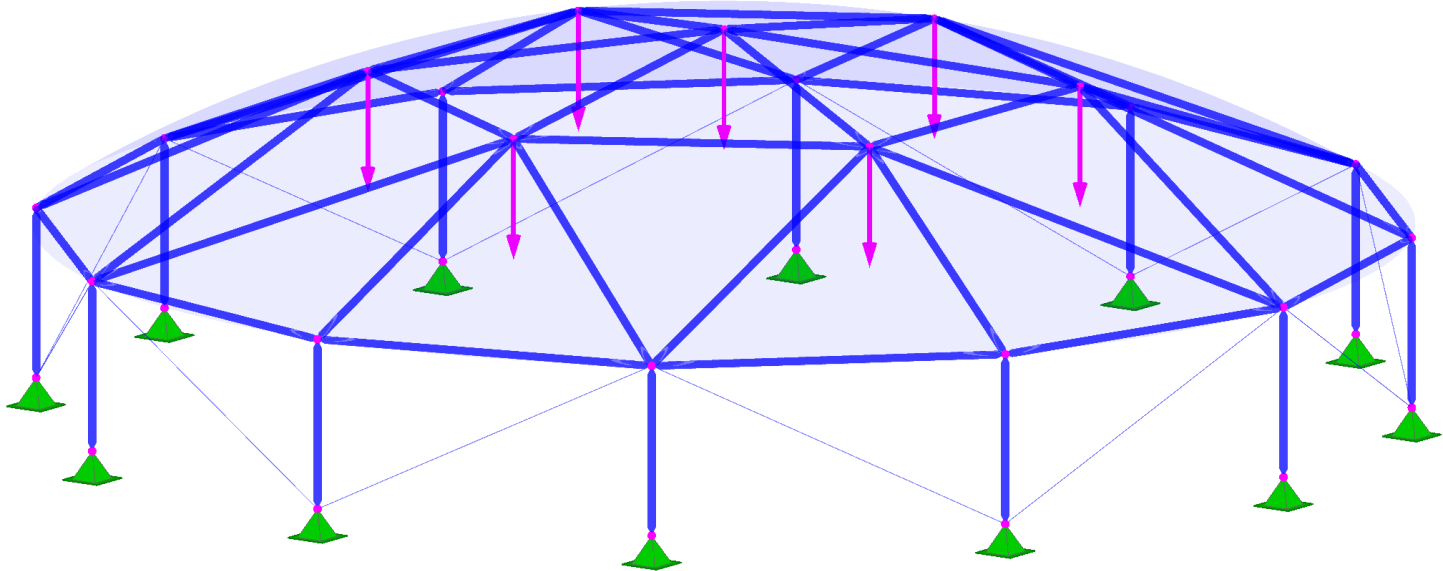
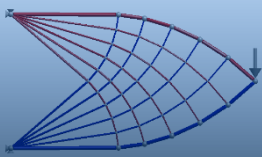


INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ÓPTIMO DE ESTRUCTURAS



Dr. Pascual Martí Montrull



Índice de contenidos



1. Introducción

- 1.1 La optimización de estructuras
- 1.2 El proceso clásico de diseño de estructuras
- 1.3 El proceso de diseño de estructuras con optimización

2. Fundamentos de la optimización

- 2.1 Formulación matemática del problema de optimización
- 2.2 Resolución del problema de optimización

3. Diseño estructural con optimización

- 3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras
- 3.2 Optimización de geometría / forma
- 3.4 Optimización de topología

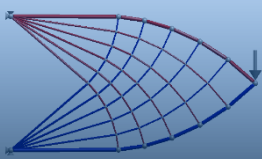
4. Aplicaciones. Casos de estudio

- 4.1 Diseño óptimo de secciones y de geometría. Cúpula triangulada
- 4.2 Diseño óptimo de forma. HYPAR de entrada a L'Oceanogràfic de Valencia
- 4.3 Diseño óptimo de topología. Cúpula del Panteón de Roma

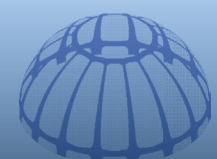
5. Herramientas tecnológicas de optimización

- 5.1 Académicas (GOE UPCT) y OpenSource
- 5.2 Software especializado

6. Líneas de investigación actuales



1.1 La optimización de estructuras



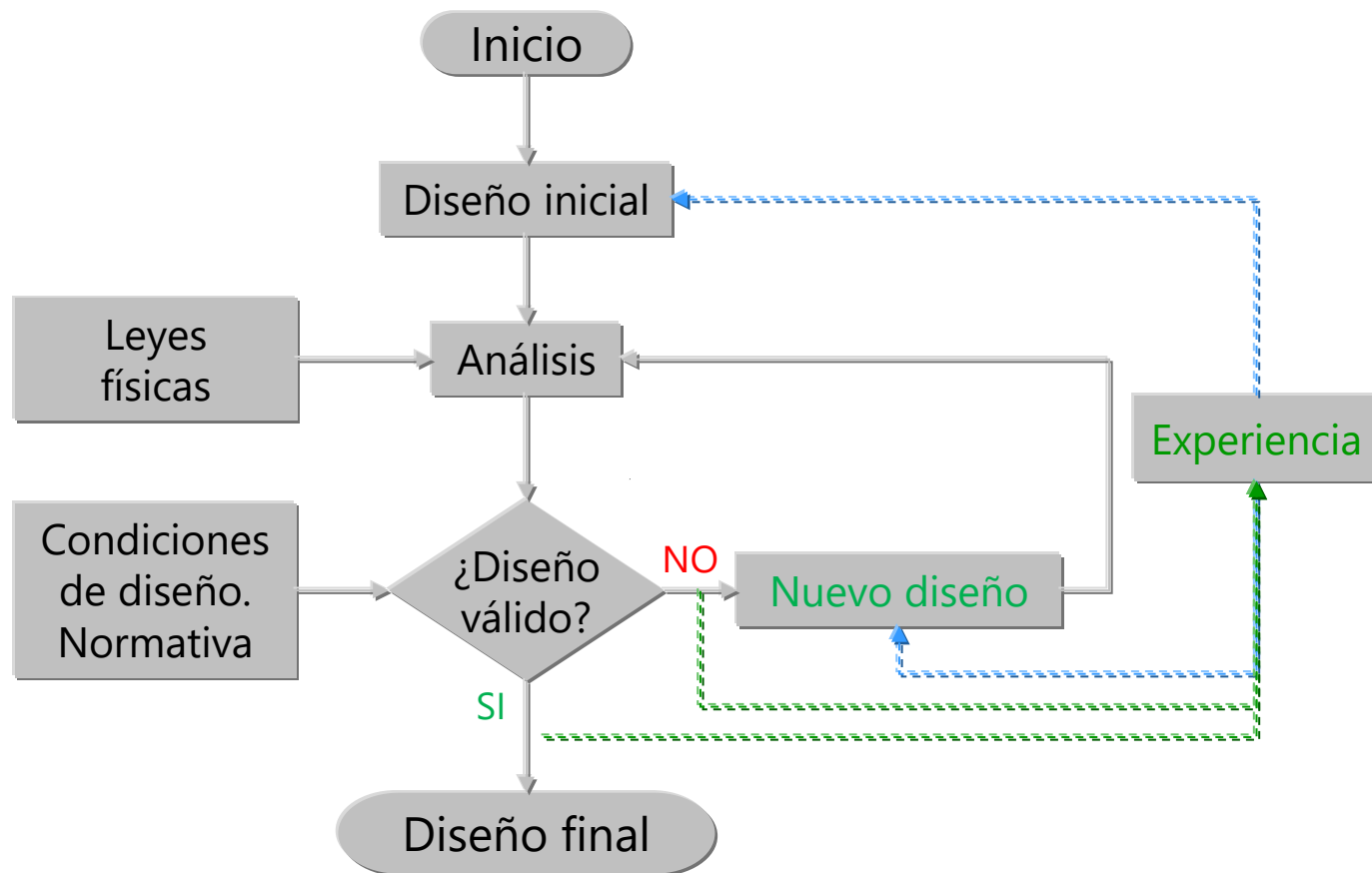
■ Objetivo

- Mejorar el proceso de diseño de estructuras, utilizando técnicas avanzadas de optimización.

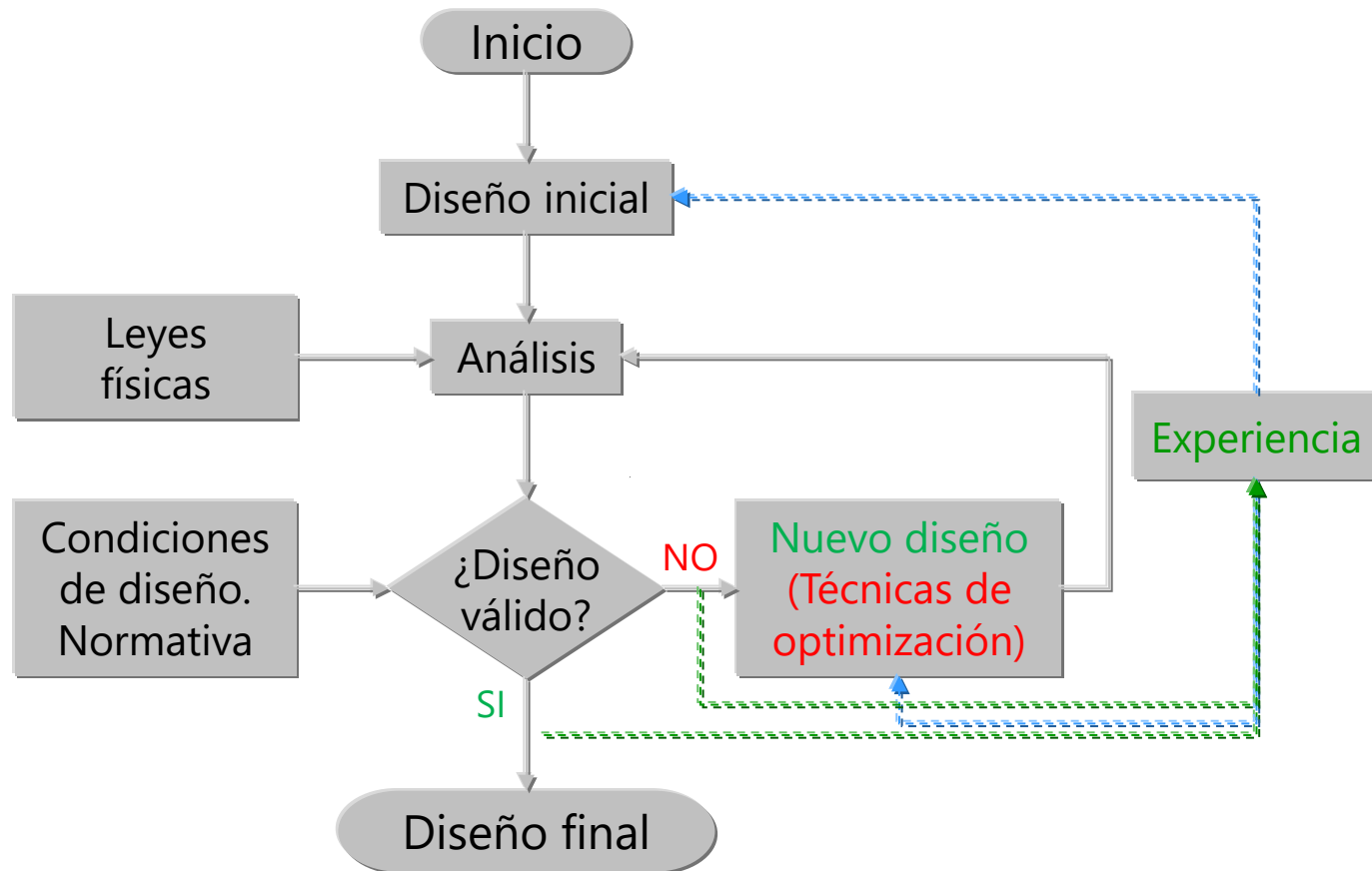
■ Ventajas

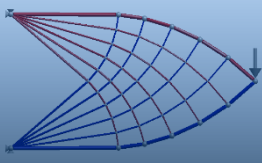
- **Mejora de la calidad y seguridad:** La aplicación de técnicas de optimización permite obtener diseños estructurales más eficientes, seguros y confiables.
- **Reducción de costes:** La automatización y optimización del diseño contribuyen a minimizar el uso de materiales y recursos, lo que se traduce en una disminución significativa de los costes de construcción.
- **Cumplimiento de especificaciones complejas:** Facilita la incorporación de múltiples requisitos normativos y funcionales, cada vez más exigentes y difíciles de abordar manualmente.
- **Fomento de la innovación:** Al automatizar las tareas más repetitivas y rutinarias, se libera tiempo para que los diseñadores se concentren en las fases más creativas del proceso, promoviendo así soluciones innovadoras y personalizadas.

1.2 El proceso clásico de diseño de estructuras

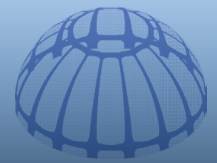


1.3 El proceso de diseño de estructuras con optimización





2.1 Formulación matemática del problema de optimización



- Encontrar un vector de **variables de diseño $\mathbf{x}$** ,
- que minimice una **función objetivo $f(\mathbf{x})$** ,
- y que se cumplan las **restricciones** de:

Desigualdad $g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_d$

Igualdad $h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_i$

Límites de las variables $x_i^l \leq x_i \leq x_i^s \quad i = 1, 2, \dots, n$

Relaciones entre variables $\sum_{j=1}^n T_{ij} x_j = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r$

2.2 Resolución del problema de optimización

MÉTODOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS

Máximos y mínimos clásicos

- Cálculo variacional
- Multiplicadores de Lagrange

CRITERIOS DE OPTIMALIDAD

Condiciones en el óptimo

- *Fully Stressed Design (FSD)*
- *Stress-Ratio*

PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

- Programación cuadrática sucesiva (SQP).

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k$$

EVOLUTIVOS

Basado en la evolución biológica:
selección, cruce y mutación.

- Genéticos

INSPIRADOS EN LA NATURALEZA

Basados en el comportamiento
colectivo de especies de animales

- Enjambre de partículas
- Colonia de hormigas, etc.

3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras

SEGÚN EL TIPO DE VARIABLES

PROPIEDADES DE LAS SECCIONES

GEOMETRIA

FORMA

TOPOLOGIA

CONDICIONES DE CONTORNO

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

SEGÚN EL TIPO DE FUNCIÓN OBJETIVO

AREA, VOLUMEN, PESO,
COSTO, ETC.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ESTÁTICO (Desplazamientos,
Esfuerzos, etc.)

FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN

DINÁMICO (Tensiones,
Desplazamientos, Esfuerzos, etc.)

ESTABILIDAD GLOBAL

SEGÚN EL TIPO DE RESTRICCIONES

Resistencia de las secciones

Pandeo de los elementos

Esbeltez de los elementos

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ESTÁTICO (Desplazamientos,
Esfuerzos, etc.)

FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN

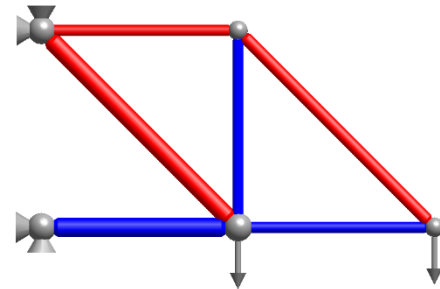
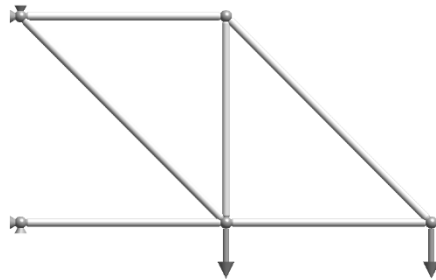
DINÁMICO (Tensiones,
Desplazamientos, Esfuerzos, etc.)

ESTABILIDAD GLOBAL

3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras.

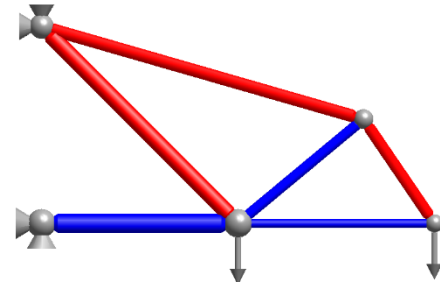
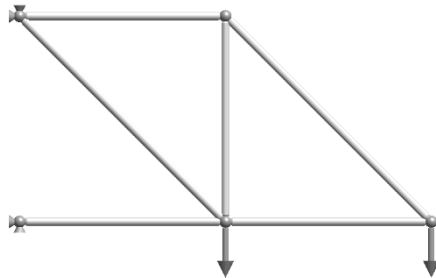
Discretas

1. Optimización de propiedades



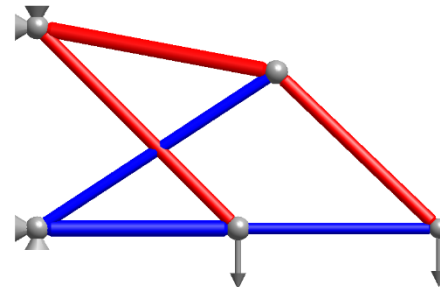
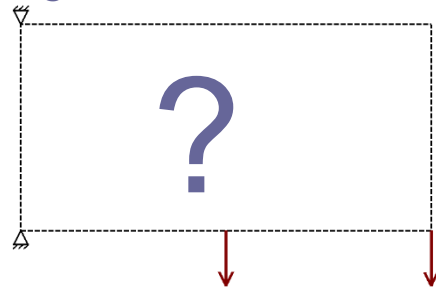
Masa = 100

2. Optimización de geometría



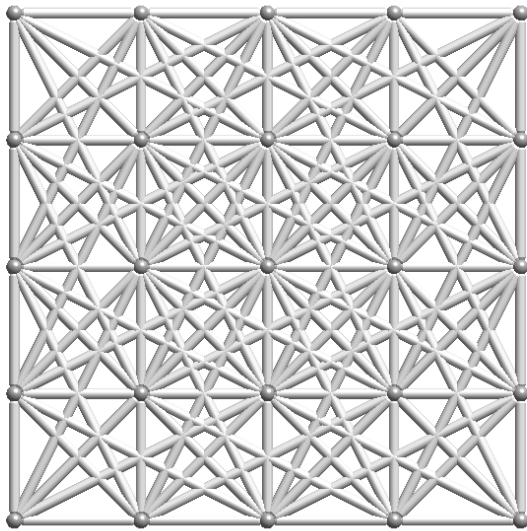
Masa = 90,98

3. Optimización de topología



Masa = 89,96

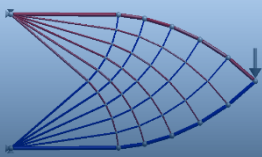
3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras. Optimización de topología. Métodos



Métodos del "universo estructural"



Métodos de crecimiento



Optimización de topología. Métodos de crecimiento



- Dimensiones

Geometría de apoyos y nudos cargados

- Material

Resistencia de cálculo

Módulo de elasticidad longitudinal

Peso específico

- Cargas

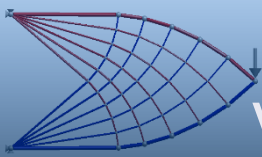
Cargas puntuales aplicadas

- Criterios de diseño

Tamaños máximos y mínimos de barras

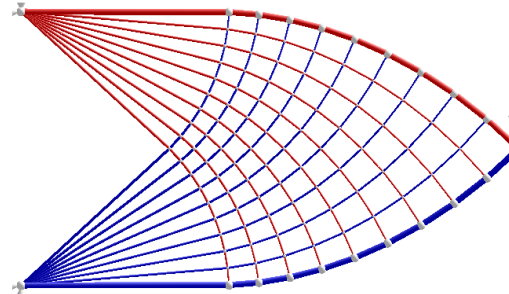
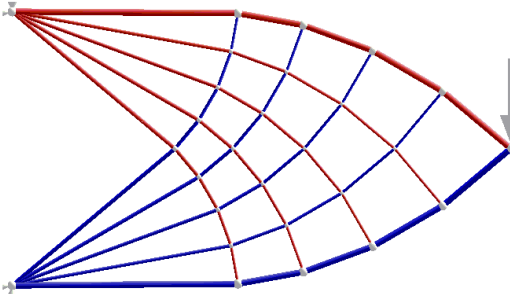
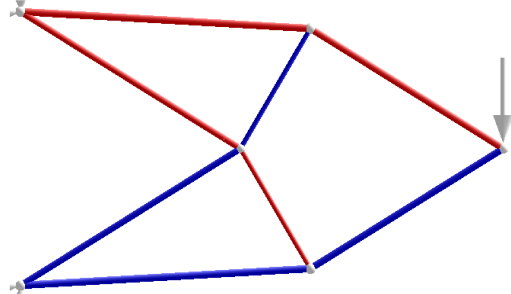
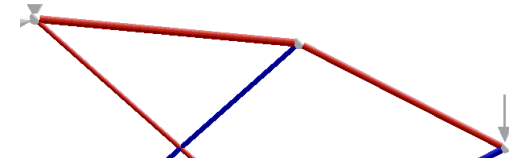


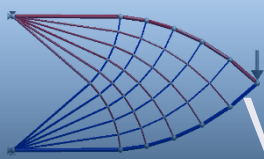
Optimización de topología. Voladizo con restricciones de tensión



?

Diseño inicial
(3 nudos, 0 barras)

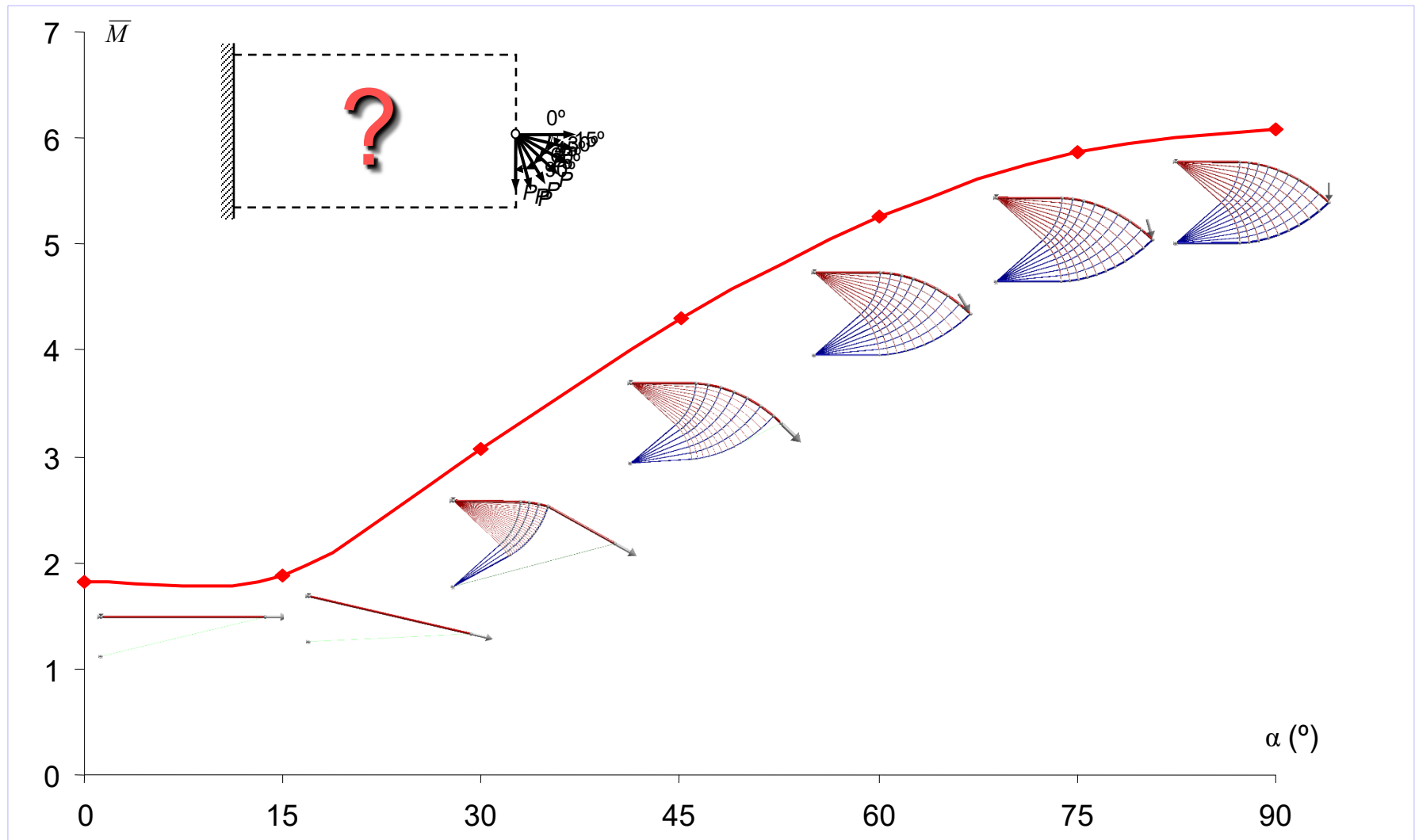




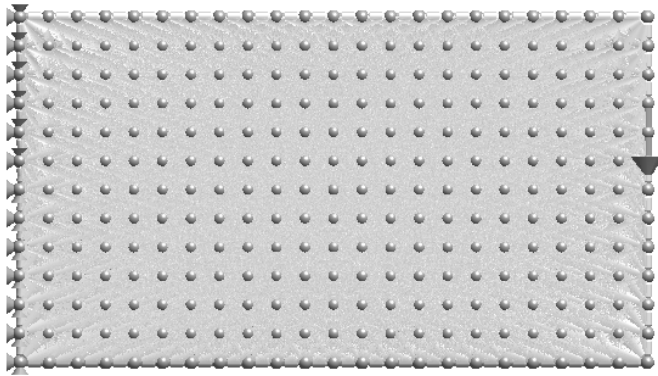
Optimización de topología. Voladizo con restricciones de pandeo



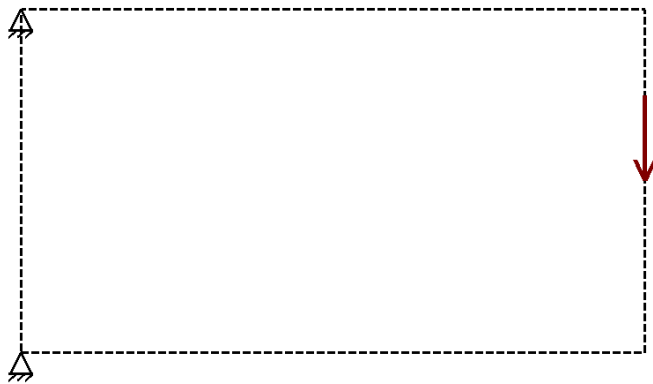
Voladizo con fuerza variable y restricciones de tensión



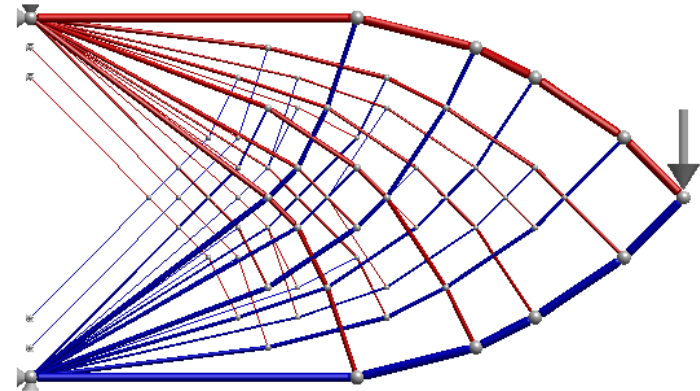
Voladizo con restricciones de tensión. Resolución con Universo estructural y con Crecimiento



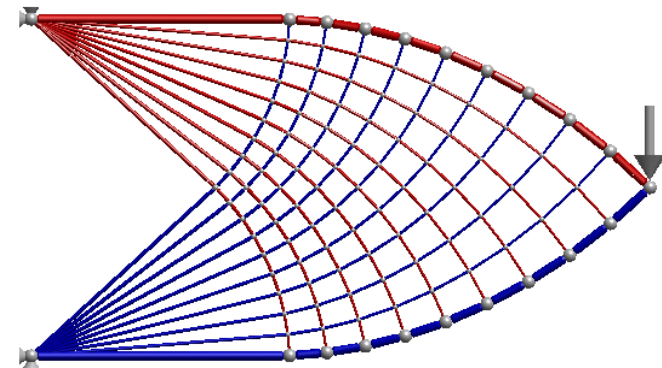
Universo estructural 22x12.
299 nudos, 27242 barras



Datos iniciales



Topología óptima. 105 nudos.
Masa = 6,10349. Error = 0,605 %



Diseño óptimo con 102 nudos.
Masa = 6,07771. Error = 0,063 %

3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras.

Formulación de la optimización de forma

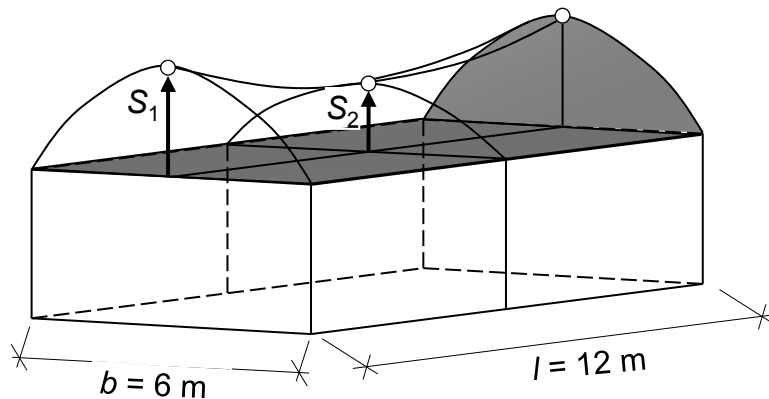
- Encontrar un vector de **variables de diseño $\mathbf{x}$** ,
- que minimice una **función objetivo $f(\mathbf{x})$** ,
- y que se cumplan las **restricciones**:

Desigualdad $g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_d$

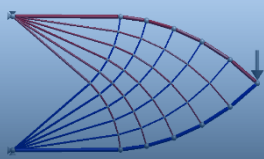
Igualdad $h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_i$

Límites de las variables $x_i^l \leq x_i \leq x_i^s \quad i = 1, 2, \dots, n$

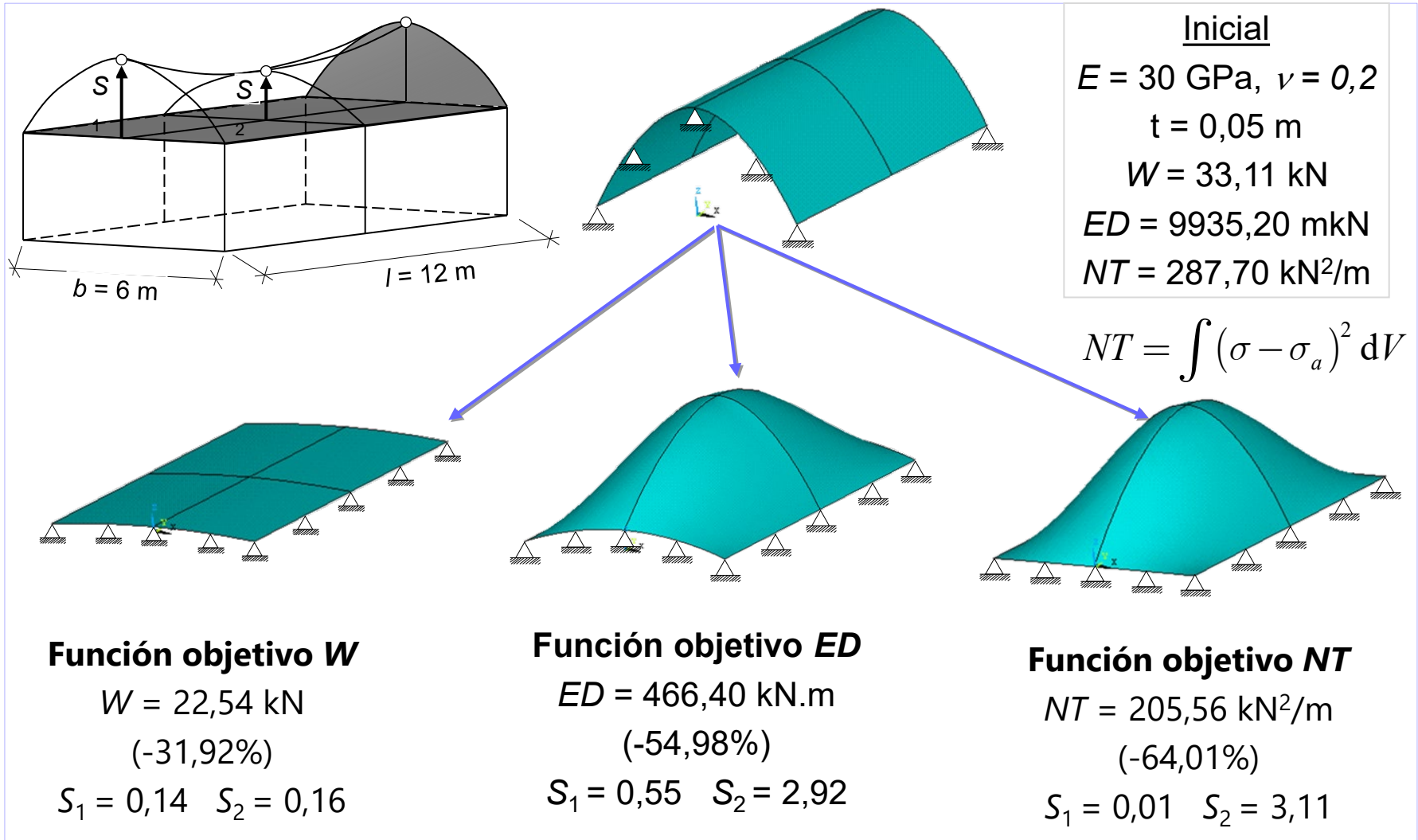
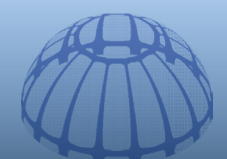
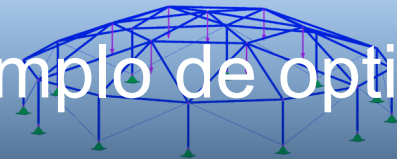
Relaciones entre variables $\sum_{j=1}^n T_{ij} x_j = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r$



Las variables de optimización están asociadas a los parámetros de control de las curvas y superficies que definen la forma de la estructura.



Ejemplo de optimización de forma



3.1 Tipos de problemas de optimización de estructuras. Formulación de la optimización de topología. SIMP

minimizar

$$C(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(\boldsymbol{\rho})$$

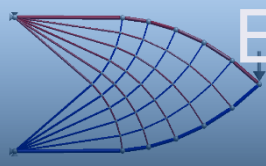
sujeito a:

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) \mathbf{u}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{f}$$

$$V(\boldsymbol{\rho}) \leq V_{\max}$$

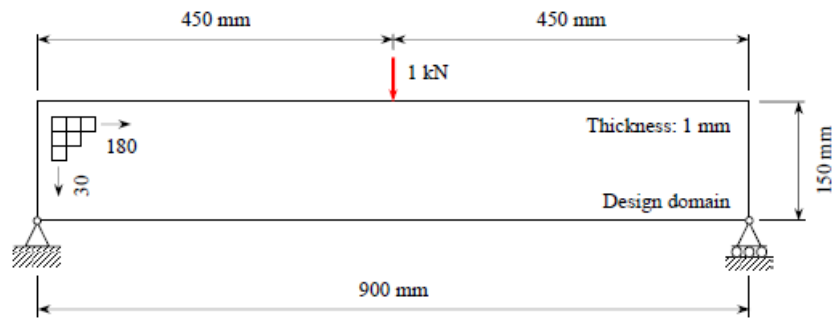
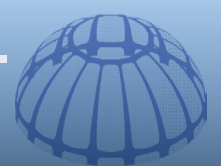
$$0 \leq \boldsymbol{\rho}(x) \leq 1$$

- $C(\cdot)$: *compliance* (medida de la deformación total de la estructura)
- $\mathbf{u}$: desplazamientos,
- $\mathbf{K}$: matriz de rigidez,
- $\mathbf{f}$: vector de cargas
- $\boldsymbol{\rho}$: vector de densidades de los elementos de la malla de elementos finitos



Ejemplo de optimización de topología.

Viga MBB



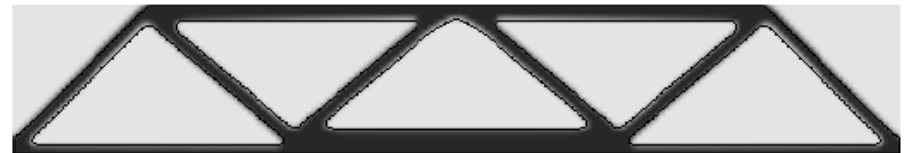
(a) $V/V_0 = 0.7$ (°/1); Compliance = $1.726 \cdot 10^2$ N·mm



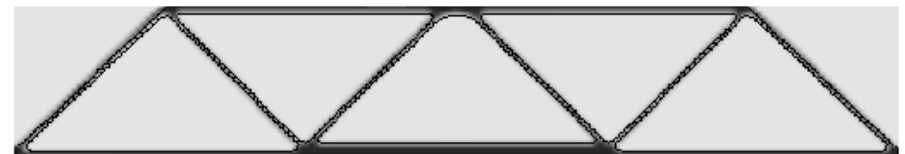
(b) $V/V_0 = 0.6$ (°/1); Compliance = $1.893 \cdot 10^2$ N·mm



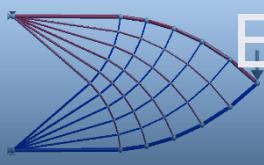
(c) $V/V_0 = 0.5$ (°/1); Compliance = $2.151 \cdot 10^2$ N·mm



(d) $V/V_0 = 0.3$ (°/1); Compliance = $3.363 \cdot 10^2$ N·mm

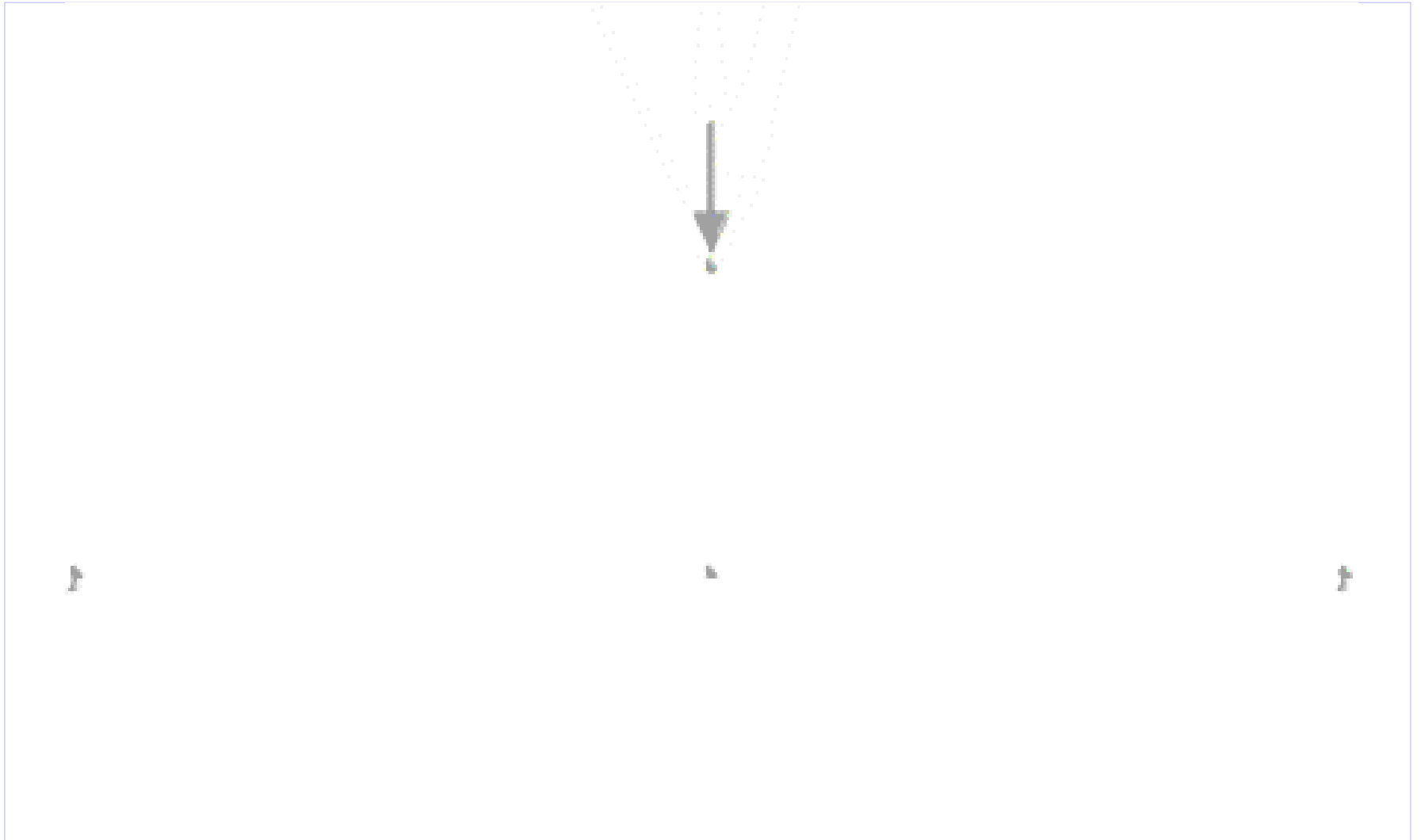
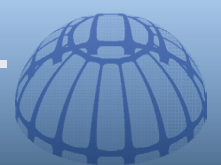
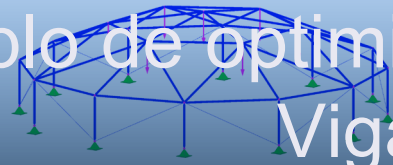


(e) $V/V_0 = 0.1$ (°/1); Compliance = $8.253 \cdot 10^2$ N·mm



Ejemplo de optimización de topología.

Viga MBB

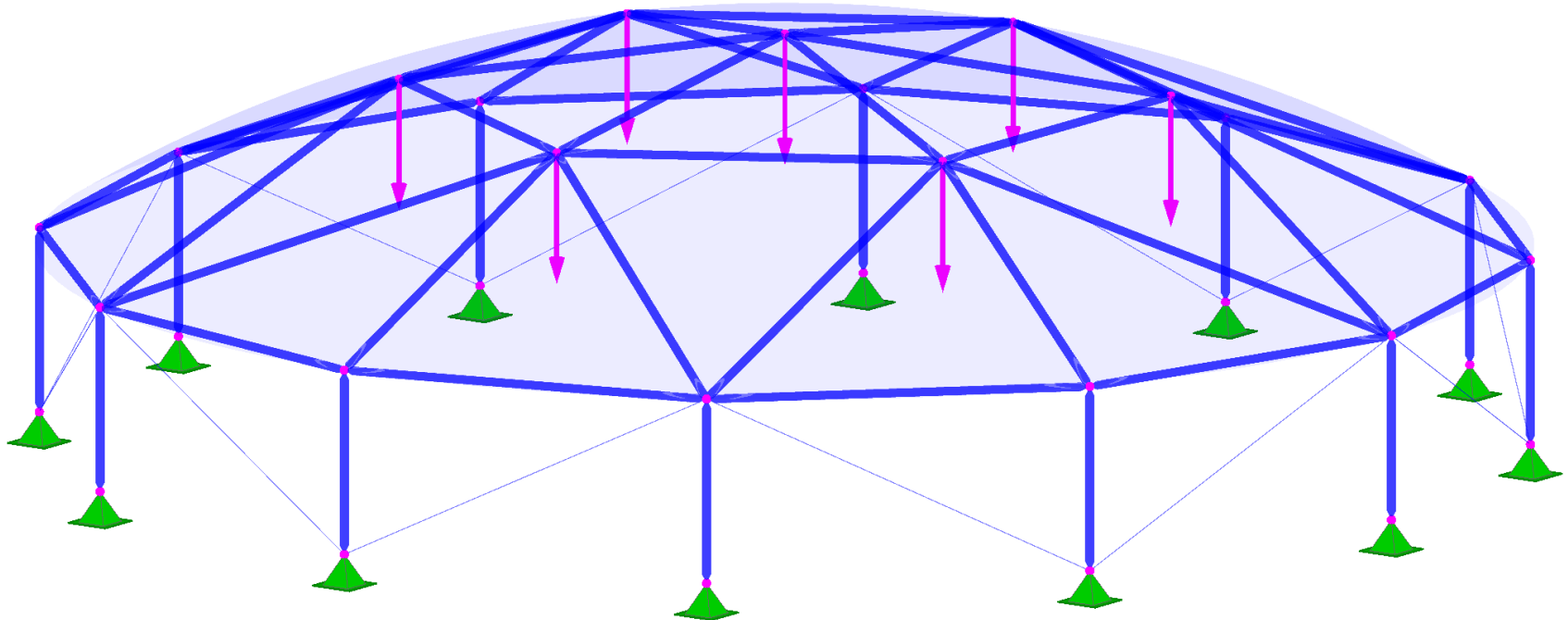


4.1 Diseño óptimo de secciones y de geometría

Cúpula triangulada

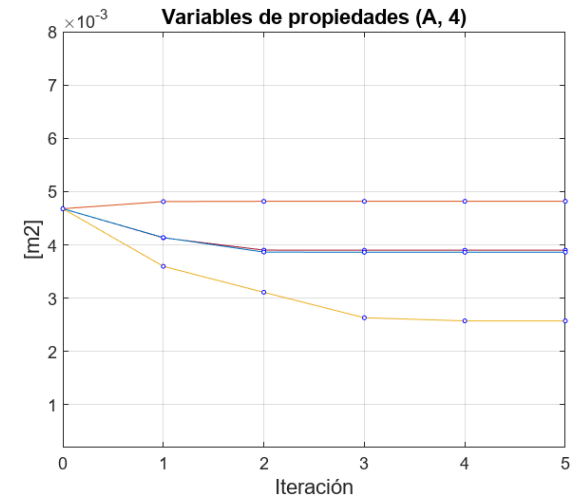
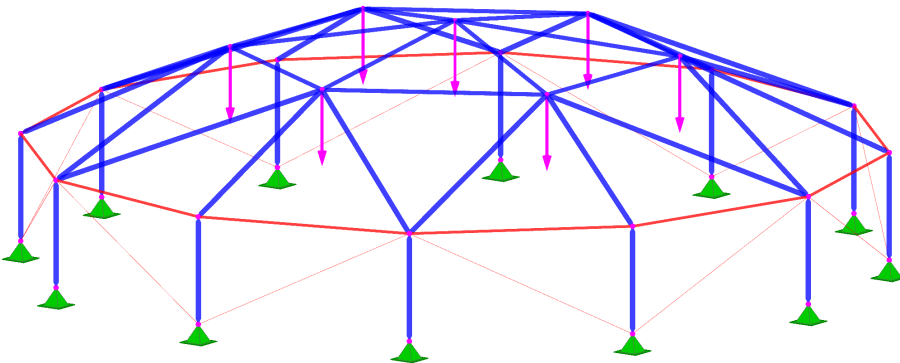
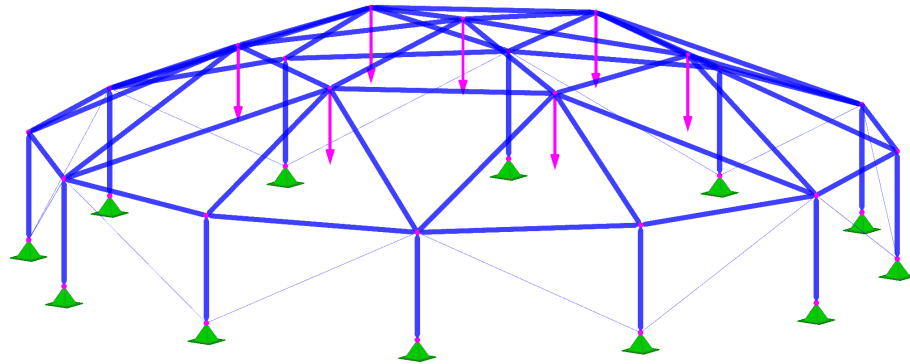
Diámetro: 25,5 m
Altura casquete esférico: 3.650 m
Altura pilares: 3.200 m

Carga superficial 2,0 kN/m²
Tubos circulares acero S275
Peso inicial: 12 590,5



Cúpula triangulada.

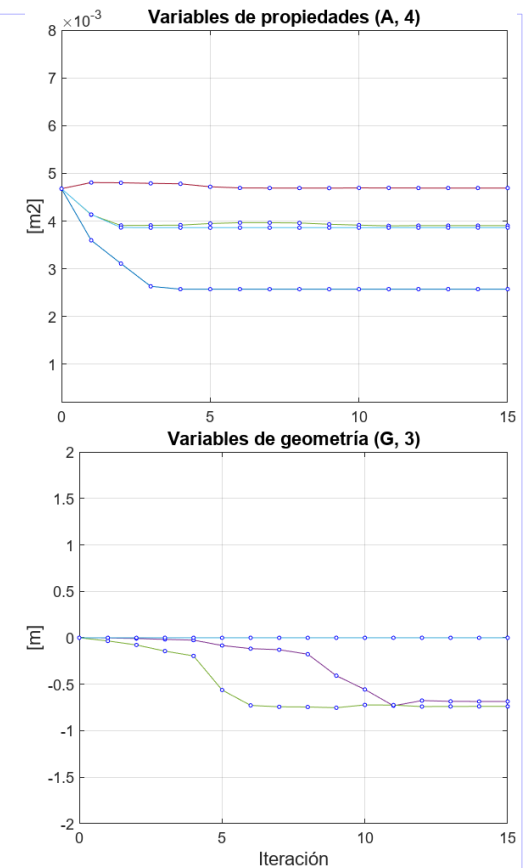
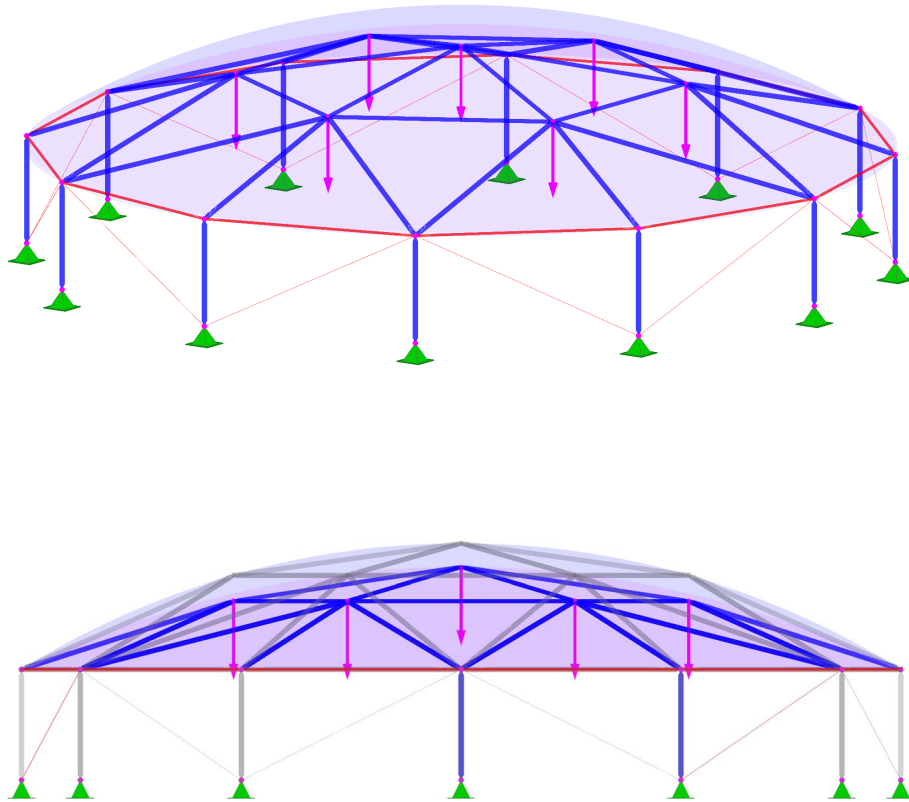
Optimización de secciones. Restricciones T, P, E, D



Peso inicial: 12 590,5 kg
Peso óptimo (P): 10 934,4

Cúpula triangulada.

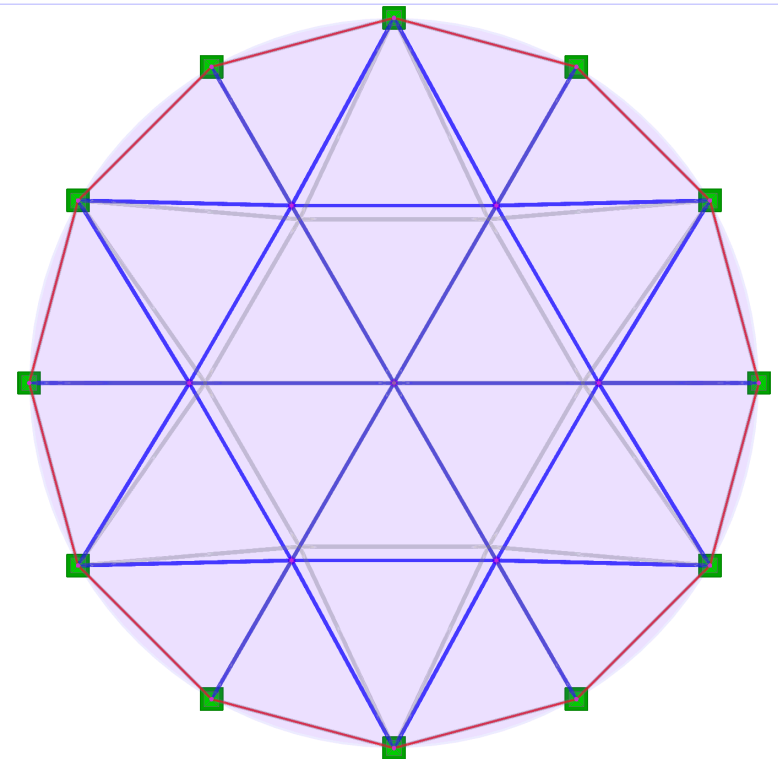
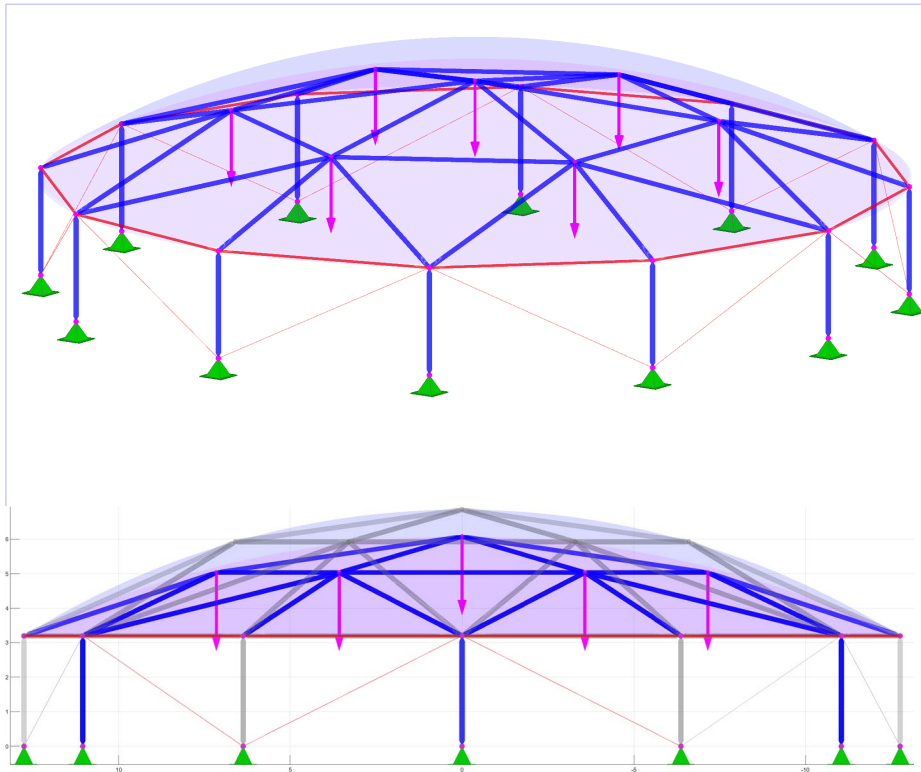
Optimización de geometría(ZL). Restricciones T, P, E, D



Peso inicial: 12 590,5 kg
Peso óptimo (P): 10 934,4
Peso óptimo (GZ): 10 648,0

Cúpula triangulada.

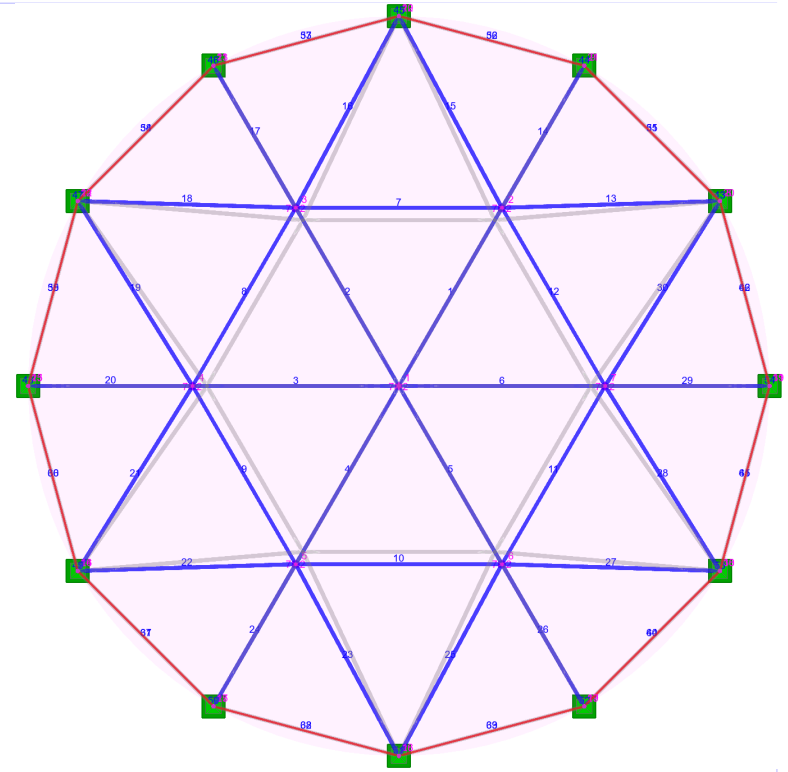
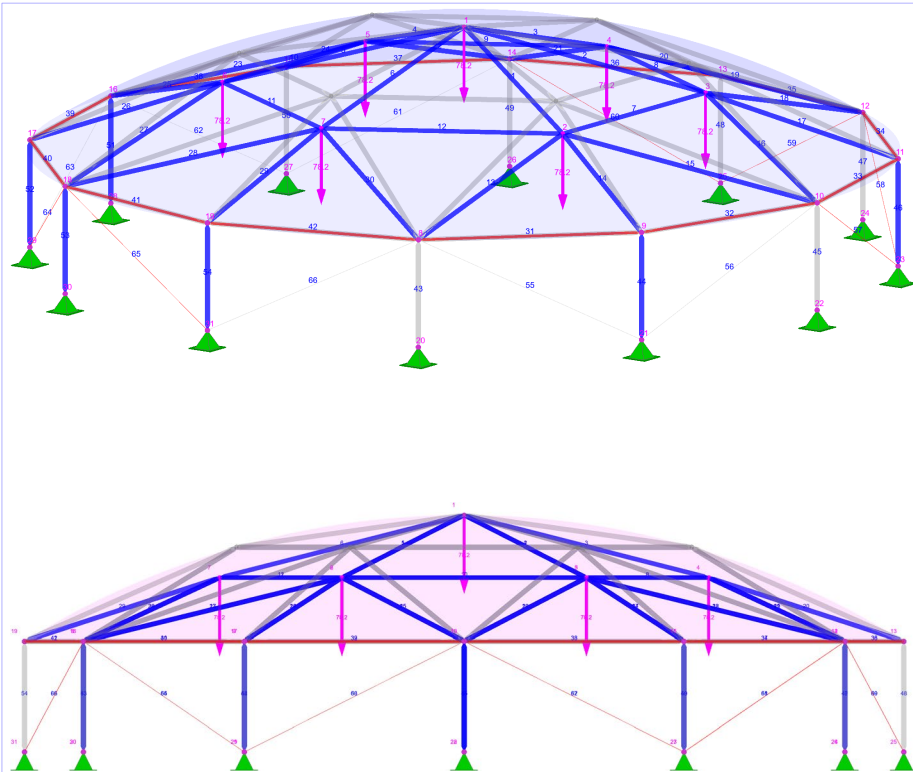
Optimización de geometría(XYZL). Restricciones T, P, E, D



Peso inicial: 12 590,5 kg
Peso óptimo (P): 10 934,4
Peso óptimo (GZ): 10 648,0
Peso óptimo (GXYZ): 10 605,0

Cúpula triangulada.

Optimización de geometría(XYZR). Restricciones T, P, E, D



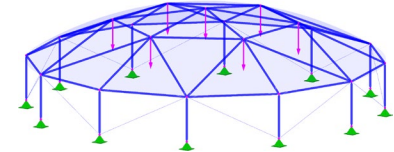
Peso inicial: 12 590,5 kg
Peso óptimo (P): 10 934,4
Peso óptimo (GZ): 10 648,0
Peso óptimo (GXYZ): 10 605,0
Peso óptimo (GXYZR): 10 664,0

5. Herramientas tecnológicas de optimización.

5.1 Académicas (GOE UPCT) y Open Source (1)

- **LabDO_ENA**

Diseño óptimo, de propiedades y de geometría, de estructuras de nudos articulados planas y tridimensionales.



- **TTO**

Diseño óptimo de topología de estructuras planas de nudos articulados.



- **liteITD**

Diseño óptimo de topología de estructuras planas.



<https://www.upct.es/goe/software.php>

5. Herramientas tecnológicas de optimización.

5.1 Académicas (GOE UPCT) y Open Source (2)

■ Dlubal RFEM

Tipo: Software comercial con licencias gratuitas para universidades.

Aplicaciones: Estructuras metálicas, de madera y de hormigón.

Ventajas: Tiene "*form finding*". Tiene algunas posibilidades de optimización paramétrica. Puede utilizarse, mediante Python, para realizar optimización de forma iterativa.

Ideal para: Proyectos de estructuras ligeras.

■ FreeFEM

Tipo: Software de elementos finitos para problemas PDE. Licencia libre (LGPL)

Aplicaciones: Permite formulaciones personalizadas de problemas de optimización estructural.

Ideal para: Usuarios con conocimientos avanzados en formulación matemática y optimización.

5. Herramientas tecnológicas de optimización.

5.2 Comerciales (1)

Altair OptiStruct

Tipo: Optimización de tamaño, de forma, de topología y de materiales.

Aplicaciones: Ingeniería civil, aeroespacial, automotriz.

Ventajas: Muy adecuado diseñar para estructuras ligeras y eficientes. Optimización multiobjetivo.

Ideal para: Optimización de estructuras complejas y **diseño conceptual**.

TOSCA Structure (de Dassault Systèmes)

Tipo: Optimización no paramétrica basada en FEA.

Aplicaciones: Optimización de tamaño, de forma y de topología.

Ventajas: Se integra con Abaqus y otros entornos CAE.

Ideal para: **Diseño conceptual** y reducción de masa estructural.

ANSYS Mechanical (con DesignXplorer)

Tipo: Análisis por elementos finitos + **optimización paramétrica**.

Aplicaciones: Ingeniería estructural, mecánica, térmica.

Ventajas: Permite estudios de sensibilidad, DOE (*Design of Experiments*) y optimización multiobjetivo.

Ideal para: Proyectos donde se combinan cargas estructurales y térmicas.

5. Herramientas tecnológicas de optimización.

5.2 Comerciales (2)

GENIE (de DNV)

Tipo: Modelado y optimización de estructuras offshore.

Aplicaciones: Plataformas marinas, estructuras de acero.

Ventajas: Incluye herramientas de optimización estructural específicas para estructuras marinas.

Ideal para: Ingeniería offshore y estructuras metálicas complejas.

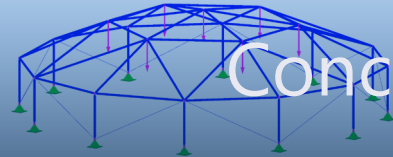
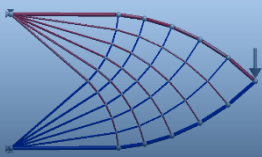
MIDAS Civil + MIDAS NFX

Tipo: Análisis estructural + optimización.

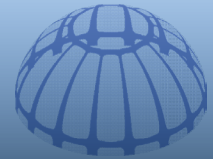
Aplicaciones: Puentes, edificios, túneles.

Ventajas: MIDAS NFX incluye optimización de forma y de topología.

Ideal para: Proyectos de infraestructura civil con necesidades de eficiencia estructural.



Conclusiones



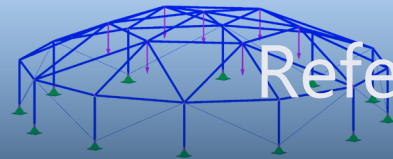
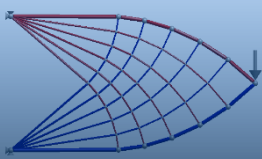
Los avances experimentados en:

- herramientas de análisis de estructuras,
- técnicas de optimización,
- diseño asistido por ordenador,

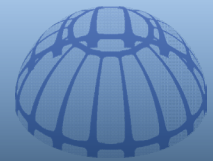
y la tecnología informática más rápida y accesible,

tienen el potencial necesario para transformar el diseño de estructuras permitiendo a los diseñadores:

- ✓ Explorar más alternativas de diseño
- ✓ Liberarse de tareas repetitivas
- ✓ Enfocarse en el pensamiento crítico y la innovación



Referencias



- ✓ Company Calleja, Pedro P. Aplicaciones de las tecnologías CAD al diseño de estructuras mediante Programación Matemática No Lineal. Tesis doctoral, UPV, Valencia, enero de 1989.
- ✓ Martínez, Castejón, Pedro. Diseño óptimo simultáneo de topología y geometría de estructuras articuladas mediante técnicas de crecimiento. Tesis doctoral, UPCT, Cartagena, octubre de 2003.
- ✓ Victoria Nicolás, Mariano. Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos. Tesis doctoral, UPCT, Cartagena, junio de 2006.
- ✓ Tomás Espín, Antonio. Diseño óptimo de forma y armado de láminas de hormigón. Tesis doctoral, UPCT, Cartagena, diciembre de 2007.