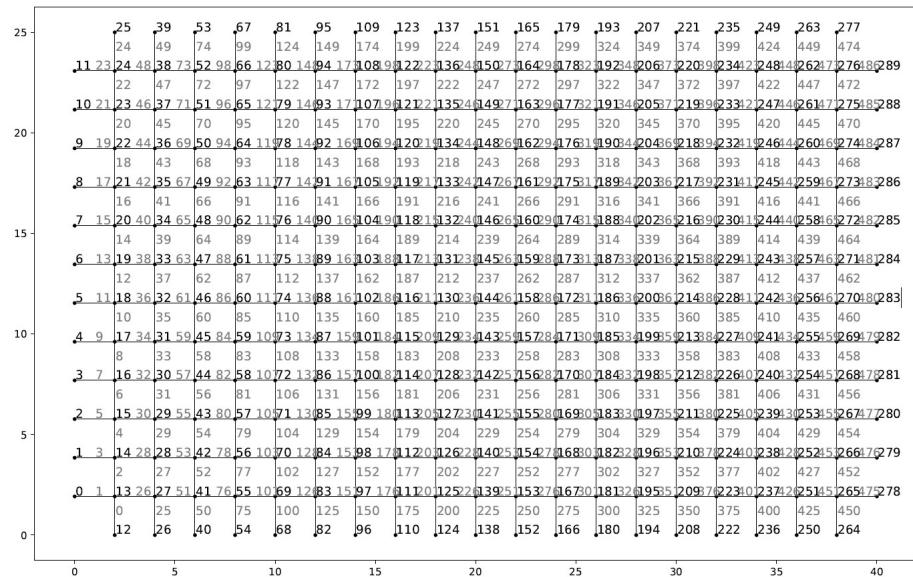


Fig. 3.3: Representación gráfica de la estructura por la herramienta FTES indicando la numeración de nodos y elementos.

3.5. Parámetros de diseño de fachada

A través del estudio de la evolución y estado de la técnica se han podido identificar una serie de parámetros que deben ser decididos o diseñados durante el proceso de proyecto de fachada. A diferencia de lo que sucede con el uso de sistemas comerciales de amplia difusión, como pueden ser los muros cortina Stick, en los que muchos de los parámetros están diseñados y probados durante la fase de desarrollo de producto de un sistemista, en el proyecto de una fachada estructural todas las variables posibles están por decidir.

Las fachadas soportadas por cables tienen la particularidad de el conjunto constructivo está formado por un pequeño número de elementos de pequeño tamaño, que concentran en su diseño todos los requisitos que habitualmente se atribuyen a cualquier fachada, y con la particularidad además de que se trata

de fachadas con una enorme flexibilidad y capacidad para deformarse. Por ello, el comportamiento mecánico de la fachada está ligado de manera muy estrecha al diseño de los elementos que forman la estructura.

En los puntos a continuación se indican algunos de los principales parámetros que forman parte del conjunto de decisiones que se determinan durante el desarrollo de una solución de fachada. En cada caso se indica además su relación con el funcionamiento mecánico de la estructura de fachada y cómo el análisis estructural ayuda a definir la manera en que se determina cada parámetro. Las letras en cada caso hacen referencia a las indicaciones en los planos al final del capítulo.

3.5.1. Parámetros que afectan de manera global a la fachada

Estos parámetros se refieren a la fachada en su conjunto y pueden situarse sobre el plano de fachada.

AA. Dimensiones generales de fachada

Las dimensiones generales de fachada constituyen el parámetro más general y que ayuda en primer lugar a establecer la escala de la solución y opciones posibles. Así, por ejemplo, existirán dimensiones a partir de las cuales no es viable diseñar una fachada de cables en una sola dirección por la magnitud de los movimientos que se producen. Como se vio en el capítulo dos, escalas muy grandes pueden llevar al diseño de soluciones como establecer distintos órdenes de magnitud en los cables.

AB. Distancia entre cables verticales

La modulación de fachada es uno de los parámetros que influye de manera más clara en las características generales y apariencia del conjunto. La distancia entre cables marcará la modulación de ancho de vidrios, que generalmente será igual al ancho entre cables (aunque pueden darse modulaciones al doble de espacio).

Los cables verticales siempre son indispensables independientemente de que se diseñe una fachada con o sin cables horizontales. Estos cables se ocupan principalmente para soportar el peso propio de vidrio.

La decisión de ancho entre cables se define en función de las posibilidades de acristalamiento. A mayor separación entre cables mayor desplazamiento se dará en cada vidrio fuera de su plano. Por otra parte, la separación entre cables marca también la concentración de esfuerzos que se dará en los anclajes.

Esta separación entre cables verticales está relacionada también con los esfuerzos que soportará cada elemento, por lo que una mayor separación tenderá a requerir cables de diámetro mayor.

AC. Distancia entre cables horizontales

De manera similar al parámetro anterior, la separación horizontal entre cables marcará en general la modulación de alturas de vidrios. Los cables horizontales se ocupan con frecuencia para soportar la carga de viento debido a la

mayor facilidad para proporcionar valores altos de pretensado, al ser más fácil absorber estos esfuerzos en los planos de los forjados colindantes con la fachada.

Es posible prescindir de cables horizontales. En este caso, debe tenerse en cuenta que la fachada formada por cables verticales no solamente debe controlar su deformación, sino también posibles efectos de desestabilización ya que no existe un elemento, aparte de los paños de vidrio, que asegure la equidistancia entre cables verticales.

AD. Deformación máxima de cables horizontales

En los cables horizontales existe además una limitación adicional de deformación. Los cables verticales, por su posición, mantienen su forma rectilínea para cualquier valor de pretensado. Para cualquier cable no vertical, sin embargo, siempre existe una cierta flecha ya que es inherente al propio equilibrio de fuerzas entre el peso propio del cable y las reacciones en sus apoyos. Así, un cable no vertical formará siempre una catenaria para la cual es necesario decidir un valor máximo de deformación. Este factor limita la longitud máxima entre apoyos, y, por tanto, condiciona también la distancia entre cables verticales. Para distancias pequeñas del orden de 1,5 - 2 m de longitud esta deformación es despreciable, pero teniendo en cuenta que el cable horizontal se dispone en paralelo al vidrio, un valor pequeño de deformación puede resultar apreciable por comparación a la línea recta que forma el sellado entre vidrios.

Los cables horizontales, por tanto, apoyan cada uno de sus tramos en los cables verticales, de modo que cada anclaje de vidrio sirve además para que el peso propio del cable horizontal descansen en el vertical limitando su deformación. Por este motivo, en los distintos proyectos analizados los cables verticales pasan siempre por detrás de los cables verticales de forma que, visto en sección un anclaje, en su parte delantera soporta el peso propio de vidrio y en la trasera el peso propio del cable horizontal, quedando el cable vertical en el medio para producir la reacción a estas dos cargas. Si el cable horizontal estuviera entre el vidrio y el cable trasero ambas cargas estarían del mismo lado del cable vertical, tiendiendo a desequilibrar el nudo.

AE. Pretensado de cables

El valor de pretensado está relacionado con la rigidez inicial de la red de cables y, por tanto, con la capacidad para soportar las acciones de viento con deformaciones controladas. El efecto del pretensado es diferente en fachadas planas o con curvatura. En las primeras el pretensado tiene un efecto rigidizado hasta cierto punto, a partir del cual no es posible mejorar el comportamiento a deformación a pesar de que se pretense en mayor medida la fachada. Por otra parte, pretensados mayores exigen diámetros de cable exagerados fuera de los valores comunes entre 20 y 35 mm de diámetro.

En fachadas con curvatura, por el contrario, el efecto del pretensado tiene un efecto más notorio sobre la rigidez del conjunto, que de por sí es más rígido. En este caso la relación entre pretensado y fachada es más compleja ya que la forma de la fachada cambia con los valores de pretensado, y debe encontrarse una configuración viable que constituya una configuración compatible entre la forma deseada y el estado tensional de la fachada.

En fachadas con doble curvatura de forma activa los valores de pretensado pueden soportar una fachada con valores relativamente bajos consiguiendo cierta rigidez. Uno de los factores importantes que debe tenerse en cuenta, sin embargo, es que en estos casos una acción perpendicular a la fachada implica un aumento de tracción en una dirección de los cables (la que forma una parte cóncava del lado de la acción) en tanto que produce una reducción de la tracción en la otra dirección (la que forma la curvatura contraria), de modo que un valor excesivamente bajo de pretensado podría llegar a destensar un cable, perdiendo su función y llevando a la fachada a un estado potencialmente inestable.

El valor de pretensado de los cables está relacionado, por otra parte, con la capacidad de la estructura sobre la que se apoya la fachada, que suele imponer también un rango de trabajo viable para no sobrecargar el resto de estructuras del edificio.

AF. Deformación máxima de la estructura

La deformación máxima de la estructura es uno de los puntos de análisis importantes en este tipo de fachadas, habida cuenta de la gran flexibilidad que presentan esas soluciones. En los casos conocidos se indican valores admisibles del orden de un metro de deformación fuera del plano de fachada. Esta deformación máxima es la responsable de la deformación de los paños de vidrio, relacionado a su vez con la dimensión de ancho y alto (a mayor dimensión, más deformación asume cada paño fuera de su plano). También con los ángulos de giro que debe asumir cada anclaje y los movimientos que puede tener cada vidrio en el alojamiento de los anclajes.

La deformación máxima exige considerar un criterio más amplio que únicamente un valor máximo para la carga de viento de normativa. Estas cargas de viento son valores que estadísticamente no se superan en períodos de 50 años (u otro período en caso de que la normativa en cuestión así lo defina), pero deben tenerse en cuenta también otras situaciones más frecuentes. Así, el criterio para estas fachadas puede ser L/50 o incluso L/35 en función de la luz de la fachada, pero deben considerarse también límites para situaciones frecuentes. En el capítulo 4 pueden verse cálculos más concretos sobre valores de viento para períodos diferentes, un criterio propuesto en este trabajo es el de considerar un valor frecuente que puede producirse con frecuencia anual o mayor, y un valor de frecuencia bianual.

Debe destacarse que la deformación de este tipo de estructuras sucede en su mayor parte para cargas bajas, de modo que en estas cargas de viento frecuentes es donde se puede evaluar si es admisible la mayor parte de la deformación que producirá la estructura. Para frecuencias menores a cargas de viento de periodicidad bianual, la carga se acerca ya mucho a la dada por normativa para 50 años, y por otra parte, los movimientos de la estructura para cargas de viento altas son mucho menos notorios por lo que considerar análisis para otras frecuencias entre 2 y 50 años no aporta información de mayor valor.

AG. Número de anclajes por vidrio

En los casos más comunes de fachadas el número de anclajes por vidrio es de cuatro, aunque con cierta frecuencia ese encuentran también fachadas con seis

anclajes por vidrio en las que una pieza de vidrio puede alcanzar dos módulos de la retícula de cables, o bien en horizontal o en vertical.

En relación con el número de anclajes es necesario considerar el tipo de anclaje, en esquina o puntual con rótula. En el caso de las modulaciones con seis anclajes de vidrio pueden darse combinaciones de ambos.

AH. Anclajes especiales o pórticos de acceso

El contorno de la fachada está resuelto en general por terminaciones de cables en los que el movimiento está coaccionado en las tres direcciones del espacio. Existen sin embargo puntos singulares que pueden tener otro tipo de coacciones. Los más frecuentes son los pórticos de encuentros con puertas, en los que se dispone de algún tipo de estructura que permite el movimiento en perpendicular al plano de la fachada.

Este anclaje especial con movimiento liberado tiene relación con el hecho de que en estas zonas conviven cables de distintas longitudes y que producen curvaturas distintas al deformarse ante cargas. Estas diferencias producen torsiones notables en los vidrios, de mayor magnitud que en cualquier otro punto de la fachada.

Esta situación puede generalizarse a cualquier punto de la fachada en la que exista un cambio repentino de luz entre cables que forman la retícula. En estos puntos debe tenerse en cuenta que pueden producirse fuertes cambios de curvatura que producen torsiones en los vidrios, y es posible considerar el uso de anclajes especiales que liberan ciertos movimientos.

3.5.2. Parámetros que afectan al diseño de fijaciones de vidrio

El anclaje de vidrio es una pieza compleja en este tipo de fachadas que se ocupa de mantener la posición de los cables y fijar el vidrio en su lugar, al tiempo que permite los movimientos necesarios para evitar su rotura. Debe además permitir la apertura de la pieza para posibles cambios de vidrio, pero además debe permitir el reajuste de las posiciones de los cables en caso necesario, de modo que en este punto se concentran una serie de requisitos que descomponemos a continuación.

BA. Superficie de contacto con vidrio

El tamaño del anclaje en contacto con los vidrios viene dado por la necesidad de contar con cierta superficie de contacto en la esquina o perforación del vidrio para evitar concentraciones de tensiones excesivas cuando la deformación de la fachada desplaza los cuatro anclajes fuera del plano inicial.

Esta superficie de contacto se distribuye en ancho y alto efectivo de contacto, que convendrá variar en función de las deformaciones máximas de la fachada. Asimismo, en esta área de contacto es necesario redondear el perímetro ya que las formas en ángulo en el anclaje pueden generar puntos de concentración de tensiones perniciosos para el vidrio.

Si bien la herramienta de cálculo no puede llegar a dar datos detallados para el cálculo de las dimensiones del anclaje, sí es posible tomarla como punto de partida a través del desplazamiento relativo de los puntos de esquinas de

los vidrios. Esta métrica que se extrae del cálculo con la herramienta FTES Cable sí permite conocer cuánto se desplaza un anclaje del plano del vidrio y modelar esta situación en un modelo parcial de vidrio y anclaje para un análisis por elementos finitos que permite obtener el campo de tensiones. A partir de este resultado es posible trabajar con las medidas necesarias para la fijación del vidrio.

BB - BC. Ancho y alto de superficie de contacto anclaje-vidrio

Estas dos medidas están directamente relacionadas con la anterior, superficie de contacto de anclaje-vidrio. Si bien la superficie debe maximizarse para distribuir las tensiones en el vidrio, es conveniente al mismo tiempo minimizar el ancho y alto ya que cuanto mayor es cada una de las dimensiones más se limitará el giro del vidrio dentro de su alojamiento.

La decisión de una y otra dimensión dependerá de las dimensiones generales de la fachada y de las deformaciones esperadas. En función de las dimensiones relativas generales de la fachada se producirán mayores giros en uno u otro eje y esto se relaciona con la capacidad máxima que debe tener el anclaje para permitir cierto ángulo de movimiento del vidrio. A mayor ángulo necesario, más debe limitarse la dimensión del contacto entre el apoyo y el vidrio para dejar lo más libre posible el giro.

BD - BE. Movimiento angular horizontal / vertical del vidrio en el anclaje

En función de las deformaciones esperables en la estructura, es necesario prever la posibilidad de que el vidrio pueda girar un cierto ángulo en el anclaje para reducir en la medida de lo posible los momentos flectores producidos por el empotramiento del vidrio en la fijación.

Este ángulo puede determinarse a través del estado deformado en la configuración de deformación con carga máxima, a partir de la cual se puede tener una geometría de referencia para el cálculo de estados límite últimos de rotura del vidrio. En esta configuración es posible representar los encuentros y obtener ángulos necesarios de movimiento, para lo cual interviene la profundidad de encuentro vidrio-anclaje (relacionado con los anchos y altos BB y BC anteriores, en función del eje que se trate) y de la dimensión y características del neopreno separador del vidrio y el metal del anclaje.

BG. Grosor de neoprenos de separación

Estas piezas de separación entre el anclaje y el vidrio deben dimensionarse en su grosor teniendo en cuenta los movimientos indicados en los puntos anteriores. Para ello puede partirse de la configuración deformada de fachada, y debe tenerse en cuenta el módulo de elasticidad y deformación máxima por compresión que puede permitirse en el neopreno. De esta forma, e introduciéndolo igualmente en el modelo parcial para análisis por elementos finitos de vidrio y anclaje, puede determinarse un espesor mínimo de esta pieza.

En el anclaje existen otros elementos de separación que únicamente previenen el contacto accidental del vidrio con partes metálicas, para los que no es necesario tener en cuenta el espesor de esta forma y puede determinarse de manera más libre.

BH - BI. Sección y pretensado de cables vertical y horizontal

La sección y pretensado de los cables se ha comentado en puntos anteriores en referencia a la configuración global de la fachada. En lo que se refiere al diseño del nudo, su tamaño mínimo variará en función de la sección y pretensado de los cables. Estos dos cables pueden pretensarse con valores diferentes para priorizar una dirección sobre otra. En la sección vertical del anclaje el cable vertical pasa por detrás del cable vertical ya que apoya su peso propio en él, y de esta forma equilibra el peso propio del vidrio que se sitúa en el lado opuesto del cable vertical en el centro.

BJ. Mecanismo de ensamblado de la fijación

El anclaje suele tener varias partes para posibilitar su montaje. En el caso más común cuenta con una pieza exterior en contacto con el vidrio, una pieza intermedia que queda colocada entre los dos cables, y una pieza trasera que cierra el conjunto por el interior. El mecanismo de montaje de esta pieza debe posibilitar fijar la posición de los cables a la pieza, que suele hacerse por medio de dos o más tornillos en la parte interior que atraviesan las tres partes metálicas del anclaje. Estos tornillos pueden apretarse o aflojarse dejando deslizar los cables en caso de ser necesario un reajuste de la posición.

La estructura en servicio implica que la posición de los cables es fija en el anclaje y no deslizante, de modo que las posiciones relativas de los puntos se mantengan para evitar movimientos que puedan hacer que los anclajes lleguen a tocar el canto del vidrio. Por otro lado, es necesario que la posición quede fijada para que el cable horizontal pueda apoyar en el vertical sin deslizar por él. Al mismo tiempo, debe ser posible su desapriete en caso de que sea necesario algún ajuste de la posición de la pieza por cambios en la tensión de los cables o movimientos del edificio.

La importancia de contar con este comportamiento fijo / deslizante de estas piezas se acrecienta en fachadas con curvatura, ya que la forma final de la fachada depende del correcto ajuste de todo el conjunto de cables e intersecciones. La forma final no puede conseguirse, a diferencia de lo que sucede con una fachada plana, hasta que todos los elementos están montados en posición y tensados al valor de diseño, de modo que durante esta etapa de construcción hay una fase en la que los anclajes deben deslizar para ajustar todos los puntos hasta llegar a la posición final.

BK. Mecanismo de fijación de vidrios

El mecanismo de fijación del vidrio es independiente del montaje anterior de la pieza y suele hacerse por el exterior con un único tornillo, operable con independencia del ensamblaje de la pieza con los cables.

BL. Espaciado entre vidrios

La junta entre vidrios es un parámetro que debe determinarse de acuerdo con dos requisitos principales: las características del sellado, tanto por la dimensión que debe tener la junta como por la deformación que produce el movimiento de los vidrios en el sellado. Los datos de deformación de la estructura pueden dar de nuevo información para representar estas dimensiones y deformaciones para

el estudio del sellado de acuerdo con las características específicas del material de la junta.

Por otro lado, la separación entre vidrios está relacionada con el margen que tienen las piezas de acristalamiento para moverse en su alojamiento.

BM. Margen de movimiento en el plano del vidrio

El movimiento permitido será el margen que queda entre la separación de vidrios y el grosor que ocupan las piezas de apoyavidrios y separadores verticales. Esta dimensión será el margen que tendrán los vidrios de movimiento antes de llegar a tocar el metal, que debe considerarse siempre un estado límite último debido a la posibilidad de rotura, si bien todos los apoyavidrios y separadores están protegidos por bandas de neopreno. En proyectos examinados estas juntas tienen una dimensión del orden de 20 mm de ancho, dando lugar a cordones similares a los que pueden verse en fachadas Stick tipo SG.

En fachadas con cables en ambas direcciones tienen un peligro menor de movimiento en su plano ya que las distancias relativas entre los puntos de intersección se mantienen por la tensión de los cables. En otros casos, como las fachadas de cables en una única dirección podrían producirse fenómenos de desestabilización, en particular cuando se producen cargas de viento desiguales en la superficie de la fachada para las que sí conviene un estudio cuidadoso de posibles movimientos de los vidrios dentro del plano de fachada.

3.5.3. Parámetros que afectan a los anclajes de la fachada

Este grupo se refiere a los parámetros que tienen que ver con los anclajes de la fachada a obra. Generalmente se trata de una parte oculta, que tiene requisitos fundamentalmente mecánicos y de control de la fachada durante su vida útil.

CA. Profundidad de pretensado necesaria

En el eje del cable es necesario proporcionar un margen de movimiento para las operaciones de fijación del extremo del cable y su pretensado. El alargamiento de un cable puede producirse inicialmente por la acomodación de los cordones del propio cable al sufrir tensión en los primeros ciclos, para lo cual es de utilidad hacer ciclos de tensado y destensado para aminorar este alargamiento una vez colocado en su alojamiento.

Mecánicamente el cable sufre también un alargamiento debido a la tensión introducida en el pretensado. Aunque es un valor de pequeña magnitud, es necesario tener en cuenta que el mecanismo de pretensado debe tener esta capacidad de movimiento para llegar a dar el valor de pretensado de diseño.

De manera muy sencilla puede estimarse una elongación por la ley de Hooke. Para un cable de 31 mm de diámetro, según datos de fabricante [18] con módulo de Young $E = 160e9 N/mm^2$, y área $A = 634/1e6m^2$ se produce aproximadamente una elongación de 30 mm para un cable de 40 m aplicando un pretensado de 75 kN (estos datos corresponden a las fachadas. De manera similar puede calcularse el movimiento que debe preverse en cualquier otra circunstancia).

Los movimientos de origen térmico pueden hacer también que sea necesario prever capacidad de movimiento en la dirección del eje del cable para hacer

ajustes por cambios de temperatura durante la construcción. Siguiendo los datos del ejemplo anterior, las diferencias de longitud del cable para variaciones de temperatura de 20º están en el orden de 10 mm de diferencia de longitud, que debe tenerse en cuenta junto con la anterior.

Por último, debe tenerse en cuenta también cierto margen para la ejecución, teniendo en cuenta que el extremo del cable no se inserta en su alojamiento completamente tensado, sino que será necesaria una cierta longitud extra para maniobra. En cualquier situación en la que el cable no está tensado su forma tiene a hacer una catenaria, aumentando la longitud que se necesita para que su extremo llegue al punto de fijación.

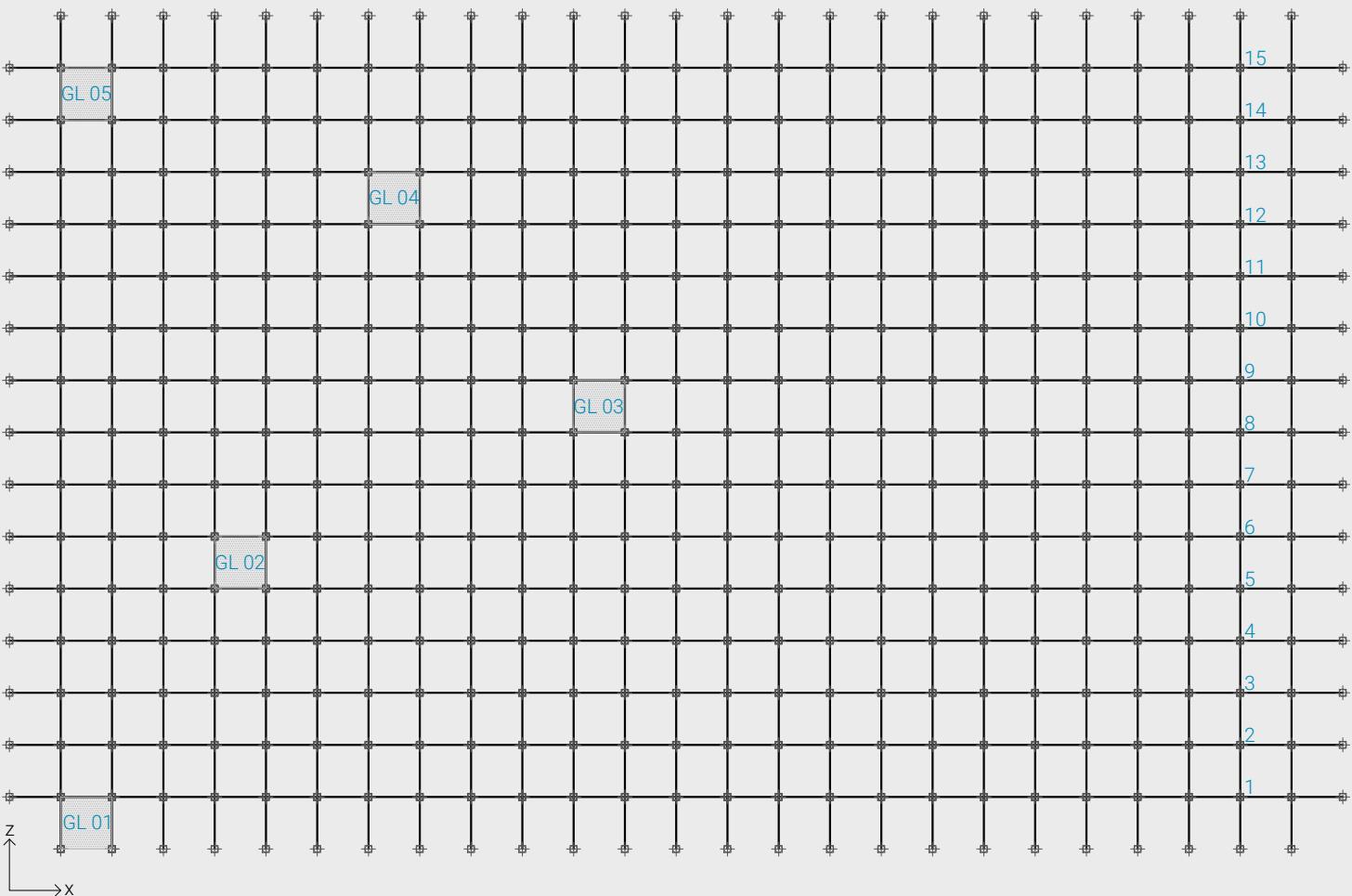
CB. Capacidad de ajuste de posición del cable

Los anclajes deben permitir además el ajuste en el plano perpendicular al eje del cable. La parte entre el extremo del cable y la obra debe permitir el encuentro de dos elementos con tolerancias de construcción diferentes. Las tolerancias en las fachadas se reducen a milímetros, y la posición exacta del cable debe poder ajustarse en altura y profundidad durante el proceso constructivo, además de poder reajustarse si existe algún movimiento de la estructura de soporte que requiera esta corrección.

Plano 3.01

Preprocesado. Información para modelo de estructura.

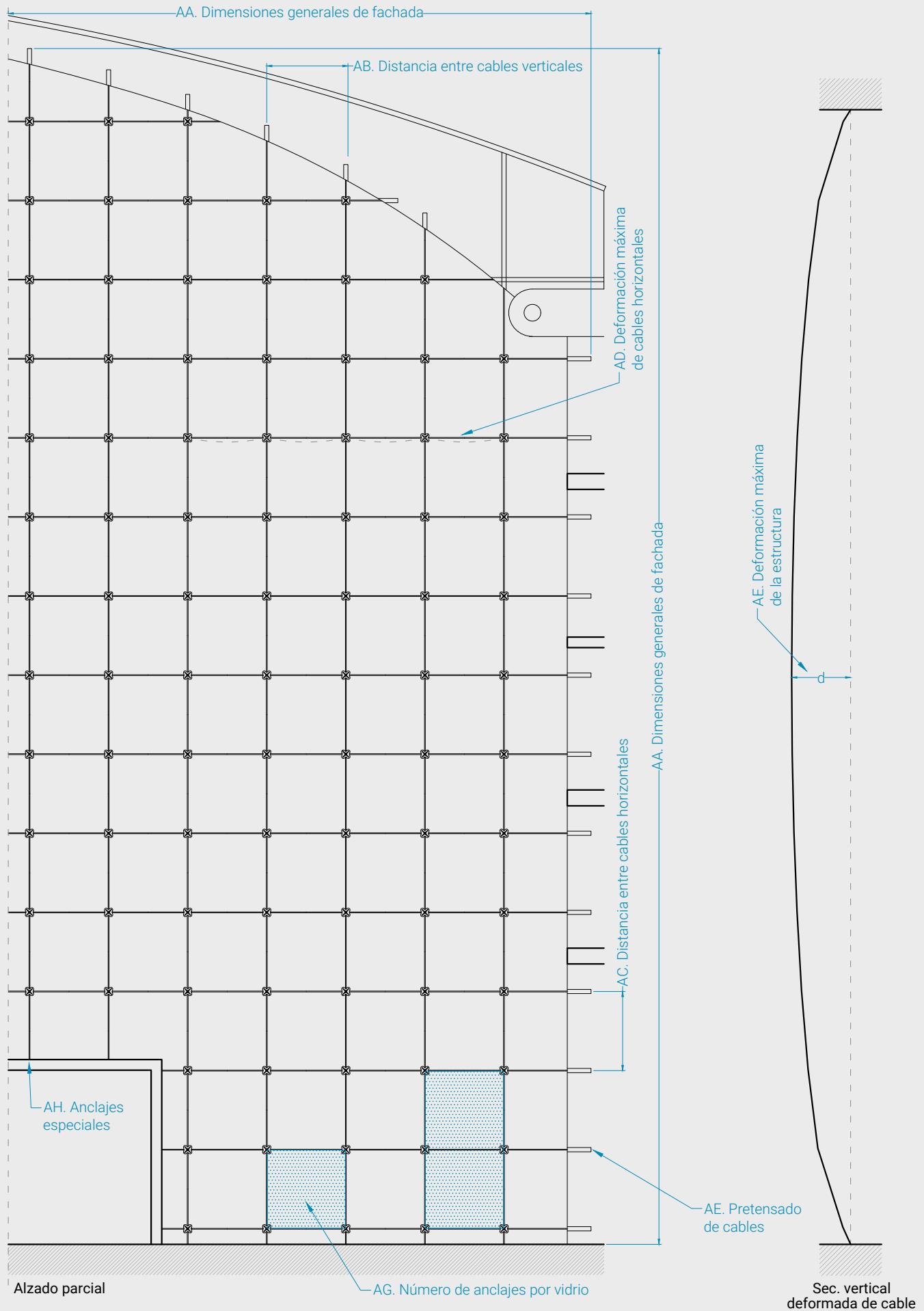
CASO_01. Ejemplo de archivo de datos para introducción de modelo de estructura en herramienta FTES



Capas para la definición del modelo a través de líneas y puntos:

Capa	Contenido y descripción	Tipo
0	Geometría de la estructura, contiene el dibujo con líneas de la estructura	Geometría
NF_Restrains_XYZ	Puntos en el contorno de la estructura, para definirlos como apoyos	Node filter
NF_Glassload	Puntos en todos los nudos interiores de la estructura, para aplicar carga de vidrio	Node filter
NF_Windload_01	Puntos en fila 1 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_02	Puntos en fila 2 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_03	Puntos en fila 3 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_04	Puntos en fila 4 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_05	Puntos en fila 5 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_06	Puntos en fila 6 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_07	Puntos en fila 7 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_08	Puntos en fila 8 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_09	Puntos en fila 9 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_10	Puntos en fila 10 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_11	Puntos en fila 11 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_12	Puntos en fila 12 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_13	Puntos en fila 13 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_14	Puntos en fila 14 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
NF_Windload_15	Puntos en fila 15 de estructura para aplicar carga de viento (variable con la altura)	Node filter
GF_Glazing_01	Conjunto de cuatro puntos para definir pieza de acristalamiento 1	Glazing filter
GF_Glazing_02	Conjunto de cuatro puntos para definir pieza de acristalamiento 2	Glazing filter
GF_Glazing_03	Conjunto de cuatro puntos para definir pieza de acristalamiento 3	Glazing filter
GF_Glazing_04	Conjunto de cuatro puntos para definir pieza de acristalamiento 4	Glazing filter
GF_Glazing_05	Conjunto de cuatro puntos para definir pieza de acristalamiento 5	Glazing filter

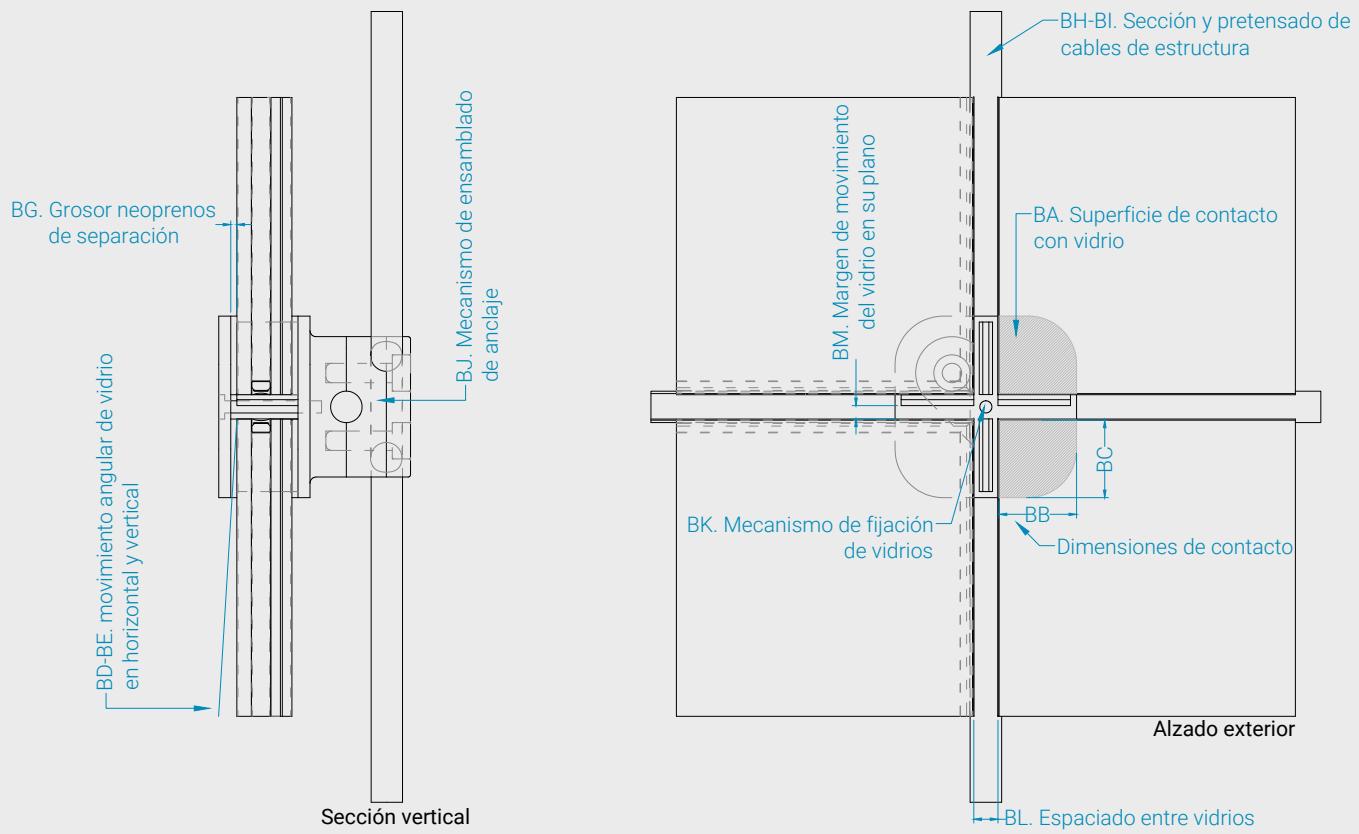
Parámetros de diseño de fachada. Parámetros globales



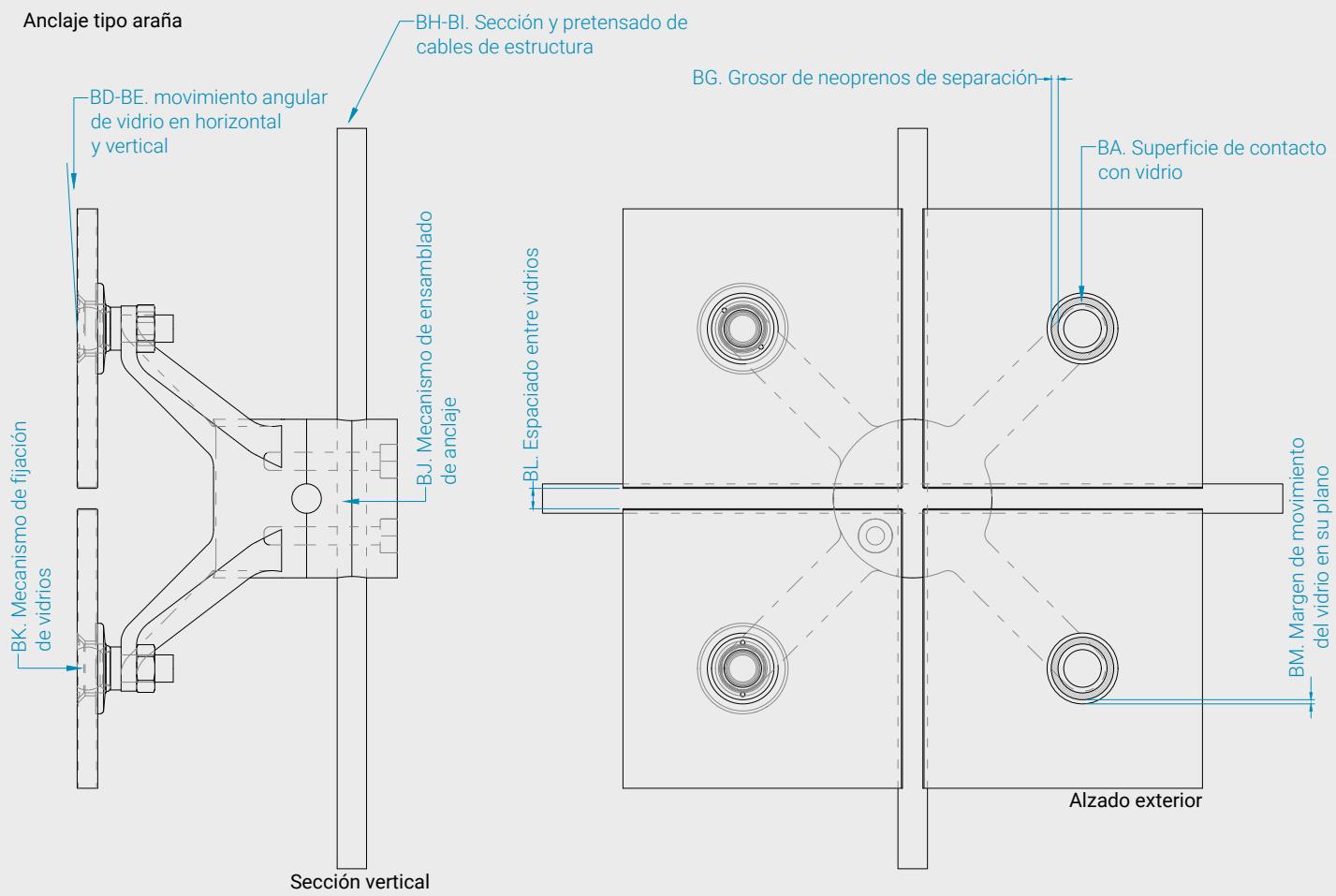
Plano 3.03

Parámetros de diseño de fachada. Parámetros de anclajes

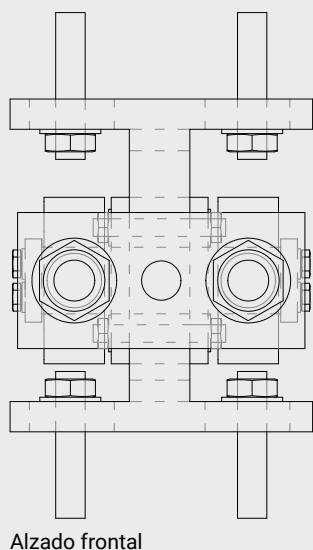
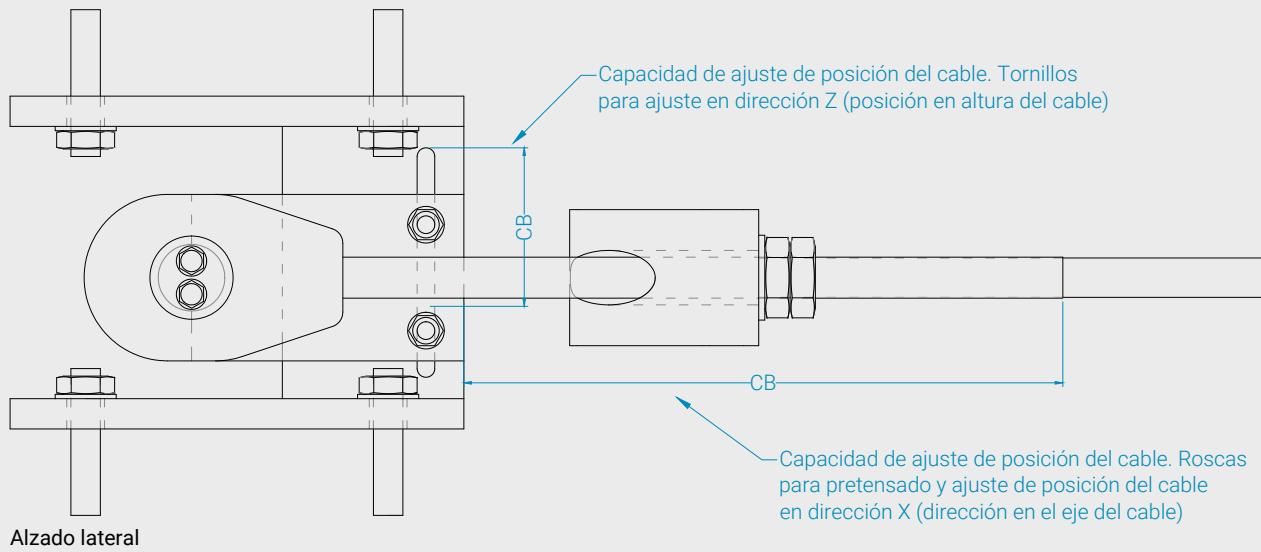
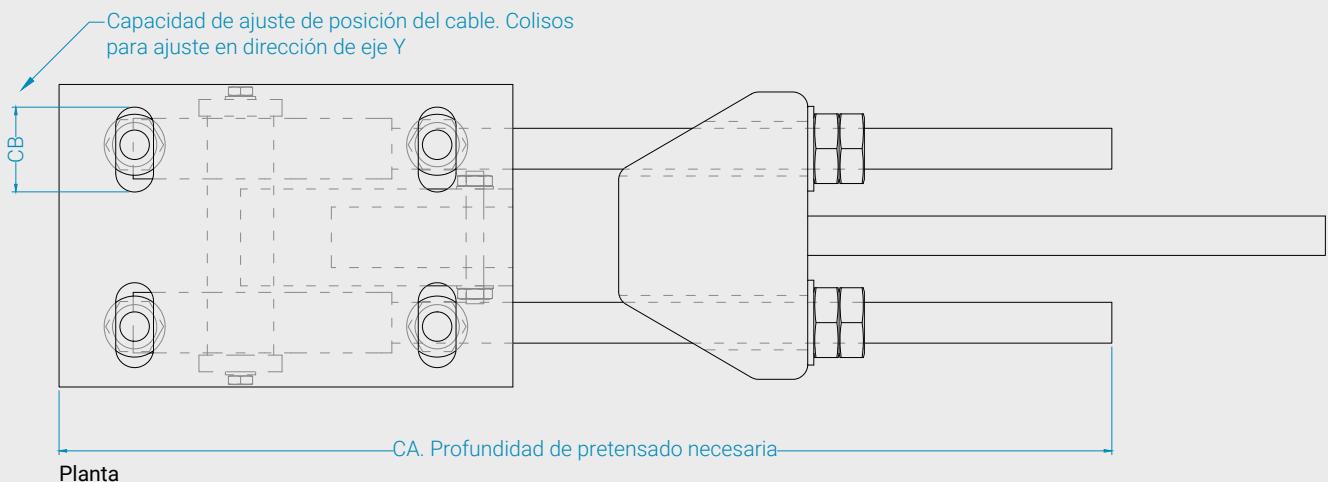
Anclaje en esquina de vidrio



Anclaje tipo araña



Parámetros de diseño de fachada. Parámetros de encuentro con obra



4

Casos de estudio

En este capítulo se presentan una serie de casos de estudio como ejemplo de aplicación de la herramienta de cálculo a algunos casos de fachada.

Se han seleccionado algunos casos de cálculo para probar las posibilidades de la herramienta de cálculo y las variaciones en los resultados de distintas decisiones de diseño, de manera que es posible a través de estos casos tipo concretar aspectos del diseño de algunos de los parámetros citados que intervienen en el desarrollo de una fachada de cables tensados.

Los casos tipo de cálculo son los siguientes. Para todos los casos se ha partido de una estructura de 40 m de ancho y 25 m de altura, para la que se han seleccionado los siguientes casos de estudio. Las dimensiones generales se han tomado con referencia a medidas del orden aproximado de casos de fachada reales como pueden ser el Hotel Kempinski, aunque existen fachadas de escala mayor. Aunque se trata de un caso tipo y no de una reproducción literal de este proyecto, la similitud en la escala nos permite tener una idea de los resultados del análisis mecánico en este proyecto, al mismo tiempo que permite tomar como base ciertos parámetros como punto de partida realista, en lugar de partir de datos sin una base sólida inicial.

Los casos de estudio son los siguientes. Se parte de las dimensiones globales con distintos casos en función de la modulación de vidrios. El primero de los casos se toma además como base para el desarrollo de otras variantes adicionales. En los planos incluidos al final de este capítulo pueden verse más detalles acerca de los distintos casos de estudio.

- Caso 1. Modulación de vidrios de medida aprox. 1,5 x 1,5 m.
- Caso 2. Modulación de vidrios de medida aprox. 1,8 x 1,8 m.
- Caso 3. Modulación de vidrios de medida aprox. 2 x 2 m.
- Caso 4. Modulación de vidrios de medida aprox. 2,5 x 2,5 m.

A partir del caso 1 o caso base se desarrollan los siguientes casos de análisis:

- Caso 1B. Modulación vertical de vidrio, con 1,5 x 3 m aprox.
- Caso 1C. Modulación horizontal de vidrio, con 3 x 1,5 m aprox.
- Caso 1D. Fachada con cables verticales solamente.

- Caso 1E. Fachada de doble curvatura con cables en líneas rectas de la superficie
- Caso 1F. Fachada de doble curvatura con cables curvos
- Caso 1G. Fachada similar a Caso 1, duplicando cables verticales.

4.1. Cargas para el análisis de fachadas

Las cargas consideradas en los distintos análisis se detallan a continuación. El objetivo del caso de cargas expuesto a continuación es el de configurar una situación de cargas realista al mismo tiempo que se mantiene la complejidad del conjunto de cargas limitado, para entender con mayor claridad las solicitudes a las que se someten los casos tipo de análisis. De esta forma, se contará principalmente con peso propio de los cables de fachada, peso propio de vidrio y carga de viento, ya que son las solicitudes que con mayor frecuencia inciden en el diseño de fachadas. En función de la situación en un proyecto real pueden existir otras solicitudes que podrían añadirse de la misma forma que las indicadas a continuación, con la consecuencia de que multiplicarían los casos de solicitudes y de análisis necesarios para obtener un resultado global.

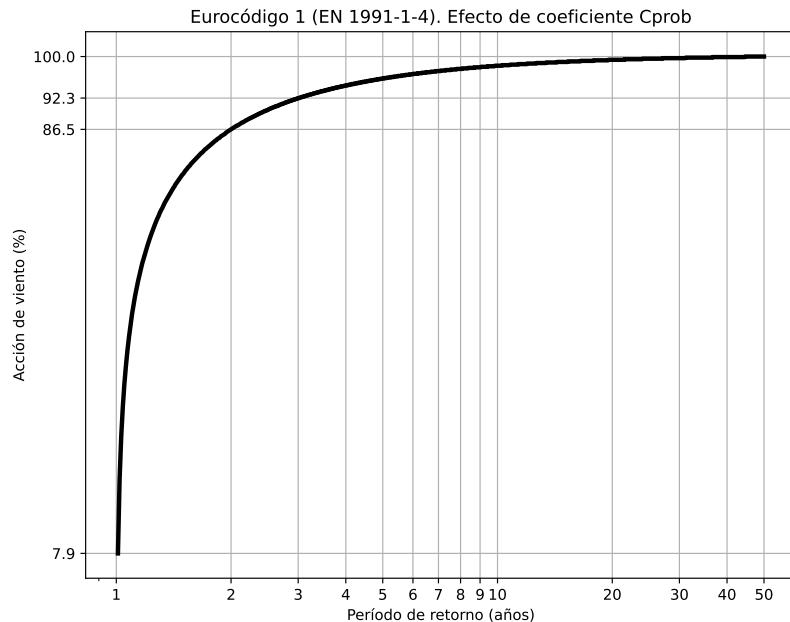


Fig. 4.1: Modelo de aplicación de cargas de viento según Eurocódigo 1 (EN 1991-1-4) para períodos de retorno entre 1 y 50 años. Considerando como carga de viento típica (100 %) la correspondiente a 50 años, las cargas de viento con ocurrencias más frecuentes representan los porcentajes representados en la gráfica.

- Peso de vidrio: consideraremos una carga tipo correspondiente a un vidrio de 6+6/cámara/5+5, con 22 mm netos de espesor de vidrio y un peso de 55 kg/m².

- Carga de viento. Esta carga se indica en mayor detalle a continuación.

La carga de viento se considera en zona D de fachada, recibiendo presión de viento desde el exterior. Se considerará un edificio en zona IV urbana.

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (4.1)$$

Las cargas variables, y en particular, la carga de viento, son las que centran la mayor atención por ser las que dan lugar a las deformaciones más importantes en la fachada. De acuerdo con Patterson [17], el criterio de deformación para cada fachada debe establecerse de acuerdo con un estudio detallado de las circunstancias de cada caso, aunque como valores de referencia comúnmente aceptados se suelen encontrar valores de deformación de L/45 a L/50.

En estructuras convencionales suele ser suficiente considerar la carga de viento dada por la normativa como valor máximo que puede producirse de viento para un período de tiempo de usualmente 50 años. En un caso de diseño de fachadas de este tipo, donde las deformaciones son de una magnitud tan importante, es interesante considerar no solamente las deformaciones máximas para esta carga de viento, sino qué deformaciones pueden alcanzarse en situaciones más frecuentes.

El Eurocódigo 1 [2] de acciones de viento recoge un mecanismo sencillo para tener en cuenta el período de retorno diferente. A través de un coeficiente C_{prob} se puede multiplicar la velocidad básica de viento para hallar la carga de viento correspondiente a la probabilidad deseada de su ocurrencia anual.

Se ha tomado como referencia el Eurocódigo en este sentido para tomar un valor de referencia para el estudio de distintas condiciones de viento. Como puede verse en la figura 4.1, una probabilidad de ocurrencia de 0,02, que correspondería a una probabilidad de 1/50 o una posible ocurrencia de velocidad de viento cada 50 años da lugar a $C_{prob}=1$, es decir, a la carga de viento total calculada según CTE/EC1. Para un período de ocurrencia anual el valor de velocidad de viento resulta alrededor de un 8% de la anterior. Sin embargo, para un período bianual la carga asciende ya sobre el 86% de la correspondiente a un período de 50 años. Se toma por tanto un período anual para aplicar una carga de viento que da lugar a una situación de deformación de la fachada muy frecuente. La deformación total podrá alcanzarse para períodos tan frecuentes como dos años.

4.2. Deformaciones máximas en las fachadas

Los resultados de los análisis para los distintos casos arrojan los siguientes resultados en cuanto a la deformación máxima de las fachadas. Las deformaciones comentadas a continuación se refieren al valor máximo de desplazamiento total de los nudos de fachada. En los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 se recogen los datos relativos a estas deformaciones máximas, y en lo sucesivo se organizan los resultados de la siguiente forma: El primer cuadro se refiere al caso base (Caso 01) en comparación con los casos 02, 03 y 04 que representan variaciones en la modulación con respecto al caso inicial. En el segundo cuadro se representan los resultados del Caso 01 o caso base en comparación con las configuraciones

alternativas de fachadas planas. Por último, en el tercer cuadro se comparan los resultados del caso base con los valores obtenidos para las variantes de fachadas con curvatura. Los planos al final de este capítulo muestran los distintos esquemas de fachadas estudiadas.

Cuadro 4.1: Deformación máxima. Modulaciones tipo

	Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Deformación ELU	770,75 mm	818,44 mm	841,51 mm	912,12 mm
Ratio de deformación	L/51	L/48	L/47	L/43
Deformación ELS	672,37 mm	714,86 mm	734,41 mm	796,40 mm
Ratio de deformación	L/59	L/55	L/54	L/50
Deformación anual	279,73 mm	227,58 mm	283,75 mm	274,67 mm
Ratio de deformación	L/143	L/176	L/141	L/145
Deformación bianual	651,83 mm	692,44 mm	711,05 mm	771,55 mm
Ratio de deformación	L/61	L/57	L/56	L/51
Ratio anual/ELS	41 %	31 %	38 %	35 %
Ratio bianual/ELS	97 %	97 %	96 %	97 %

Cuadro 4.2: Deformación máxima. Variaciones sobre caso tipo

	Caso 01	Caso 01B	Caso 01C	Caso 01D
Deformación ELU	770,75 mm	784,18 mm	949,83 mm	778,43 mm
Ratio de deformación	L/51	L/51	L/42	L/51
Deformación ELS	672,37 mm	684,93 mm	819,29 mm	679,89 mm
Ratio de deformación	L/59	L/58	L/48	L/59
Deformación anual	279,73 mm	290,18 mm	213,71 mm	290,86 mm
Ratio de deformación	L/143	L/137	L/187	L/137
Deformación bianual	279,73 mm	663,52 mm	802,89 mm	658,49 mm
Ratio de deformación	L/61	L/60	L/49	L/60
Ratio anual/ELS	41 %	42 %	26 %	43 %
Ratio bianual/ELS	97 %	97 %	98 %	97 %

Estos tres primeros cuadros referentes a las deformaciones máximas contienen datos relativos a deformaciones en Estado Límite Último (ELU), que serían las utilizadas a la hora de considerar las deformaciones angulares de los cables y las deformaciones de los vidrios fuera de su plano, de cara a las comprobaciones de rotura de vidrios. Las deformaciones en Estado Límite de Servicio serían las utilizadas a la hora de evaluar las deformaciones de la estructura. Se recogen además los cálculos correspondientes a situaciones de viento de periodicidad anual y bianual.

Atendiendo en primer lugar a las deformaciones ELU, los valores en el primer cuadro varían entre 77 cm de deformación máxima y 91 cm para la modulación con paños más grandes de fachada, que representan valores entre L/51 y L/43.

Cuadro 4.3: Deformación máxima. Fachadas con curvatura y doble cable

	Caso 01	Caso 01E	Caso 01F	Caso 01G
Deformación ELU	770,75 mm	772,99 mm	168,91 mm	429,77 mm
Ratio de deformación	L/51	L/52	L/238	L/93
Deformación ELS	672,37 mm	677,17 mm	163,64 mm	439,63 mm
Ratio de deformación	L/59	L/59	L/245	L/91
Deformación anual	279,73 mm	70,79 mm	179,53 mm	221,08 mm
Ratio de deformación	L/143	L/570	L/223	L/180
Deformación bianual	279,73 mm	197,30 mm	162,19 mm	436,35 mm
Ratio de deformación	L/143	L/203	L/245	L/91
Ratio anual/ELS	41 %	10 %	109 %	50 %
Ratio bianual/ELS	97 %	29 %	99 %	99 %

Las deformaciones en estado límite de servicio son lógicamente menores, aunque no de en la misma proporción que se reducen las cargas de ELS con respecto a ELU, debido al carácter no lineal del comportamiento de estas estructuras.

En el Estado Límite de Servicio tenemos deformación máxima para el caso base de 67 cm. Las modulaciones con paños más grandes aumentan de manera progresiva su deformación máxima a valores de 71 cm, 73 cm y 79 cm. Estos valores corresponden a ratios de L/59 a L/50. Estos valores están en línea con las deformaciones indicadas por Patterson [17] como referencia para el diseño de esta tipología de fachadas, si bien se recomienda en todo caso el estudio de un criterio específico para cada caso.

En las deformaciones correspondientes a las frecuencias anual y bianual (estas corresponden también a casos ELS, con la carga de viento reducida al valor probable con período de retorno de uno y dos años respectivamente) se obtienen valores del orden de 28 cm y 65-77 cm. Pese a que las cargas de viento para el valor que puede producirse anualmente y bianualmente son del 8 % y del 86 % del valor total de carga de viento para el período de 50 años, las deformaciones obtenidas representan alrededor del 40 % y del 97 % de la deformación total. Este resultado es consistente en los cálculos de todos los casos con resultados muy similares, de forma que la conclusión es clara en este sentido: la mayor parte de la deformación que se produce en la fachada tiene lugar para valores bajos de carga. Además, pese a que es posible limitar las deformaciones máximas (Dentro de un cierto margen) mediante alternativas de diseño y distintos parámetros, la mayor diferencia se verá en las cargas totales, pero en las cargas bajas de viento la flexibilidad de la estructura será más similar en todos los casos. Así, con cargas de viento que se producen más de una vez al año es previsible encontrarse con deformaciones de la estructura de unos 30 cm. Este parámetro puede ser importante durante el diseño como estado límite de servicio por la inseguridad o defectos en la apariencia que puede producir esta deformación.

En este primer cuadro debe mencionarse también que, aunque para las cargas ELS y ELU la progresión en la deformación máxima acompaña de manera directa el aumento de la modulación de los paños, en el caso de cargas anuales de viento los resultados son más irregulares, lo que puede deberse a un comportamiento más incierto de la fachada en este estado tan flexible, o bien del

método de cálculo que puede no capturar correctamente el estado de la fachada mientras no gana mayor rigidez debido a la deformación. En este sentido cabría estudiar más en profundidad esta área de cálculo para tener resultados más concretos.

En el segundo de los cuadros donde se evalúan las alternativas de diseño se hace patente un fenómeno interesante, que es el condicionado que tiene el comportamiento de la fachada por los cables de menor luz. Schlaich así lo indica en [23], donde además de afirmar que el comportamiento de la fachada se ve fuertemente condicionado por la luz menor, indica que para una relación de 1 a 2 de las dimensiones de la fachada, los cables más largos prácticamente dejan de aportar rigidez.

Así puede verse en este segundo cuadro, donde se muestran los resultados del caso 01B y 01C. EN estos dos casos se eliminan de la fachada base la mitad de los cables horizontales y la mitad de los cables verticales. Es decir, en la fachada 01B se utiliza un módulo el doble de alto, y en la fachada 01C un módulo el doble de ancho con respecto al caso inicial.

Los resultados que arrojan estas dos fachadas indican que el caso 01B, que tiene el mismo número de cables verticales que el caso base, tiene una deformación del mismo orden que la fachada de referencia, en tanto que la fachada 01C aumenta mucho su deformación (de 68 cm para el caso 01B a 81 cm para el caso 01C, siendo 67 cm el caso base). Esto corroboraría lo indicado antes ya que en este caso los cables de menor luz se reducen a la mitad.

El caso 01D, por su parte, representa una fachada con montantes cable, que comparte modulación con la fachada inicial pero elimina todos los cables horizontales. Curiosamente, esta fachada arroja valores de deformación similares a los del caso inicial, de modo que en este tipo de fachadas la deformación no supondría un problema inicial. Sí debe tenerse en cuenta, sin embargo, que la ausencia de cables horizontales hace que la fachada sea mucho menos estable ya que las posiciones relativas de los puntos de fijación en horizontal son libres entre sí y no se ven limitadas por un cable tensado que las une. De esta forma, si se producen cargas de viento desiguales en la superficie de la fachada pueden darse deformaciones que pongan en peligro la estabilidad de los vidrios en sus alojamientos, por eso este tipo de fachadas suelen utilizarse en casos donde las luces son más reducidas, y, en consecuencia, las deformaciones están mucho más limitadas.

En el caso de las fachadas con curvatura, cuyos resultados se recogen en el tercer cuadro, se obtienen también resultados interesantes. En los casos 01E y 01F se proponen dos casos de fachada con doble curvatura en forma de paraboloides hiperbólico o superficie anticlástica (es decir, con curvatura en dirección opuesta en cada dirección principal). En el primer caso los cables en la estructura se disponen siguiendo líneas rectas dentro de esta superficie de doble curvatura, en tanto que en el segundo caso los propios cables siguen la curvatura de la superficie.

La primera de estas dos fachadas tiene deformaciones similares al caso inicial de fachada, de forma que la doble curvatura no aporta en este caso una ventaja apreciable. El segundo caso, donde los cables siguen la curvatura de la fachada, da lugar a deformaciones de orden mucho menor al de la fachada inicial, con valores tan bajos como 17 cm o L/238, consiguiendo una rigidez de la fachada considerablemente mayor a cualquier otro caso de fachada plana. Esta diferencia se debe a que, pese a tratarse de dos fachadas con curvatura, en el primer caso

la fachada no tiene una forma activa. Es decir, cada cable tiene su forma recta individualmente por el pretensado independientemente de la forma global de la fachada, y sus posiciones relativas son las que dan lugar a una superficie con curvatura al unir todos los cables. En el segundo caso, sin embargo, la forma de la fachada sí es activa globalmente, es decir, la forma depende de todo el conjunto de conexiones y pretensados de todos los cables. Un cambio en un anclaje o una tensión en un cable provocaría un cambio en la forma de la superficie. Así, dentro de esta clasificación es posible distinguir entre estos dos casos de fachada.

El segundo caso de fachada de doble curvatura con forma activa es el caso más complejo en cuanto a diseño, análisis y construcción. La propia forma de la fachada no puede conseguirse por diseño libre como en los casos de fachadas planas, donde una red de cables rectos siempre es una configuración viable. En este tipo de fachadas no todas las combinaciones de curvaturas y tensados de cables son compatibles, de manera que es necesario pasar por una fase previa de "form-finding" para descubrir configuraciones viables que aseguran que la disposición de tensiones y forma de la fachada es físicamente compatible para poder proceder al análisis y diseño más detallados. En la herramienta de cálculo se ha implementado un método en este sentido (Force Density Method, según [22]) para poder hacer una aproximación a la forma viable que se ha analizado en el caso 01F.

En este caso deben destacarse además las inconsistencias en los valores de deformación arrojados para los casos ELU, ELS, anual y bianual, debido a pequeñas distorsiones en puntos próximos a una esquina de la fachada. En el archivo CAD de resultado es posible observar esta distorsión en la deformación (no representado en este documento debido a la dificultad para visualizarlo en una imagen estática), que de todas formas se ha dejado en el cuadro de datos para poner de manifiesto esta circunstancia en el resultado.

Por último, el caso 01G representa un modelo de fachada similar al inicial, pero en el que se duplican los cables verticales. En este caso la deformación máxima se reduce a 44 cm (con respecto a los 67 cm de la fachada inicial), si bien en este caso, para las cargas más bajas de valores de viento anuales y bianuales la deformación es del 50 % y 99 %. En el caso inicial eran del 40 % y 97 %, de modo que en este modelo se refleja la idea de que es más difícil limitar las deformaciones para las cargas más bajas. De todas formas, el recurso de duplicar los cables verticales da lugar a una reducción importante de la deformación máxima, lo cual resulta interesante para tener en cuenta en el diseño de la fachada: Si bien el duplicado del cable obliga a diseñar un anclaje más complejo, se evita los inconvenientes técnicos, constructivos y de proyecto que resultarían de considerar la opción de una estructura con doble curvatura.

4.3. Fuerzas máximas en cables y reacciones

De los resultados de análisis extraemos a continuación las fuerzas en cables y reacciones en los apoyos de la fachada. El primer valor es de interés a la hora de comprobar el agotamiento de la propia estructura de la fachada, y el segundo es de interés a la hora de analizar la demanda de la fachada sobre la estructura del edificio en la que se inserta. Las fachadas de cables, al tratarse de estructuras pretensadas, demandan ciertas exigencias de la estructura principal del edificio ya que su pretensado implica cargas de magnitudes elevadas

que actuarán permanentemente sobre el edificio, al mismo tiempo que exigen márgenes de deformación que deben controlarse estrictamente para mantener el pretensado y las tolerancias de movimiento de la fachada.

Cuadro 4.4: Fuerzas y reacciones máximas. Modulaciones tipo

	Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Fuerza en cable ELU	355,3 kN	390,2 kN	410,4 kN	462,4 kN
Ratio Tensión/Tensión max	58 %	64 %	67 %	76 %
Reacción X (ELU)	237,5 kN	256,1 kN	267,1 kN	299,8 kN
Reacción X (ELS)	198,8 kN	213,2 kN	221,4 kN	246,6 kN
Reacción Z (ELU)	354,7 kN	389,4 kN	409,5 kN	461,3 kN
Reacción Z (ELS)	290,8 kN	317 kN	332,9 kN	372,3 kN
Reacción Y (ELU)	22,5 kN	26,6 kN	29,1 kN	35,4 kN
Reacción Y (ELS)	15,1 kN	17,9 kN	19,5 kN	23,7 kN

Cuadro 4.5: Fuerzas y reacciones máximas. Variaciones sobre caso tipo

	Caso 01	Caso 01B	Caso 01C	Caso 01D
Fuerza en cable ELU	355,3 kN	356,3 kN	512,5 kN	353,5 kN
Ratio Tensión/Tensión max	58 %	58 %	84 %	58 %
Reacción X (ELU)	237,5 kN	282,1 kN	280,1 kN	—
Reacción X (ELS)	198,8 kN	233,1 kN	231,7 kN	—
Reacción Z (ELU)	354,7 kN	355,8 kN	510,4 kN	352,8 kN
Reacción Z (ELS)	290,8 kN	291,3 kN	411,0 kN	288,6 kN
Reacción Y (ELU)	22,5 kN	22,3 kN	43,9 kN	22,7 kN
Reacción Y (ELS)	15,1 kN	14,8 kN	29,4 kN	15,2 kN

En los casos analizados se ha utilizado para todos los análisis (excepto en el caso de fachada de doble curvatura, que se comentará a continuación) un pretensado igual en ambos sentidos de cables de 75 kN, con el objetivo de unificar criterio y limitar el número de variables que entran en este estudio de casos. Un posible análisis interesante sería también el uso de distintos valores de pretensado para la comparación de resultados, así como el uso de distintos pretensados en dirección horizontal y vertical para el estudio del comportamiento en estas configuraciones (tal como se indica en [23]). Esto abre otro posible campo de análisis donde sería necesario también tener en cuenta las características de la estructura principal del edificio donde se ubica la fachada.

Los tres cuadros que recogen los datos de fuerzas y reacciones, 4.4, 4.5 y 4.6 se organizan de manera similar a la sección anterior.

En cuanto a las fuerzas en los cables, el primer cuadro que analiza el caso base en comparación con las modulaciones alternativas de fachada indica valores de aprovechamiento de la resistencia de los cables que van del 58 % en el caso inicial, aumentando progresivamente a medida que se amplía la dimensión de la modulación del paño de vidrio hasta un 76 % de aprovechamiento de la resis-

Cuadro 4.6: Fuerzas y reacciones máximas. Fachadas con curvatura y doble cable

	Caso 01	Caso 01E	Caso 01F	Caso 01G
Fuerza en cable ELU	355,3 kN	357,5 kN	141,5 kN	223,8 kN
Ratio Tensión/Tensión max	58 %	58 %	23 %	36 %
Reacción X (ELU)	237,5 kN	277,7 kN	47,2 kN	178,1 kN
Reacción X (ELS)	198,8 kN	199,3 kN	58,2 kN	139,8 kN
Reacción Z (ELU)	354,7 kN	357,3 kN	138,9 kN	223,9 kN
Reacción Z (ELS)	290,8 kN	294,9 kN	109,7 kN	169,3 kN
Reacción Y (ELU)	22,5 kN	42,3 kN	33,8 kN	21,9 kN
Reacción Y (ELS)	15,1 kN	31,7 kN	27,3 kN	15,0 kN

tencia en el caso 04 donde la modulación de paños es más grande (por tanto, está soportada por un número menor de cables).

En el segundo cuadro, donde se analizan las variantes de modulación de fachada, puede comprobarse una diferencia importante entre la fachada 01B y 01C. En el primer caso el aprovechamiento máximo de los cables se produce igualmente con un 58 % de utilización de la capacidad resistente del cable para los elementos verticales, en tanto que en la fachada 01C, con la modulación que reduce los cables verticales a la mitad, el aprovechamiento de la capacidad resistente de los cables sube hasta un 84 %, mostrando de nuevo que los cables verticales son los que soportan la mayor parte del trabajo en estas fachadas debido a la relación entre la luz vertical y la horizontal.

En el resto de fachadas los resultados de aprovechamiento de los cables son similares aunque en la fachada con cables verticales duplicados (caso 01G) se reduce debido al reparto entre dos cables del esfuerzo. Cabe destacar en este caso la fachada 01F de doble curvatura con cables en curva donde, debido a dificultades para obtener resultados, se redujo el pretensado a 32 kN para los cables, de manera que en este caso la resistencia de los cables está aprovechada solamente a un 23 %. Es decir, en esta fachada se consigue una rigidez muy superior al resto de casos incluso con tensiones en los cables (y por tanto, reacciones sobre la estructura del edificio) mucho más pequeñas que en el resto de los casos. A propósito de las dificultades mencionadas para obtener resultados, cabe recordar que el proceso de cálculo no lineal está sujeto a incertidumbres en cuanto a la convergencia de los cálculos hacia un resultado válido. En muchas casos el cálculo puede desviarse por diversos problemas tanto del modelo estructural como del propio método numérico de resolución hasta fallar. Al tratarse de un proceso no lineal la resolución del sistema de ecuaciones no está garantizada y tampoco existen una forma directa de conocer qué cambios pueden hacerlo resoluble, de modo que el proceso es en ocasiones iterativo para ajustar el modelo hacia una configuración viable.

Las reacciones de la fachada sobre los apoyos arrojan también datos interesantes. Los distintos modelos de estructuras están dibujados en el plano XZ, de manera que el eje X es el horizontal y el eje Z el vertical. El eje Y es por tanto la dirección perpendicular al plano de fachada donde actúa el viento. En los cuadros de datos las reacciones X se refieren a las fuerzas que producen en sus

extremos los cables horizontales, en tanto que las reacciones Z se refieren a los cables verticales, siempre indicando el valor máximo que se da en la estructura. Las reacciones en Y son, por otro lado, las fuerzas perpendiculares a la fachada que produciría la fuerza de viento sobre sus apoyos en el edificio.

Partimos de una fuerza de pretensado de 75 kN, sin embargo las fuerzas que se producen en los apoyos son de magnitudes mucho mayores a este pretensado. En el caso base obtenemos fuerzas en el cable horizontal de 237 kN y en el cable vertical de 354 kN, con una diferencia notable entre ambos valores. Los cables verticales son responsables de soportar los pesos de vidrio. Sin embargo, en este caso inicial, el peso de todos los vidrios apoyados sobre un mismo cable pueden suponer unos 20 kN aproximadamente, por lo que esta carga no justifica tal diferencia entre un cable y otro. La magnitud de estas fuerzas se debe al conjunto de cargas, y en particular a la carga de viento. Para soportar esta carga perpendicular a la fachada los cables no solamente desarrollan una reacción en la dirección Y, sino que producen una fuerza en la dirección del propio cable que se suma a la fuerza de pretensado. En este caso, esta gran diferencia entre las fuerzas que desarrollan los cables horizontales y los verticales nos indica de nuevo que los cables verticales son los que llevan la mayor parte del esfuerzo en estas fachadas.

Estos resultados se repiten de forma similar en el resto de casos de fachadas. De nuevo, en el caso de la fachada 01C donde la modulación de cables verticales utiliza la mitad de elementos, las fuerzas desarrolladas en los apoyos de estos elementos crecen notablemente en comparación con el resto de casos. En todos los casos, a diferencia de las enormes fuerzas que se desarrollan en el plano de la fachada, las reacciones en el eje perpendicular Y son de orden mucho menor y tienen magnitudes mucho más proporcionadas a la carga de viento que actúa sobre la fachada.

En el caso de la fachada 01F de doble curvatura las fuerzas en los ejes de los cables son de magnitud menor a los otros casos por el menor valor de pretensado, pero se sigue observando una enorme diferencia entre las reacciones en los cables verticales y los horizontales. En este caso las fuerzas en el eje Y no experimentan ninguna reducción ya que tienen relación directa con las fuerzas de viento que actúan en esta dirección.

En cuanto a estas fuerzas es importante, como resumen, tener en cuenta que en el plano de la fachada se producirán enormes esfuerzos sobre la estructura del edificio que soporta la fachada. Estos esfuerzos se deben al pretensado, pero los valores que toman son considerablemente mayores por la forma en que la estructura de cables soporta la carga de viento, dando lugar a reacciones en dirección del viento pero también en dirección del cable, lo cual aumenta mucho la reacción y debe considerarse cuidadosamente el estudio de cargas en este sentido.

4.4. Deformaciones angulares en la geometría de fachada

Un aspecto importante, habida cuenta que la fachada experimenta grandes deformaciones bajo la acción del viento, es el estudio de la variación de la geometría. Por un lado puede suponer un condicionante importante en el proyecto

4.4. DEFORMACIONES ANGULARES EN LA GEOMETRÍA DE FACHADA 59

global del edificio, pero por otro, y ya dentro del propio diseño de la fachada, condiciona de manera directa la forma en que debe funcionar el anclaje de vidrio para permitir el movimiento de las piezas de acristalamiento dentro de los anclajes y evitar su rotura.

Cuadro 4.7: Cambios en geometría. Modulaciones tipo

	Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Desplazamiento máx en vértices	4,3 mm	5,6 mm	6,3 mm	9,5 mm
Variación máx de ángulo	3,78°	3,82°	3,83°	4,14°

Cuadro 4.8: Cambios en geometría. Variaciones sobre caso tipo

	Caso 01	Caso 01B	Caso 01C	Caso 01D
Desplazamiento máx en vértices	4,3 mm	4,3 mm	6,7 mm	4,3 mm
Variación máx de ángulo	3,78°	4,52°	4,04°	0,95°

Cuadro 4.9: Cambios en geometría. Fachadas con curvatura y doble cable

	Caso 01	Caso 01E	Caso 01F	Caso 01G
Desplazamiento máx en vértices	4,3 mm	4,4 mm	2,0 mm	A mm
Variación máx de ángulo	3,78°	4,38°	—	A°

Una de las métricas que se ha introducido al efecto en la herramienta de cálculo es la detección de todos los cables que concurren en un nudo de la estructura, donde presumiblemente se ubicará un anclaje para soportar paños de vidrio. En cada uno de los nodos se analizan los cables que forman 180° entre sí y cómo varía el ángulo que forman en el estado deformado de fachada. Los cuadros 4.7, 4.8 y 4.9 recogen los datos de variación angular de estos cables, que permiten trasladar esta deformación angular al dibujo del anclaje para el diseño de espesores de separadores de neopreno y geometría general de la parte de anclaje que aloja los vidrios.

Por otra parte, se extrae también información acerca del desplazamiento máximo que puede darse en un nudo dentro del plano de la fachada, que queda igualmente reflejado en los cuadros indicados.

La variación angular, que puede verse representada para los casos del primer cuadro en el plano 4.03 al final del capítulo, se mantiene en todos los casos en ángulos cercanos a 4°. La diferencia entre los distintos casos estudiados es relativamente pequeña y la deformación en cada uno de los nudos se mantiene en valores controlables (ver plano 4.03) pese a que intuitivamente se pueda pensar que existen grandes movimientos a nivel del nudo en donde se encuentran cada anclaje con el vidrio. El desplazamiento de estos nudos sí es de una gran magnitud, aunque sin embargo a nivel local los valores tanto angular como de desplazamiento en su plano del nudo se mantienen en una escala relativamente baja.

En los resultados del análisis en CAD puede apreciarse, apoyándose en el diagrama que puede obtenerse de la herramienta donde se numeran todos los

nudos y cables, que las mayores deformaciones se producen en las esquinas de la fachada, donde los ángulos se hacen más acusados. En la zona central de la fachada la curvatura se hace más suave y a nivel local las deformaciones son más pequeñas, de manera que sería incluso un recurso válido diseñar de manera diferente los movimientos de los vidrios en la zona perimetral y en la zona central de la fachada.

Cabe destacar en este sentido el caso 01D de montantes cable, donde no existen cables horizontales. En este caso la fachada tendría una deformación en forma cilíndrica en lugar de esférica ya que solamente tiene cables en una dirección. En este caso la deformación angular es mucho menor al resto de los casos. Los encuentros en las esquinas en las fachadas en el resto de los casos son los puntos en los que las curvaturas cambian con mayor rapidez, produciendo estas variaciones angulares máximas en estos vidrios en esquina.

4.5. Deformaciones en los paños de vidrio de fachada

En esta última sección de muestra da datos analíticos de resultados de los cálculos de distintos casos de fachadas se muestra una métrica implementada para evaluar cómo se deforman los paños de vidrio soportados por las estructuras de cables de fachada.

El modelo de cálculo para estas fachadas incluye únicamente la red de cables en un modelo de nudos y barras, considerando que los vidrios son elementos soportados pero no aportan resistencia estructural al conjunto (de acuerdo con los resultados en [9]). Aunque no forman parte del modelo de estructura es posible obtener datos para evaluar la deformación que sufrirían los vidrios dentro de la misma y, llegado el momento, serviría también para hacer el análisis pertinente sobre un modelo parcial de estructura analizando por Elementos Finitos una pieza de vidrio en detalle sometida a las deformaciones de la estructura.

Cuadro 4.10: Acristalamientos. Modulaciones tipo

	Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
GL01 - Desviación	26,4 mm	31,7 mm	35,3 mm	53,0 mm
GL01 - Ratio	0,68°	0,71°	0,73°	0,86°
GL02 - Desviación	8,5 mm	20,4 mm	13,4 mm	25,1 mm
GL02 - Ratio	0,22°	0,45°	0,27°	0,41°
GL03 - Desviación	0,1 mm	0,1 mm	0,5 mm	0,7 mm
GL03 - Ratio	0,003°	0,003°	0,01°	0,01°
GL04 - Desviación	3,5 mm	3,0 mm	4,5 mm	12,5 mm
GL04 - Ratio	0,09°	0,07°	0,09°	0,2°
GL05 - Desviación	47,4 mm	37,9 mm	41,5 mm	57,6 mm
GL05 - Ratio	1,24°	0,85°	0,86°	0,93°

A efectos de extraer información sobre cómo se comportarían los vidrios dentro de la estructura se ha considerado una métrica definida de acuerdo con

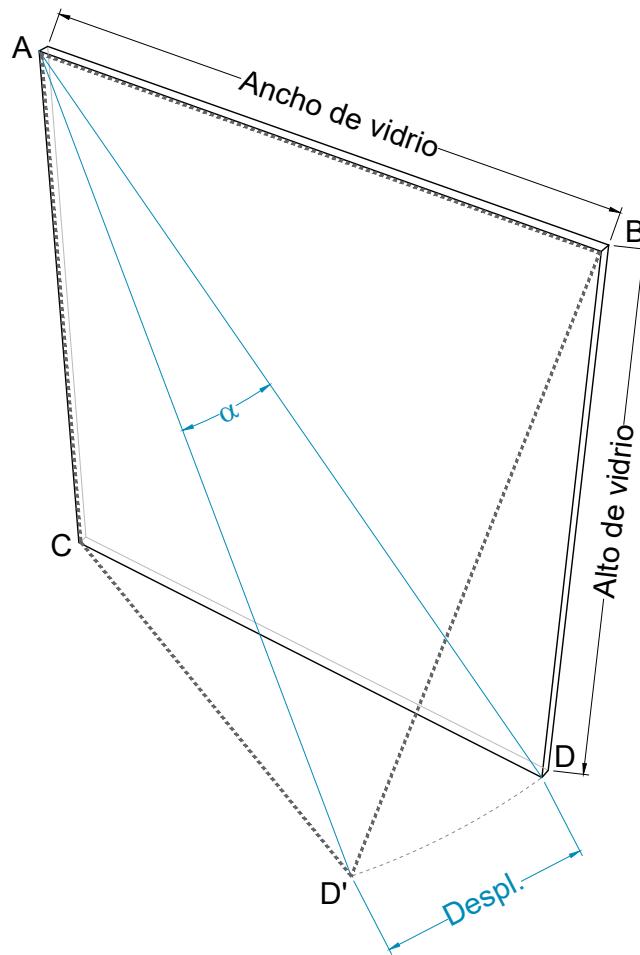


Fig. 4.2: Métrica implementada en cálculo para evaluar la deformación de piezas de vidrio en la estructura. En la métrica se incluye el desplazamiento total del vértice de vidrio y la medida angular.

lo indicado en la figura 4.2. Debido a la deformación de la fachada, los vidrios se ven sometidos a desplazamientos en sus cuatro vértices que pueden ser diferentes entre sí, dando lugar a que los vértices del vidrio se sitúen fuera del mismo plano y se produzcan flexiones en la pieza. Para describir este comportamiento se ha considerado la geometría inicial del vidrio formada por cuatro puntos contenidos en un mismo plano, tomando como plano inicialmente el paño de vidrio. En la configuración deformada de fachada se toman tres de los vértices del vidrio como parte de un plano, y en el cuarto vértice se mide la distancia a la que estaría desplazado con respecto a este plano formado por los puntos A,B y C de la figura. Esto equivaldría a fijar una pieza de vidrio ABCD en sus cuatro vértices y desplazar el vértice D a la posición D' provocando una flexión en la pieza.

Esta distancia es un valor absoluto medido en milímetros, pero puede tener efectos diferentes en función del tamaño del vidrio, de manera que debe

Cuadro 4.11: Acristalamientos. Variaciones sobre caso tipo

	Caso 01	Caso 01B	Caso 01C	Caso 01D
GL01 - Desviación	26,4 mm	76,1 mm	19,9 mm	0 mm
GL01 - Ratio	0,68°	1,25°	0,32°	0°
GL02 - Desviación	8,5 mm	18,0 mm	18,5 mm	0 mm
GL02 - Ratio	0,22°	0,29°	0,31°	0°
GL03 - Desviación	0,1 mm	0,2 mm	0 mm	0 mm
GL03 - Ratio	0,003°	0,003°	0°	0°
GL04 - Desviación	3,5 mm	15,8 mm	16,1 mm	0 mm
GL04 - Ratio	0,09°	0,26°	0,27°	0°
GL05 - Desviación	47,4 mm	—	33,8 mm	0 mm
GL05 - Ratio	1,24°	—	0,03°	0°

Cuadro 4.12: Acristalamientos. Fachadas con curvatura y doble cable

	Caso 01	Caso 01E	Caso 01F	Caso 01G
GL01 - Desviación	26,4 mm	8,3 mm	10,6 mm	18,2 mm
GL01 - Ratio	0,68°	0,21°	0,26°	0,61°
GL02 - Desviación	8,5 mm	10,7 mm	5,2 mm	7,4 mm
GL02 - Ratio	0,22°	0,27°	0,13°	0,18°
GL03 - Desviación	0,1 mm	19,3 mm	4,7 mm	0,1 mm
GL03 - Ratio	0,003°	0,50°	0,12°	0,002°
GL04 - Desviación	3,5 mm	24,7 mm	8,7 mm	3,3 mm
GL04 - Ratio	0,09°	0,64°	0,22°	0,09°
GL05 - Desviación	47,4 mm	28,7 mm	9,6 mm	41,9 mm
GL05 - Ratio	1,24°	0,74°	0,24°	1,16°

introducirse alguna métrica que pueda valorar de manera relativa también esta deformación. A este efecto se introduce también el ángulo alpha de deformación, que indicaría cuánto se desvía la diagonal formada por los puntos AD' (que en la configuración inicial serían los puntos AD) angularmente, de manera que es posible tener una idea intuitiva también de la deformación que sufre un paño fuera de su plano en una medida relativa que permite comparar distintos tamaños de vidrio.

Esta métrica debe calcularse definiendo mediante puntos en el modelo las piezas de vidrio que se desea evaluar. Esto se hace mediante los "glazing filters" descritos en el capítulo 3, y en los distintos casos de estudio se introdujeron cinco unidades de vidrio en distintas zonas de fachada (ver plano 3.01 en el que se indican las unidades de vidrio GL01 a GL05). Estas unidades se ubican en zonas que van desde la esquina inferior de la fachada, a zonas intermedias en la mitad inferior y superior de la fachada, una unidad central y una unidad de vidrio situada en la parte superior.

En los distintos casos de estudio puede observarse como, invariablemente,

las piezas de acristalamiento que sufren mayores desplazamientos son las indicadas como GL05, que corresponden a un vidrio situado en el borde superior de fachada, próximo a una esquina. En la sección anterior indicábamos que la mayor deformación angular se produce en las zonas de esquina y, efectivamente, la mayor deformación en el vidrio se produce en estas zonas. En comparación a la unidad de vidrio GL01, que se sitúa en el borde inferior, la pieza de la parte superior sufre mayores deformaciones ya que la fachada está sometida a una carga de viento creciente con la altura sobre rasante del punto de aplicación, de forma que tiene sentido que en esta zona superior se produzcan los movimientos de mayor magnitud.

De manera similar se repite el patrón con el vidrio marcado como GL03 que se sitúa en el punto central de fachada. En esta zona la curvatura que adquiere la fachada deformada es pequeña y, pese a ser la zona en la que se producen los desplazamientos más grandes, los vidrios de la parte central son los sometidos a menores deformaciones fuera de su plano.

En las fachadas con curvatura cabe destacar que la deformación a que se ven sometidos los vidrios es menor, aunque debe recordarse que en este caso, debido a la curvatura de fachada, los vidrios parten en este caso de una situación no plana o de curvatura inducida ya en su estado no deformado. El estudio del vidrio curvado en frío en este tipo de casos ha sido en los últimos años un asunto de gran interés de estudio teórico y práctico.

En los cuadros de datos cabe destacar además que, pese a las aparentes diferencias en la métrica de desviación del punto D con respecto al plano imaginario del vidrio formado por sus otros tres vértices (indicado como "Desviación" en cada cuadro), la métrica relativa del ángulo de desviación es mucho más similar en todos los casos y nos permite hacer una comparación más directa pese a las diferentes dimensiones entre los casos de estudio.

En esta métrica cabe destacar de nuevo el caso 01D de fachada con montantes cable. En esta fachada, debido a que la deformación tiene forma cilíndrica y no esférica al estar apoyada solamente en los bordes inferior y superior de los cables, la deformación teórica de los vidrios sería nula y permitiría seguir teniendo paños completamente planos de vidrio con la fachada deformada. El problema en este caso se encontraría en los vidrios extremos en caso de que los anclajes contiguos al último cable fuesen fijos. Aquí se concentraría toda la deformación en un único vidrio, de modo que sería un punto donde aplicar una unión deslizante cerrada por medio de una junta con cepillos que permitiesen moverse libremente a este vidrio con respecto a la fachada fija con la que se encontraría. Soluciones similares se han citado ya en el capítulo 2 (ver [25]).

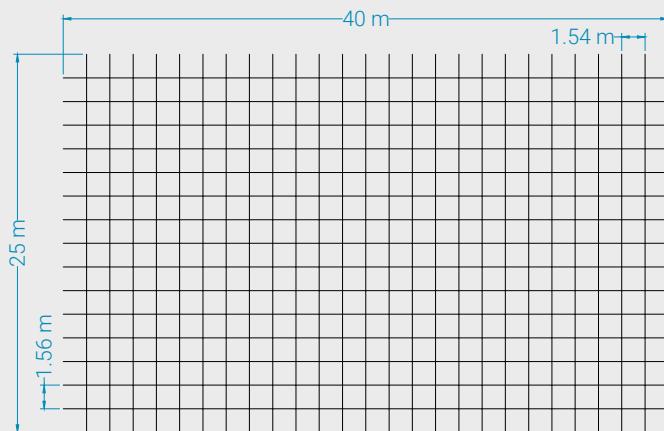
4.6. Análisis en mayor profundidad y otros datos

En las secciones anteriores se han mostrado algunos datos sobre los cuales se han extraído algunas conclusiones sobre los resultados de cálculo de estos casos de estudio. En un caso más detallado de análisis sería posible, tomando los resultados completos (en forma de archivo de CAD de la estructura deformada, plano de la estructura con la numeración de nodos y cables, y listado de todos los datos de cálculo para todos los nudos, cables y acristalamientos)

obtener conclusiones mucho más detalladas inspeccionando las distintas zonas de fachada y observando no solamente los valores máximos, como se ha hecho en las secciones anteriores, sino todo el conjunto de fuerzas, deformaciones, y otros parámetros que se dan en el caso de estudio.

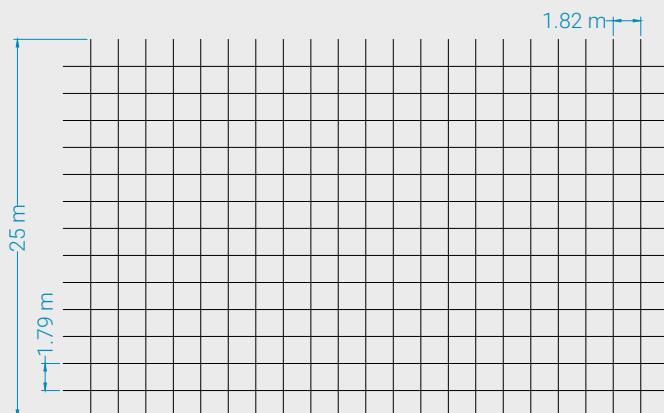
Plano 4.01

Casos de cálculo



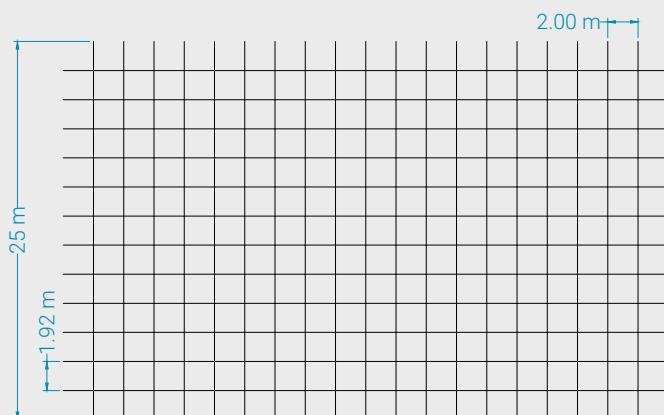
Caso 01

Estructura de dimensión global 40x25m
25 cables horizontales
15 cables verticales
Dimensión de vidrio aprox. 1,55 m
Superficie de pieza de vidrio 2,37 m²



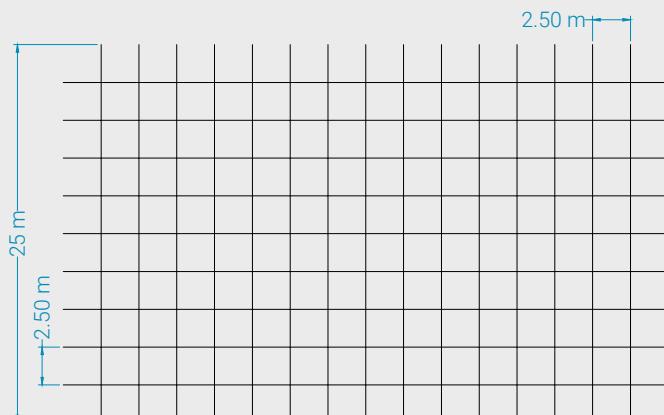
Caso 02

Estructura de dimensión global 40x25m
21 cables horizontales
13 cables verticales
Dimensión de vidrio aprox. 1,80 m
Superficie de pieza de vidrio 3,25 m²



Caso 03

Estructura de dimensión global 40x25m
19 cables horizontales
12 cables verticales
Dimensión de vidrio aprox. 2,00 m
Superficie de pieza de vidrio 3,85 m²

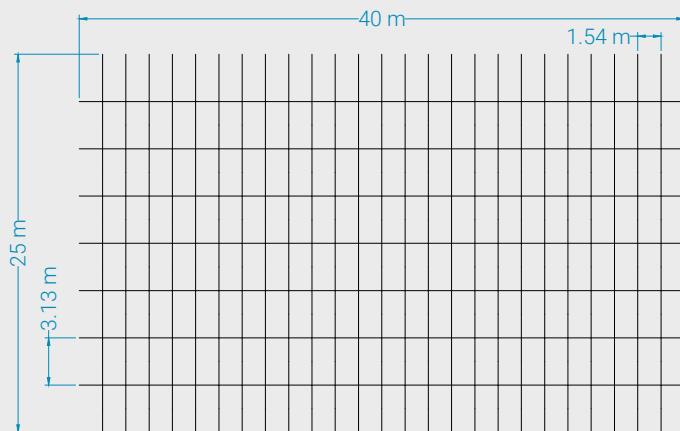


Caso 04

Estructura de dimensión global 40x25m
15 cables horizontales
9 cables verticales
Dimensión de vidrio aprox. 2,50 m
Superficie de pieza de vidrio 6,25 m²

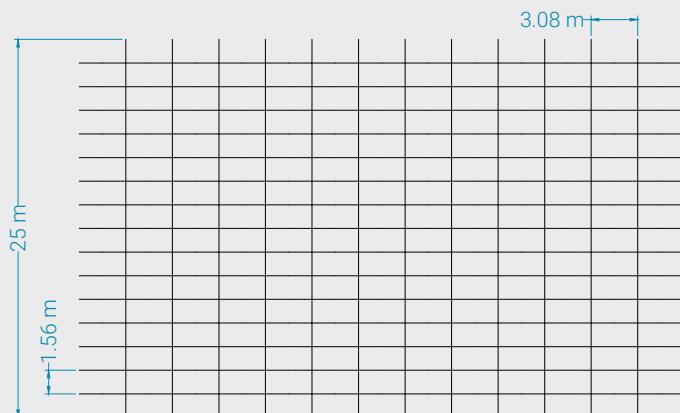
Plano 4.02

Casos de cálculo. Variaciones sobre CASO 01



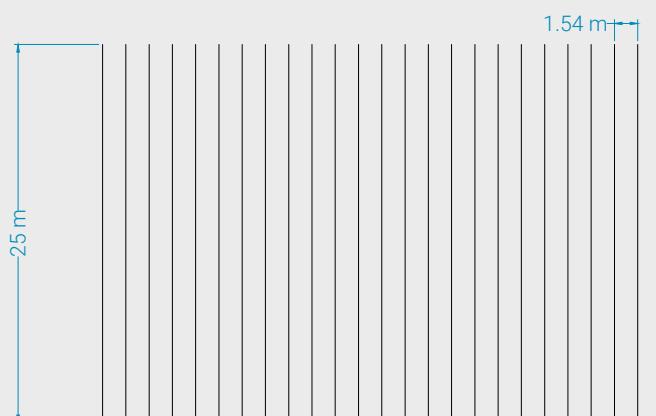
Caso 01 B

Estructura de dimensión global 40x25m
25 cables horizontales
7 cables verticales
Modulación de vidrio doble en vertical
Superficie de pieza de vidrio $4,74 \text{ m}^2$



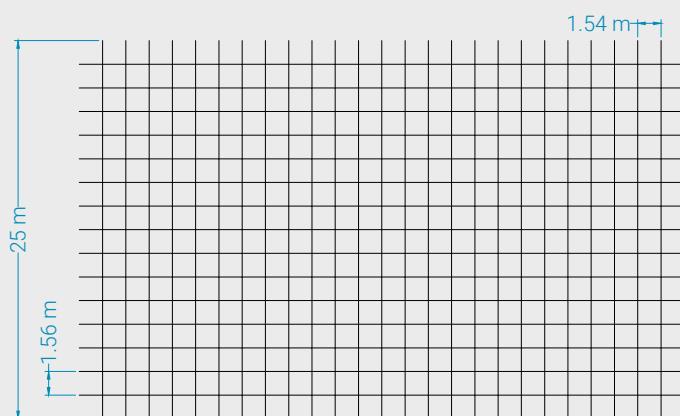
Caso 01 C

Estructura de dimensión global 40x25m
12 cables horizontales
15 cables verticales
Modulación de vidrio doble en horizontal
Superficie de pieza de vidrio $4,74 \text{ m}^2$



Caso 01 D

Estructura de dimensión global 40x25m
Sin cables horizontales
25 cables verticales
Modulación de vidrio igual a CASO 01
Superficie de pieza de vidrio $2,37 \text{ m}^2$



Caso 01 E

Estructura de doble curvatura, paraboloide hiperbólico
Cables en línea recta
Modulación en alzado igual a CASO 01

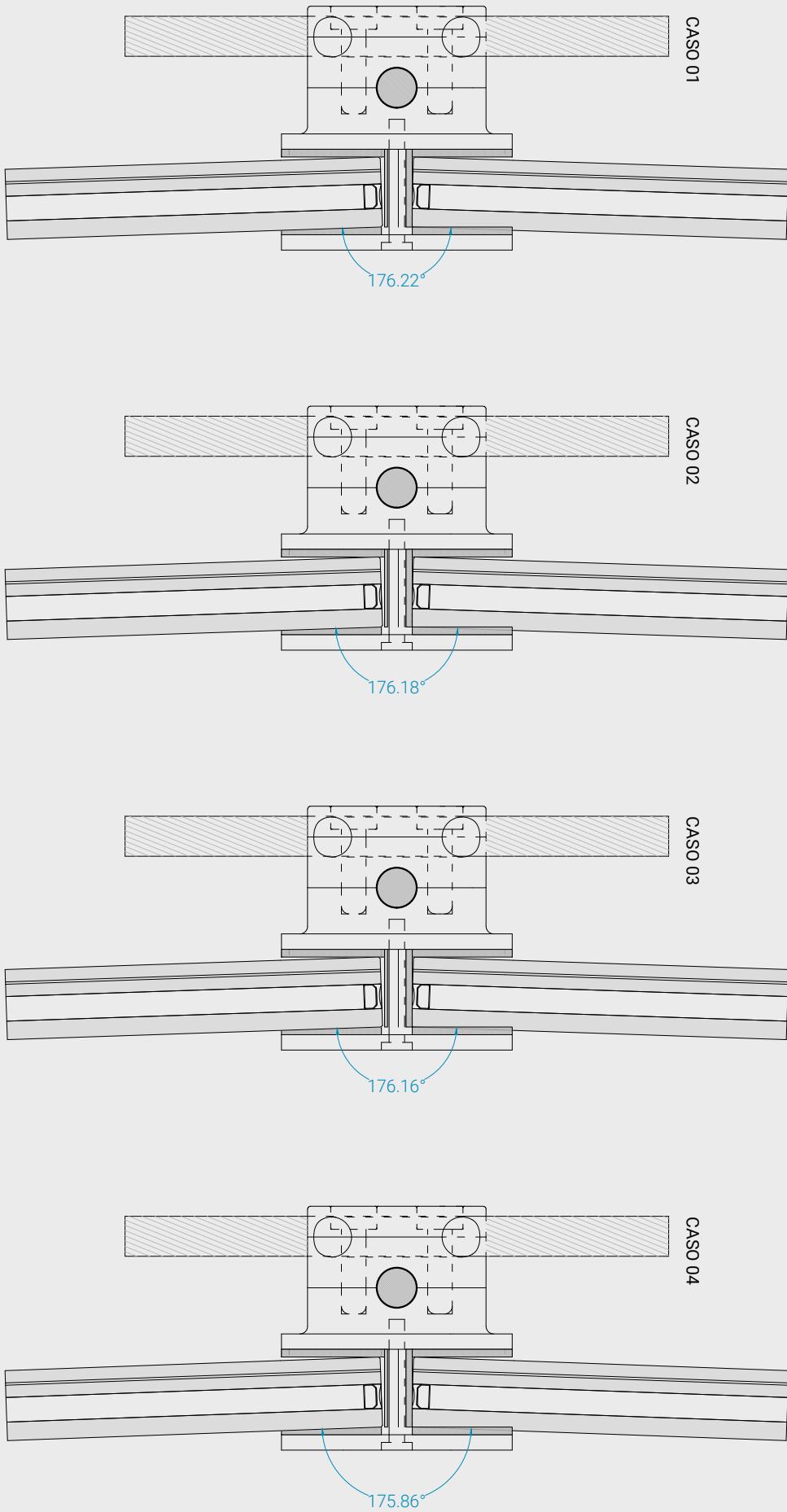
Caso 01 F

Estructura de doble curvatura, paraboloide hiperbólico
Cables en curva
Modulación en alzado igual a CASO 01

Caso 01 G

Estructura plana
Con doble cable en vertical añadiendo un cable trasero
Modulación igual a CASO 01

Movimiento de vidrio en anclaje. Valores ELU



5

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

5.1. Conclusiones

Este trabajo ha tenido un desarrollo mayoritariamente empírico. A través del desarrollo de la herramienta de cálculo, des estudio de la evolución y detalles de distintos proyectos y del análisis de casos de estudio ha sido posible extraer algunas conclusiones, en su mayor parte parciales, a la vez que se abren muchas cuestiones abiertas a posterior estudio más detallado.

Uno de los objetivos era comprender de una manera más detallada el funcionamiento de las estructuras de fachadas de cables pretensados, para lo cual se consideraba necesario concretar en números y cálculos algunos valores para tener una idea de la escala de las fachadas, de los materiales y de los esfuerzos que tienen lugar en este tipo de soluciones. A lo largo del capítulo 4 han podido verse algunos comentarios sobre los resultados que, si bien son completamente parciales y limitados a los casos estudiados, pueden dar una idea acerca del comportamiento de los distintos parámetros de diseño (tensiones, esfuerzos, deformaciones...) y de cómo cambian con las variaciones en la solución de proyecto. Uno de los puntos fundamentales para abordar de forma empírica este estudio es el carácter no lineal de este tipo de estructuras, que no permite conocer de una forma más analítica cómo puede variar cada parámetro en función del diseño de la fachada.

Otra de las motivaciones estaba relacionada con la convicción de que es necesario, en la disciplina del proyecto de fachadas tecnológicas, disponer de herramientas genéricas, abiertas y adaptables para poder comprender su funcionamiento interno y asegurar el control completo de los resultados y la adaptabilidad a las necesidades concretas a cada proyecto. Este objetivo considera cumplido, si bien la herramienta de cálculo es susceptible de innumerables mejoras. La elaboración de una herramienta de este tipo, pese a que puede parecer una tarea más propia de la programación o de la ingeniería mecánica, no supone una aventura demasiado alejada del trabajo propio de la Arquitectura y el dominio de estas herramientas de análisis mecánico proporciona recursos muy útiles a la hora de resolver un proyecto de fachada.

La información recopilada en evolución y estado de la técnica ha permitido

también conocer un poco mejor los orígenes, límites y posibilidades todavía no exploradas de este tipo de fachadas. En la disciplina de diseño de fachadas tecnológicas las posibilidades técnicas se amplían continuamente en la actualidad, por lo que este conocimiento es valioso a la hora de enfrentarse a un proyecto de fachada tecnológica en un contexto de innovación que produce resultados nuevos a un ritmo muy elevado.

Los resultados de cálculo han permitido también obtener ciertas nociones más concretas sobre el funcionamiento estructural de las fachadas de cables pretensados, de manera que ha sido posible entender, si bien de una manera limitada a los casos estudiados, cómo se producen los esfuerzos y deformaciones en la estructura, cuáles son las demandas de una fachada de esta tipología al edificio en que se ubica, y cómo pueden variar estos parámetros cambiando ciertos aspectos del diseño de la misma. Ha sido posible también tener una idea de las dificultades de tratar estructuras no lineales, donde la obtención de resultados válidos está sujeta a un proceso iterativo de acercamiento progresivo a soluciones viables.

Al mismo tiempo que ha sido posible obtener algunas conclusiones, se han abierto muchas preguntas y posibles caminos que requerirían un estudio más pormenorizado o abrir nuevas vías de estudio. Estas preguntas abiertas pueden resultar muy fructíferas dado que no ha sido posible encontrar en la literatura ninguna publicación que recopile de una manera sistemática este tipo de conocimiento. Parte de estas preguntas abiertas se exponen a continuación.

5.2. Futuras líneas de trabajo

En primer lugar, y en relación con la metodología elegida en este trabajo principalmente empírica, cabría completar las pruebas expuestas en los casos de estudio hacia alguno de los dos posibles caminos descritos a continuación, si bien podría haber otros igualmente interesantes.

En primer lugar, una extensión lógica desde la resolución de una serie de casos de estudio hacia un trabajo más global sería establecer de una forma más general una metodología para el análisis y diseño de fachadas soportadas por cables. Este objetivo no sería fácil teniendo en cuenta lo específico de cada caso de proyecto, sin embargo sí sería posible sistematizar de alguna manera el conocimiento adquirido en base a esta pequeña práctica de casos de estudio para tener una serie de principios o métodos que apoyasen el desarrollo de un proyecto de fachada de cables pretensados.

En segundo lugar, y en una vertiente más práctica, una posible extensión del trabajo en base a los casos de estudio podría consistir en el desarrollo completo de un proyecto de fachada. Esto supondría dirigir los distintos casos de estudio hacia un objetivo más concreto dentro del contexto más amplio de un proyecto de Arquitectura, de manera que pudiese verse en mayor detalle todos los aspectos de desarrollo hasta concretarse en la propuesta final con su justificación mecánica y el diseño completo de todos los detalles constructivos, lo cual podría llegar a incluir los documentos de desarrollo constructivo y de inspección posterior durante la vida útil de la fachada.

La profundidad en que se ha abordado la materia en el trabajo es susceptible también de desarrollo posterior. Se ha abordado, dada la extensión de un trabajo de este tipo, limitando la metodología a la búsqueda de información

a través de la documentación disponible en forma de artículos y publicaciones técnicas y de proyectos. Como se ha visto en el capítulo 2, sin embargo, gran parte del conocimiento en este ámbito depende de los agentes implicados en el diseño, desarrollo de ingeniería y construcción, de modo que en un trabajo más extenso sería indispensable el contacto con la industria para tener una visión más completa del conocimiento disponible. En un trabajo de mayor profundidad sería indispensable el contacto con la industria y conocer de primera mano los aspectos más prácticos relacionados con el trabajo del autor de proyecto y del fachadista, así como de los demás agentes implicados en la construcción de una fachada tecnológica de este tipo.

La herramienta de cálculo, como se ha indicado, resulta funcional aunque es susceptible de innumerables extensiones y mejoras. En cuanto a los aspectos puramente técnicos del software de cálculo, es posible hacer grandes mejoras en la optimización de la programación del motor de cálculo, como por ejemplo:

- Adaptación automática o asistencia técnica del programa para ajustar los parámetros del método de resolución del sistema. En la elección de pasos de cálculo por ejemplo, si se establece en un número de pasos demasiado bajo, la estructura puede resultar difícil de resolver o incluso no converger. Si se establece un número de pasos alto la estructura se resuelve a costa de un tiempo excesivo de cálculo. Sería posible incluso implementar un sistema adaptativo que optimizase la elección de pasos para resolver con la mejor velocidad y aproximación posibles el sistema.

- De la misma manera, el umbral de desequilibrio que se obtiene tras la convergencia del cálculo podría ser objeto de optimización ajustando automáticamente este umbral, especialmente para ir reduciéndolo hacia el final del cálculo y mejorar la rapidez del proceso global de resolución.

Los efectos dinámicos de las cargas sobre la estructura no se tienen en cuenta en una herramienta de este tipo, quedando fuera del ámbito de alcance de este análisis estructural. En este tipo de estructuras se revela como un factor importante, de forma que sería un camino importante a la hora de disponer de una herramienta más completa en el cálculo de estructuras flexibles para fachadas.

El software de cálculo es un código desarrollado de modo personal y en el ámbito académico, y de esta forma comparte con otros trabajos de este tipo algunas características que lo diferencian de programas comerciales:

- Se trata de un código sin interfaz gráfica de usuario, que exige cierto conocimiento técnico y un esfuerzo importante para entender su funcionamiento y la interacción necesaria con el código para poder utilizarlo. En este sentido tiene una exigencia mucho mayor a cualquier software comercial, en el que la usabilidad y la facilidad de uso en su interfaz sería un campo claro de mejora en caso de que se extendiese este software hacia un uso más universal del mismo.

- Como código propio de este ámbito adolece de los defectos de un programa no escrito con estándares de desarrollador de software. A nivel de programación posiblemente carezca de profesionalidad en la construcción del programa, así como de numerosos mecanismos de prevención de errores por información incorrectamente introducida o completa.

- A nivel de usabilidad se ha tratado de implementar un método rápido e intuitivo para introducir y extraer la información a través de archivos DXF y XLS, sin embargo, sería posible hacer grandes mejoras a la hora de facilitar la gestión de la información y resultados.

El propio diseño del método de resolución permite analizar cualquier es-

tructura formada por barras articuladas, sean o no de cables. En este sentido es posible no solamente analizar estructuras de fachadas tensadas, sino cualquier estructura tipo cercha con barras rígidas y combinaciones de barras con cables, hasta estructuras formadas únicamente por cables. Una posible mejora que podría extender de manera interesante el uso de esta herramienta sería implementar la posibilidad de barras empotradas que permitiesen la transmisión de momentos entre sus extremos. Esto permitiría modelar de una manera mucho más completa las estructuras de fachadas introduciendo las condiciones de contorno de forma más real, haciendo por ejemplo que los apoyos de la estructura de cables esté anclada a una estructura susceptible de deformarse por efecto de la carga de fachada (en especial, por acción del pretensado) y no solamente modelando los apoyos como empotramientos perfectos. Por otro lado, permitiría modelar ciertos tipos de estructuras de fachadas que principalmente están formadas por cables pero tienen entre sus miembros barras continuas entre tramos de cables.

A nivel operativo del programa se han desarrollado en diferente nivel de profundidad opciones para la importación de la información. En primer lugar se ha programado la posibilidad de exportar geometría desde el software de diseño 3D Blender. También a partir de archivos más genéricos describiendo las coordenadas de nodos y miembros a través de archivos CSV. En mayor medida se ha desarrollado la posibilidad de importar información a partir de archivos DXF de AutoCAD. En un desarrollo posterior podrían implementarse otras opciones para incrementar la fluidez de intercambio de información con el código. De especial interés resultaría por ejemplo la posibilidad de integrar el código en Rhinoceros, permitiendo la posibilidad de introducirlo como parte del motor paramétrico interactuando directamente con la geometría dentro del programa.

En este trabajo se han considerado únicamente estructuras de cables pretensados fijadas en sus extremos rígidamente. Sin embargo existen experiencias de estructuras cuyos cables tienen terminaciones en muelles con el objetivo de asegurar la tensión en caso de dilataciones u otros movimientos. Un desarrollo posible podría ser la introducción de los modelos de muelles en la herramienta de análisis, ampliando el ámbito de uso de la misma.

Anexo A

Código de FTES. Documentación técnica

En este anexo se describen los detalles técnicos de la herramienta de cálculo FTES. En un texto de este tipo no es operativo incluir el código fuente completo, de manera que tanto el código como los archivos correspondientes a los casos de estudio están disponibles en el repositorio accesible a través de al web siguiente:

https://github.com/gumerfreire/FTES_Cablestructures

A.1. Ejecución del código

La herramienta de cálculo está escrita en lenguaje Python, versión 3. Para la ejecución del código es necesario disponer de un intérprete de este lenguaje, que puede obtenerse libremente en Internet. Se hace uso además de algunas librerías adicionales que deben instalarse en el entorno de Python. La manera más directa de obtener todo el conjunto y ejecutar el código directamente es descargar la distribución Anaconda (<https://www.anaconda.com/>), ya que a través de esta distribución es posible instalar en un solo paso el entorno de Python, las librerías y el IDE Spyder con el que es posible visualizar el código cómodamente.

A.2. Estructura del código

El código contenido en FTES.py se estructura con una clase que funciona como elemento único de interacción con la herramienta. En el código existen otras clases (node y member) que se utilizan internamente para describir nodos y barras de la estructura, pero no están orientadas al manejo directo por parte del usuario. EL uso de la herramienta pasa por importar la librería con la sentencia común en lenguaje Python para esta operación:

```
import FTES
```

Una vez importada, puede crearse un objeto estructura a partir de la clase FTES con una sentencia del tipo:

```
estructura = FTES.FTES_Structure()
```

A partir de este objeto estructura creado es posible llevar a cabo las operaciones necesarias con los métodos implementados (importar geometría, definir cargas, proceder al cálculo, etc.). A continuación se describen los principales métodos que contiene el objeto FTES.

A.3. Clases y funciones de la herramienta FTES

A continuación se listan las clases y funciones de la herramienta de cálculo, documentadas a través de sus docstrings (textos iniciales que sirven de descripción de cada función o clase en el propio código). Estas docstrings que sirven de guía en el código están escritas en inglés, ya que el código de la herramienta FTES está escrito y comentado en este idioma por facilidad de adaptar el contenido a la nomenclatura e idioma de la documentación de las librerías utilizadas en el desarrollo.

A.3.1. Clases

Las dos clases auxiliares, Node y Member, y la clase principal FTES_Structure, se explican a continuación.

Node

Structure data to store information of a node in a structure. This class provides structure to store information about coordinates, restraints and results of structure analysis of a node in a structure composed by nodes and members. The structure is internally used by class FTES_Structure.

Member

Structure data to store information of a member in a structure. This class provides structure to store information about geometrical, mechanical and other properties of a member in a structure. The structure is internally used by class FTES_Structure.

FTES_Structure

Main class of FTES Structure cable analysis

This class contains the methods to create a structure composed by nodes and bars representing cables or rigid bars for the solution of a system of equations to obtain forces and displacements in the structure.

The structure may be prestressed and the method uses a nonlinear approach to solve the analysis taking into account big displacements and nonlinear behaviour of the rigidity of the structure, which changes under applied forces.

A.3.2. Funciones de la clase FTES_Structure

Las funciones contenidas en la clase FTES_Structure proporcionan los puntos a través de los cuales se puede interactuar con la herramienta para definir información, lanzar cálculos y exportar resultados.

FDM

Force Density Method implementation

Force Density methos implementation as described by H.J.Scheck (1974). This method allows to find a possible equilibrium configuration for a set of nodes and members under certain forces.

This implementation uses the data of the structure (in termos of member connections and loads) to find a compatible form. The method does not know the original coordinates of the nodes, only the map of connections between members.

This method exports a DXF file. The function can be further developed to allow FTES_Structure to use the found form to perform the analysis.

log_record

Method to print messages on screen while recording them into a dataframe.

This method works as a substitute of the print function, acting as a print function but also recording the messages to a dataframe to allow the export of the recorded data as a log into the results file.

set_defaultMemberValues

Set default mechanical values to assign to the structure.

Parameters:

E : Float, Default elasticity modulus

A : Float, Default cross section member area

P : Float, Default prestress

sw : Float, Default self weight

cable : Bool, Default definition as cable or rigid bar

set_solverParameters

Method to set solver parameters.

Parameters:

forceIncrements : Integer, Number of increments to divide the applied force into incremental steps

convThreshold : Integer, Threshold to consider convergence in the iterative method

iterationLimit : Integer, Maximum interations before considering non-convergence

import_CsvStructure

Method to import structure data from CSV files

This method allows to introduce structure data from tho CSV files. The vertices file expects a CSV file containing a table with three columns. Each row corresponds to a node and the columns correspond to its X,Y,Z coordinates.

The CSV file definig the members expects a file containing a table with two columns. Each row corresponds to a member, and the columns store the numbers for the initial and final nodes of the member.

import_DxfStructure

Method to import structure data from a DXF file.

This method allows the introduction of a structure geometry and data from a DXF file containing a series of lines in layer 0. The function interprets each line with a member and detects the endpoints in contact with other members to set the same node for various members.

It is possible to import as well member filters and node filters through lines and points in layers starting with MF_ and NF_ respectively. See documentation for more information on member, node and glazing filters.

export_DxfStructure

Method to generate a DXF file with the original and deformed structure.

This methos allows to draw the analyzed structure ina DXF file containing the original configuration of the structure and the deformed state after the anslysis.

plotStructure

Method to plot ths structure on screen and save it to a PDF file

This method allows to plot theimported structure on screen showing the automatic numeration of nodes and members. It is possible to save the plot as a PDF file for further consultation of the node and member numbers.

The function detects the main plane of the structure to produce a 2D plot either in XY, XZ or YZ plane.

This function can be further developed for more advanced visualizations of the structure and to show more information such as forces, axis or other selected information.

structureInfo

Method to show general information of the structure on screen.

The development of this method was stopped in favour of exporting the information of the structure to a XLS file from a dataframe.

addForce

Method to add forces to selected nodes in the structure.

Parameters:

force : Float, Magnitude of force to de applied

axis : String, Direction (X,Y or Z) in which the force may be applied.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node numbers to apply force

Nodefilter - Name of a existing node filter

Nodelist - List of node numbers to apply the force

Savefilter - Save the node list as a filter

addRestraint

Method to add restraints to selected nodes in the structure.

Parameters:

axis : String, Direction (X,Y or Z) in which the restraint may be applied.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node numbers to apply restraint

Nodefilter - Name of a existing node filter

Nodelist - List of node numbers to apply the restraint

Savefilter - Save the node list as a filter

export_Data

Method to export analysis data to a XLS file

This method gathers the information of the structure after an analysis and creates three dataframes to export into a single XLS file as a complete report of the result of analysis.

The XLS file may contain the following information:

- LOG. Contains the complete history of messages during the analysis
- NODES. Contains complete information about nodes in the structure
- MEMBERS. Contains complete information about the members in the structure
 - ANGLES. Contains iformation about angles variation in cables
 - GLAZING. Contains information about deformation in defined glazing units

set_Cable

Method to define members of the structure as cable.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to define as cable

Savefilter - Save the member list as a filter

set_Bar

Method to define members of the structure as bars.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to define as bar

Savefilter - Save the member list as a filter

set_A

Method to define cross section area of selected members.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to apply property

Savefilter - Save the member list as a filter

set_E

Method to define elasticity modulus of selected members.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to apply property

Savefilter - Save the member list as a filter

set_P

Method to define prestress of selected modules.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to apply property

Savefilter - Save the member list as a filter

set_sw

Method to define self weight of selected modules.

Accepted kwargs:

Csvfile - CSV containing list of node member numbers

Memberfilter - Name of a existing member filter

Memberlist - List of member numbers to apply property

Savefilter - Save the member list as a filter

calculateTransMatrices

Internal method to be called by Calculate_Structure

Calculate transformation matrices for each member based on current deformed shape for the structure. Current deformed shape is initial position plus cumulative displacements UG.

initPretension

Internal method to be called by Calculate_Structure

P = axial pre-tension specified for each bar

Calculate the force vector [La] for each bar [La] = [T'][AA'][P] Combine into an overal vector representing the internal force system.

buildStructureStiffnessMatrix

Internal method to be called by Calculate_Structure

Standard construction of Primary and Structure stiffness matrix Construction of non-linear element stiffness matrix handled in a child function.

solveDisplacements

Internal method to be called by Calculate_Structure

Standard solving for structural displacements.

updateInternalForceSystem

Internal method to be called by Calculate_Structure

Calculate the vector of internal forces associated with the incremental displacements UG $[L_n] = [T'][AA'][P]$.

testForConvergence

Internal method to be called by Calculate_Structure

Test if structure has converged by comparing the maximum force in the equilibrium force vector against a threshold for the simulation.

calculateMbrForces

Internal method to be called by Calculate_Structure

Calculates the member forces based on change in length of each member. Takes in the cumulative global displacement vector as UG.

displacement_postprocess

Internal method to be called by Calculate_Structure

Performs postprocessing calculations of angle variation in bars concurring in each node whose initial angle is 180 degrees. In this case it is assumed that the bars belong to the same cable and the calculation of the angle after the deformation.

calculate_structure

Main method of FTES_Structure. Performs structural analysis

This method launches the analysis of the structure executing the iterative method of solving the equation $f = Kd$ increasing the load in steps according to the configured parameters and iterating to increase the rigidity of the structure with the addition of loads to achieve equilibrium.

Results are stored in the data structures of the class, ready to be exported with the provided functions.

Anexo B

Método de análisis. Descripción

El método de análisis construido en Python es una implementación numérica del método de análisis expuesto por Peter Broughton y Paul Ndumbaro en The Analysis of cable and catenary structures [6]. Esta obra contiene la descripción detallada del método de cálculo que constituye el motor sobre el que se construye la herramienta de cálculo.

Este método permite la resolución del sistema de ecuaciones fundamental que relaciona las fuerzas exteriores aplicadas sobre la estructura con los desplazamientos correspondientes, a partir de la cual es posible después extraer toda la información útil postprocesada para obtener datos de la estructura sometida a acciones exteriores.

El método se describe en detalle en la publicación indicada, y se trata de un método matricial en el que en primer lugar se obtiene una matriz de rigidez de cada miembro de la estructura (cable o barra), para luego ensamblarlos en una matriz general $[K]$ de rigidez del sistema.

Esta matriz permite relacionar las fuerzas $[L]$ y los desplazamientos $[X]$ a través de una relación del tipo:

$$[L] = [K][X] \quad (\text{B.1})$$

En el caso de este método se ha derivado una matriz de rigidez no lineal que varía a medida que se aplican cargas sobre la estructura, ya que la rigidez de los cables se incrementa a medida que se tensan y se deforman por acción de las cargas exteriores. Así, considerando una matriz de rigidez inicial $[K_o]$ se establece una primera ecuación:

$$[L] - [L_o] = [K_o][\delta X] \quad (\text{B.2})$$

En esta ecuación matricial $[L]$ es el vector de cargas exteriores aplicado sobre la estructura y $[L_o]$ es el vector de fuerzas internas de la estructura, para el cual existe una expresión derivada en el método utilizado. $[K_o]$ por su parte es la matriz de rigidez inicial, y $[\delta X]$ es el vector de desplazamientos inicial.

En una estructura lineal el término $[L] - [L_o]$ sería nulo ya que las fuerzas exteriores y las fuerzas internas de la estructura se equilibrarían para un cierto

desplazamiento de la estructura según la relación inicial. Sin embargo, en este caso no coinciden dad ala naturaleza cambiante de la matriz de rigidez. Así, esta expresión da lugar a un desequilibrio que exige recalcular de manera iterativa una nueva matriz de rigidez para los desplazamientos $[\delta X]$ hallados en el primer paso.

Con cada iteración se calcula una nueva matriz de rigidez y un nuevo desplazamiento, y el desequilibrio $[L] - [L_o]$ se va reduciendo hasta el valor determinado como umbral aceptable de desequilibrio.

El vector de cargas exteriores, $[L]$, por su parte, es también dividido en una serie de pequeños pasos que se van aplicando progresivamente sobre la estructura, ya que el cambio de rigidez sería muy grande si se aplicase la carga completa en un solo paso y haría imposible que el método iterativo convergiese en una solución.

En la publicación de Broughton y Ndumbaro [6] se proporcionan, además de las expresiones analíticas de las ecuaciones que permiten su implementación numérica como se ha hecho en la herramienta FTES, diagramas de flujo del cálculo que facilitan la escritura del mismo en un código como el desarrollado para este trabajo.

Anexo C

Ejemplo de ejecución de un análisis

Este anexo recoge el código utilizado para un análisis estructural con uno de los casos de fachada presentados en el trabajo, el CASO 01. El código a continuación sirve como definición completa de un análisis para obtener resultados de cálculo a través de un archivo XLSX que contiene todos los datos, y un archivo DXF de Cad con los datos gráficos de estructura inicial y estructura deformada.

En el código a continuación puede verse en primer lugar la definición de una función llamada WL que ayuda a calcular la carga de viento correspondiente a cada altura sobre rasante. Esta función se utiliza para aplicar la carga de viento en cada fila de nudos de la estructura según su altura sobre el suelo.

A continuación se describen los cuatro análisis que se llevan a cabo en cada caso, que tienen una estructura similar. Los análisis son ELU, estado límite último, ELS, estado límite de servicio, 1Y, estructura sometida a carga de viento con frecuencia anual, y 2Y, estructura sometida a carga de viento con período de retorno bianual.

Dentro de cada análisis se llevan a cabo los pasos siguientes: En primer lugar se crea un objeto estructura. Seguidamente se importa geometría de un archivo CAD, para a continuación aplicar las propiedades mecánicas a los cables y definir las cargas de peso de vidrio y viento que son de aplicación en cada caso. A continuación se da orden de ejecutar el cálculo estructural, y una vez obtenido se exportan los datos en formato XLSX y DXF.

C.1. Código para ejecución de análisis

```
"""
FTES - Casos de analisis TFM. FTES.
CASO 01
@author: gumer freire
"""
```

```
import FTES
import numpy as np

def WL(z, years=50):
```

```

"""
Function to get the wind load for urban area zone IV depending on the height (h)
of a given point. Returns wind load per m2.
Pressure coefficient cp given for facade zone D.
Input parameters:
    z - height above ground of the point subjected to wind load
    years - return period for probability of wind value. Default = 50 years
This calculation is introduced as Cprob coefficient following Eurocode EN 1991-1-4
"""

#Probability coefficient for period of time considered. According to EN 1991-1-4
K = 0.2 #Recommended value National Annex EN 1991-1-4
n = 0.5 #Recommended value National Annex EN 1991-1-4
p = 1/years
if p > 0.99: p = 0.99
Cprob = ((1 - K * (-np.log(1 - p))) / (1 - K * (-np.log(0.98))))**n

vb = 29 #basic speed of wind, according to CTE 29 m/s for zone C
d_density = 1.25 #kg/m3
qb = 0.5 * d_density * ((vb*Cprob)**2)

#CTE parameters, Table D.2 for urban zone IV
k = 0.22
L = 0.3
Z = 5.0
if z > Z: maxz = z
else: maxz = Z
F = k * np.log(maxz/L)
ce = F * (F+7*k) #exposure coefficient
cp = 0.8

return qb*ce*cp # wind load in N/m2

#/% ELU - Ultimate limit state

load_area = 2.3669
glassload = 55 * 9.81 #glass load N/m2 (for 55 kg/m2)
G_coef = 1.35 # coeficiente de acciones permanentes
Q_coef = 1.5 # coeficiente de acciones variables

C01_ELU = FTES.FTES_Structure()
C01_ELU.import_DxfStructure('CAS0_01/CAS0_01.dxf')

#Set mechanical properties
C01_ELU.set_E(160e9, Memberfilter='Allmembers') #galvanized steel cable
C01_ELU.set_A(634/1e6, Memberfilter='Allmembers') #set area for cable 31mm
C01_ELU.set_sw(5.3*9.81, Memberfilter='Allmembers') #set self weight for cable 31 mm
C01_ELU.set_Cable(Memberfilter='Allmembers')
C01_ELU.set_P(75000, Memberfilter='Allmembers') #set the same pretension for all cables

# Set restraints

```

```

C01_ELU.addRestraint(['x','y','z'], Nodefilter='RestraintsXYZ')
#Set glazing load
C01_ELU.addForce(-load_area * glassload * G_coef, ['z'], Nodefilter='Glassload')

#Set wind load
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_01')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_02')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 3) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_03')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 4) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_04')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 5) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_05')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 6) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_06')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 7) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_07')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 8) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_08')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 9) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_09')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 10) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_10')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 11) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_11')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 12) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_12')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 13) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_13')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 14) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_14')
C01_ELU.addForce(load_area * WL(1.5625 * 15) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_15')

#Structure analysis
C01_ELU.set_solverParameters(2000, 50, 5000)
C01_ELU.calculate_structure()

#Plot and export data
C01_ELU.plotStructure()
C01_ELU.export_Data('CASO_01/CASO_01_ELU.xlsx')
C01_ELU.export_DxfStructure('CASO_01/CASO_01_ELU.dxf')

#%% ELS - Serviceability limit state

load_area = 2.3669
glassload = 55 * 9.81 #glass load N/m2 (for 55 kg/m2)
G_coef = 1.0 # coeficiente de acciones permanentes ELS
Q_coef = 1.0 # coeficiente de acciones variables ELS

C01_ELS = FTES.FTES_Structure()
C01_ELS.import_DxfStructure('CASO_01/CASO_01.dxf')

#Set mechanical properties
C01_ELS.set_E(160e9, Memberfilter='Allmembers') #galvanized steel cable
C01_ELS.set_A(634/1e6, Memberfilter='Allmembers') #set area for cable 31mm
C01_ELS.set_sw(5.3*9.81, Memberfilter='Allmembers') #set self weight for cable 31 mm
C01_ELS.set_Cable(Memberfilter='Allmembers')
C01_ELS.set_P(75000, Memberfilter='Allmembers') #set the same pretension for all cables

# Set restraints
C01_ELS.addRestraint(['x','y','z'], Nodefilter='RestraintsXYZ')
#Set glazing load
C01_ELS.addForce(-load_area * glassload * G_coef, ['z'], Nodefilter='Glassload')

#Set wind load
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_01')

```

```

C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_02')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 3) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_03')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 4) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_04')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 5) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_05')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 6) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_06')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 7) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_07')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 8) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_08')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 9) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_09')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 10) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_10')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 11) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_11')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 12) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_12')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 13) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_13')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 14) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_14')
C01_ELS.addForce(load_area * WL(1.5625 * 15) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_15')

#Structure analysis
C01_ELS.set_solverParameters(2000, 50, 5000)
C01_ELS.calculate_structure()

#Plot and export data
C01_ELS.plotStructure()
C01_ELS.export_Data('CASO_01/CASO_01_ELS.xlsx')
C01_ELS.export_DxfStructure('CASO_01/CASO_01_ELS.dxf')

#%% ELS - Serviceability limit state WIND 1 YEAR

load_area = 2.3669
glassload = 55 * 9.81 #glass load N/m2 (for 55 kg/m2)
G_coef = 1.0 # coeficiente de acciones permanentes ELS
Q_coef = 1.0 # coeficiente de acciones variables ELS

C01_1Y = FTES.FTES_Structure()
C01_1Y.import_DxfStructure('CASO_01/CASO_01.dxf')

#Set mechanical properties
C01_1Y.set_E(160e9, Memberfilter='Allmembers') #galvanized steel cable
C01_1Y.set_A(634/1e6, Memberfilter='Allmembers') #set area for cable 31mm
C01_1Y.set_sw(5.3*9.81, Memberfilter='Allmembers') #set self weight for cable 31 mm
C01_1Y.set_Cable(Memberfilter='Allmembers')
C01_1Y.set_P(75000, Memberfilter='Allmembers') #set the same pretension for all cables

# Set restraints
C01_1Y.addRestraint(['x','y','z'], Nodefilter='RestraintsXYZ')
#Set glazing load
C01_1Y.addForce(-load_area * glassload * G_coef, ['z'], Nodefilter='Glassload')

#Set wind load
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 1, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_01')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 2, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_02')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 3, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_03')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 4, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_04')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 5, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_05')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 6, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_06')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 7, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_07')

```

```

C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 8, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_08')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 9, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_09')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 10, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_10')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 11, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_11')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 12, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_12')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 13, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_13')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 14, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_14')
C01_1Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 15, years=1) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_15')

#Structure analysis
C01_1Y.set_solverParameters(2000, 50, 5000)
C01_1Y.calculate_structure()

#Plot and export data
# C01_1Y.plotStructure(savePdf='CASO_01/CASO_01.pdf')
C01_1Y.export_Data('CASO_01/CASO_01_ELS_1YEAR.xlsx')
C01_1Y.export_DxfStructure('CASO_01/CASO_01_ELS_1YEAR.dxf')

#%% ELS - Serviceability limit state WIND 2 YEARS

load_area = 2.3669
glassload = 55 * 9.81 #glass load N/m2 (for 55 kg/m2)
G_coef = 1.0 # coeficiente de acciones permanentes ELS
Q_coef = 1.0 # coeficiente de acciones variables ELS

C01_2Y = FTES.FTES_Structure()
C01_2Y.import_DxfStructure('CASO_01/CASO_01.dxf')

#Set mechanical properties
C01_2Y.set_E(160e9, Memberfilter='Allmembers') #galvanized steel cable
C01_2Y.set_A(634/1e6, Memberfilter='Allmembers') #set area for cable 31mm
C01_2Y.set_sw(5.3*9.81, Memberfilter='Allmembers') #set self weight for cable 31 mm
C01_2Y.set_Cable(Memberfilter='Allmembers')
C01_2Y.set_P(75000, Memberfilter='Allmembers') #set the same pretension for all cables

# Set restraints
C01_2Y.addRestraint(['x','y','z'], Nodefilter='RestraintsXYZ')
#Set glazing load
C01_2Y.addForce(-load_area * glassload * G_coef, ['z'], Nodefilter='Glassload')

#Set wind load
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 1, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_01')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 2, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_02')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 3, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_03')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 4, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_04')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 5, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_05')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 6, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_06')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 7, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_07')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 8, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_08')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 9, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_09')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 10, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_10')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 11, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_11')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 12, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_12')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 13, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_13')

```

```

C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 14, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_14')
C01_2Y.addForce(load_area * WL(1.5625 * 15, years=2) * Q_coef, ['y'], Nodefilter='WL_15')

#Structure analysis
C01_2Y.set_solverParameters(2000, 50, 5000)
C01_2Y.calculate_structure()

#Plot and export data
C01_2Y.plotStructure(savePdf='CASO_01/CASO_01.pdf')
C01_2Y.export_Data('CASO_01/CASO_01_ELS_2YEAR.xlsx')
C01_2Y.export_DxfStructure('CASO_01/CASO_01_ELS_2YEAR.dxf')

```

C.2. Resultados de un análisis de cálculo

Los resultados de los análisis estructurales se obtienen a través de archivos CAD que representan las estructuras deformadas y de archivos XLSX en formato tabla de Excel que contienen todos los datos relativos a nodos y barras de la estructura. Debido al carácter de estos datos no es operativo mostrar de una manera visual completa los resultados de un cálculo, de modo que se emplaza al lector a consultarlos a través de la dirección donde se aloja el código fuente de la aplicación que contiene también los casos de cálculo:

https://github.com/gumerfreire/FTES_Cablestructures

Bibliografía

- [1] A. Abdul Sater and O. Thor. *A Computational Tool for the Design of Prestressed Cable Supported Structures*. Chalmers University of Technology, Sweden, 2020.
- [2] AENOR. *EN 1991-1-4. Eurocódigo 1. Acciones generales - acciones de viento*. AENOR, 2018.
- [3] C. Amadio and C. Bedon. *Dynamic Response of Cable-Supported Façades Subjected to High-Level Air Blast Loads. Numerical Simulations and Mitigation Techniques*. Modelling and Simulation in Engineering, 2012.
- [4] F. Arbos Bellapart and A. Vidal Majoral. *La fijación puntual de vidrios en la Arquitectura*. Bellapart Group, 2004.
- [5] B. Beer. *Options for Complex Geometry Façades - Single Corner vs. Free Form Cold-Bending*. GPD Glass Performance Days, 2019.
- [6] P. Broughton and P. Ndumbaro. *The analysis of cable and catenary structures*. Thomas Telford, 1994.
- [7] Z. H. Chen, Y. J. Wu, Y. Yin, and C. Shan. *Formulation and application of multi-node sliding cable element for the analysis of Suspended-Dome structures*. Finite elements in analysis and design 46, 2010.
- [8] DIIfB. *European Technical Assessment ETA-11 1160. Pfeifer Wire Ropes*. Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [9] R.-q. Feng, Y. Wu, and S.-z. Shen. *Working Mechanism of Single-layer Cable Net Supported Glass Curtain Walls*. Advances in Structural Engineering Vol. 10 No. 2, 2007.
- [10] I. Fernández Solla. <http://facadesconfidential.blogspot.com/2011/10/louvre-pyramids-revisited.html>. Facades Confidential, 2011.
- [11] M. L. Gambhirt and V. Barrington. *A finite 3D element for 3D prestressed cablenets*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977.
- [12] JSWD-Architekten. <https://www.jswd-architekten.de/projekte/thyssenkrupp-quartier/>. JSWD Architekten, 2014.
- [13] M. Khalkhalia, P. Zarfam, and R. Zarfam. *Vibration Control of Cable Net Façade by Smart Supports*. Structural Engineering International, 2021.

- [14] A. Mazeika and K. Kelly-Sneed. *Cable-net walls. Where do I even start.* Draft, later published in NASCC - The steel conference, 2007.
- [15] Y. Mustafasanie. *Cable-net supported glass facade systems.* University of Surrey, 2015.
- [16] Octatube. https://www.octatube.nl/en_GB/project-item.html/projectitem/6-markthal. Octatube, 2014.
- [17] M. Patterson. *Structural Glass Facades and Enclosures.* John Wiley and sons, Inc., 2011.
- [18] Pfeiffer. *Assembly instructions for pre-assembled tension members.* PFEI-FER Seil und Hebetechnik, GmbH, 2012.
- [19] I. Ritchie. <https://www.ritchie.studio/>. Ritchie Studio, 2023.
- [20] F. Rizzo and C. Bedon. *Performance of cable-supported glass façades under time-depending wind action.* Glass structures and engineering, 2022.
- [21] D. R. Salinas Guayacundo and E. A. Marmolejo Otero. *Nonlinear analysis of cable net structures.* Investigación e innovación en ingenierías, vol. 9, n. 2, 2021.
- [22] H. J. Scheck. *The force density method for form finding and computation of general networks.* Computer methods in applied mechanics and engineering, num. 3, 1974.
- [23] J. Schlaich. *Prestressed Cable-Net Facades.* Structural engineering International, 1-2005, 2005.
- [24] H. Schober. *Gespannte Seilnetzfassaden.* Stahlbau 73. Ernst and Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2004.
- [25] W. Sobek, S. Feirabend, L. Blandini, and F. Tarazi. *Cable-stayed glass façades - 15 years of innovation at the cutting edge.* TU Delft. Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, 2010.