



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de
Medios Continuos y Teoría de Estructura**

Diseño y Cálculo de un Hangar mediante el software RFEM

Autora:

Antonia Sánchez Chica

Tutor:

José Sandino Egea

Información académica:

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

MÁLAGA, 5 de julio de 2024

El proceso, no la perfección, es la clave del éxito.

AGRADECIMIENTO

Me gustaría mostrar mi mas sentido agradecimiento:

A mis amigos conocidos en la Universidad, por todas las tardes/noches de estudio en video-llamada, por compartir llantos y alegrías y bueno alguna que otra ayudita con los apuntes.

A mis amigos del Pueblo, a las amistades perdidas, recuperadas y a las nuevas, gracias por siempre escucharme, ayudarme y apoyarme, no os imagináis lo feliz que me siento al ver que os sentíis orgullosos de mí. Pero destacando a Laura, la cual me hice amiga de ella sin saber que sería mi segunda familia, gracias por todos los cafés, llamadas de agobio y millones de mensajes seguidos, como te gustan, pero siempre ahí, para mí. Un pilar esencial en estos cuatro años.

A mi Abel, por estar ahí en las buenas y en las malas, escuchándome aunque diga lo mismo 1000 veces, al pie del cañón en cada decisión que tomo, por ser mi momento de despeje en esos días de agobios y mi mayor consejero, aunque aún no sabe lo que le espera... mi compañero de agobios, llantos, risas y aventuras. Gracias por siempre tener un SI para mí.

Al despacho 3.011, por tratarme tan bien desde el minuto uno. Pero sobre todo a uno de ellos, José Sandino Egea, profesor, tutor, jefe (aunque no le guste que se lo diga) y ojalá que futuro amigo. Por darme una oportunidad única de aprender del mejor, por ver cosas en mí que ni yo misma veía y por aconsejarme como si de tu familia fuese. Has sabido ganarte un hueco en mí muy grande que nunca tendrá como agradecerle.

A mi familia, en especial a mis primos y tíos, por hacer de saco cuando me agobio, por prepararme las meriendas y por estar ahí en cada paso dándome y comprándome todo lo que pido, como mi primer casco.

A mis padres, por enseñarme y educarme a ser como soy. Por dármelo todo siempre aún sin tenerlo y por sufrir conmigo cada llanto y cada risa de este camino. A la misma vez pediros perdón por no haberlos tratado de la mejor forma posible en este tiempo pero ahí estabais aunque ni yo misma me aguantase. Y bueno, por los mejores taper que pueden preparme. Gracias, gracias y gracias.

A mi estrella del cielo, mi abuela. Creo no he podido acordarme mas de ella en este último tiempo, por todas las llamadas diciéndome suerte antes de un examen. Por esos "liadillos" que me hacías para guardar en la mochila y que me diese suerte, pero lo que no sabia es que la suerte la tuve al tenerla como abuela. Gracias por darme la mejor infancia que pude tener.

Y por último, a mí. A mi yo del pasado, con miedos e inseguridades, le digo que lo ha conseguido y no puedo estar mas orgullosa de esa persona. A mi yo del presente, por seguir creciendo y aprendiendo. Y a mi yo del futuro, que llegarás donde te propongas y que todo esfuerzo merecerá la pena.

Cumpliendo un sueño...



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL PROYECTO/TRABAJO FIN DE GRADO:

D./ Dña.: ANTONIA SÁNCHEZ CHICA.

DNI/Pasaporte: 77666839-W.

Correo electrónico: asanchezchica2001@uma.es

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

Título del Proyecto/Trabajo: Diseño y Cálculo de un Hangar mediante el software RFEM.

DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD

Ser autor/a del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin. Así mismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

MÁLAGA, 5 de julio de 2024

Fdo: Antonia Sánchez Chica.

Índice

1. Objeto	13
2. Antecedentes	15
3. Normativas aplicadas	17
4. Definiciones y referencias	19
5. Metodología de Trabajo y Programas usados	21
6. Especificaciones del Hangar	23
6.1. Especificaciones Generales	23
6.2. Cargas Usadas	24
6.2.1. Peso Propio	24
6.2.2. Sobrecarga de Uso	24
6.2.3. Carga de Nieve	24
6.2.4. Carga de Viento	26
7. Cálculo a partir del Eurocódigo	29
7.0.1. Cálculo en Primer Orden	31
7.0.2. Cálculo en Segundo Orden	31
7.0.3. Resumen Cálculo Análisis Estabilidad	33
8. Modelo con Imperfecciones, Análisis de Estabilidad	35
8.1. Clasificación del coeficiente α_{cr}	35

ÍNDICE

8.2. Análisis de Estabilidad	35
8.3. Análisis de Alabeo por torsión - 7 gdl	36
9. Comprobación de la estructura	39
9.1. Comprobación Estado Límite Último	39
9.1.1. Pilares	39
9.1.2. Dinteles	41
9.1.3. Correas	42
9.2. Comprobación Estado Límite de Servicio	42
10. Cálculo de Uniones	45
10.0.1. Unión en Cumbre	45
10.0.2. Unión en Pilares	47
11. Cálculo de la Cimentación	51
12. Conclusión	55
13. Anexo	57
13.1. Anexo 1: Manual RFEM	57
13.1.1. Datos generales	57
13.1.2. Creacion de materiales	59
13.1.3. Creacion de tipos de secciones	59
13.1.4. Tipos de Apoyos	61
13.1.5. Cálculo de cargas	62
13.1.6. Análisis de 1ºorden y 2ºorden	68
13.1.7. Análisis de Estabilidad con alabeo por torsión-7gdl	70
13.1.8. Uniones	71
13.2. Anexo 2: Comprobaciones de Cálculo en RFEM	75
13.3. Anexo 3: Comprobaciones de Cálculo de Uniones en RFEM	82
13.3.1. Comprobación Unión en Cumbre	82

ÍNDICE

13.3.2. Comprobación Unión en Pilares	83
---	----

ÍNDICE

Índice de figuras

6.1. Dimensiones pórtico. Fuente:Propia	23
6.2. Profundidad del pórtico. Fuente:Propia	24
6.3. Panel Sandwich Tipo	24
6.4. Valores característicos de las sobrecargas de uso. Tabla 3.1 DB SE-AE	25
6.5. Sobrecarga de nieve en capitales de provincias y ciudades autónomas, Tabla 3.8 del CTE.	25
6.6. Coeficiente de exposición, Tabla 3.4 del DBSE-AE.	26
6.7. Coeficiente eólico, Figura D.1 del DBSE-AE.	26
6.8. Presión dinámica del viento, Tabla 3.5 del DBSE-AE.	27
7.1. Perfiles seleccionados-RFEM	29
7.2. Esquema de pilares. Fuente: Propia.	31
7.3. Método de Análisis Estructural- 1º orden. Fuente:Propia.	32
7.4. Método de Imperfecciones globales y locales junto con un Análisis Resistente. Fuente:Propia.	32
7.5. Método de Imperfecciones globales, Análisis Resistente y Análisis de Estabilidad. Fuente:Propia.	32
7.6. Resumen Cálculo Análisis Estabilidad. Fuente:Propia.	33
8.1. Modo de pandeo seleccionado con $\alpha_{cr} = 8.32$ -RFEM	36
8.2. Modo de torsión en dinteles-RFEM	37
9.1. Comprobación de Pilares-RFEM	41
9.2. Comprobación de Dinteles-RFEM	42
9.3. Comprobación de Correas-RFEM	42

ÍNDICE DE FIGURAS

9.4. Valor de Cálculo de deflexión en RFEM	43
10.1. Unión en Cumbre	46
10.2. Comprobaciones en Unión Cumbre- RFEM	46
10.3. Componentes cartela Unión Cumbre- RFEM	46
10.4. Componentes de Chapa en Unión Cumbre- RFEM	46
10.5. Resistencia de cálculo para elementos de fijación individuales. Tabla 3.4, EN 1993 1-8.	48
10.6. Coeficiente de correlación β_w para soldaduras en ángulo. Tabla 4.1, EN 1993 1-8.	48
10.7. Unión en Pilar	49
10.8. Comprobaciones en Unión Pilar- RFEM	49
10.9. Componentes Cartela en Unión Pilar- RFEM	49
10.10 Componentes Chapa en Unión Pilar- RFEM	50
11.1. Introducción-Entrada de Pilares- CYPE	51
11.2. Reacciones Primer Pórtico- RFEM	52
11.3. Reacciones Pórtico Medio- RFEM	53
11.4. Dimensiones y elementos de Cimentación- Cype	53
11.5. Proceso constructivo de zapatas con pozos-Cype	54
12.1. Resolución Hangar 40 m -RFEM	56
13.1. Datos generales	57
13.2. Datos generales-Complementos	58
13.3. Navegador de Datos - RFEM	58
13.4. Nuevo Material - RFEM	59
13.5. Librería de materiales - RFEM	59
13.6. Nueva sección - RFEM	60
13.7. Nueva barra- RFEM	61
13.8. Nueva barra- canto variable- RFEM	61
13.9. Nueva barra- canto variable-sección parametrizada-RFEM	62

ÍNDICE DE FIGURAS

13.10Nuevo apoyo-RFEM	62
13.11Nuevo apoyo-Tipos de apoyos-RFEM	63
13.12Nuevo caso de carga-RFEM	63
13.13Nuevo caso de carga- Tipo de caso- RFEM	64
13.14Nueva superficie- RFEM	64
13.15Asistente de cargas- RFEM	65
13.16Asistente de carga de viento- RFEM	65
13.17Parámetros de carga de viento- RFEM	66
13.18Parámetros de carga de viento- RFEM	66
13.19Carga para Cruces de San Andres- RFEM	67
13.20Caso de Imperfección- RFEM	68
13.21Caso de Carga-Asignación-RFEM	68
13.22Tipos de Cálculo-Condición de Contorno-RFEM	69
13.23Tipos de Apoyos-RFEM	69
13.24Situación de proyecto- Tipos de situación- RFEM	69
13.25Configuración- RFEM	70
13.26Tipos de configuración y análisis de estabilidad- RFEM	70
13.27Situación de proyecto- Tipos de situación- RFEM	71
13.28Datos Básicos-Uniones de Acero - RFEM	71
13.29Creación de Uniones - RFEM	72
13.30Datos principales Uniones - RFEM	72
13.31Componentes de Uniones - RFEM	73
13.32Comprobación plausible de Uniones - RFEM	73
13.33Listado de Componentes de Uniones - RFEM	74
13.34Comprobación Momento Flector del Pilar	75
13.35Comprobación a elasticidad en Pilares	76
13.36Comprobación a flexión y esfuerzo axil en Pilares	77
13.37Comprobación elementos uniformes sometidos a compresión y flexión en Pilares	78
13.38Comprobación a elasticidad en Dinteles	79

ÍNDICE DE FIGURAS

13.39Comprobación a flexión,esfuerzo cortante y esfuerzo axil en Dinteles	80
13.40Comprobación a elasticidad en Correas	81
13.41Comprobación de Placa de Unión Cumbre	82
13.42Comprobación de tornillos de Unión Cumbre	83
13.43Comprobación de soldadura en Unión Cumbre	84
13.44Comprobación de Placa de Unión en Pilares	85
13.45Comprobación de tornillos de Unión en Pilares	86
13.46Comprobación de soldadura en Unión en Pilares	87

1 Objeto

El objetivo de este proyecto es desarrollar un análisis detallado y un diseño estructural de un hangar utilizando los principios del Eurocódigo EN 1993. Este análisis buscará asegurar la estabilidad y seguridad de la estructura frente a diferentes cargas y condiciones, optimizando el uso de materiales y cumpliendo con las normativas vigentes.

Objetivos Específicos:

1. Identificación de Cargas: Determinar las cargas permanentes (G) y variables (Q) que afectan al hangar, incluyendo cargas de uso, viento, nieve, de acuerdo con el Eurocódigo.
2. Análisis de Estabilidad: Calcular el factor de carga crítica (alfa crítico, α_{cr}) para la estructura del hangar, evaluando la estabilidad frente a pandeo bajo diferentes combinaciones de carga.
3. Modelado y Simulación: Crear un modelo detallado del hangar utilizando software de análisis estructural (RFEM) un potente programa de análisis de elementos finitos que permite el cálculo en segundo orden, desarrollado por Dlubal Software, simulando la respuesta de la estructura bajo diferentes cargas y condiciones.
4. Optimización del Diseño: Proponer un diseño optimizado de los elementos estructurales del hangar, considerando la resistencia, rigidez y estabilidad, minimizando el uso de materiales y costos, sin comprometer la seguridad.
5. Verificación Normativa: Verificar que el diseño cumpla con todos los requisitos y limitaciones impuestas por el Eurocódigo, incluyendo las verificaciones de resistencia y servicio.
6. Documentación y Presentación: Documentar todos los cálculos, análisis y diseños realizados. Presentar los resultados de manera clara y comprensible, incluyendo planos y detalles constructivos.

Objeto

2 Antecedentes

Tras cursar varias asignaturas relacionadas con el cálculo de estructuras, se pretende seguir avanzando en este campo. Para ello se propone el cálculo de un hangar mediante un software de elementos finitos y cálculo en segundo orden, con el objetivo de hacer un cálculo de acuerdo al Eurocódigo EN 1993 aprovechando todas las ventajas que proporciona un software de este tipo.

Antecedentes

3 Normativas aplicadas

- Código Técnico de la Edificación (CTE). Real Decreto 314/2006.
- Documento Básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación. (DBSE-AE)
- Eurocódigo (EN-1993).
- Documento Básico de Seguridad Estructural de Acero (DBSE-A)
- Código Técnico de la Edificación (DBSE-C).

4 Definiciones y referencias

- CTE Código Técnico de la Edificación.
- RFEM
- DBSE-AE Documento Básico-Seguridad Estructural Acciones en la edificación.
- Longitud del sistema distancia entre dos puntos consecutivos donde el elemento tiene coaccionado su desplazamiento lateral.
- α_{cr} coeficiente por el que resulta necesario multiplicar las cargas de cálculo para provocar la inestabilidad elástica del modelo de pandeo global de la estructura.
- F_{cr} carga crítica de inestabilidad elástica para el pandeo de la estructura según un modo global.
- F_{ed} carga de cálculo actuando sobre la estructura.
- e_o imperfección de un elemento.
- $e_p - Mises$ Deformación plástica equivalente máxima
- $e_p - limit$ Deformación plástica equivalente límite

5 Metodología de Trabajo y Programas usados

El plan de trabajo se compone de varias etapas:

- Revision de normativas.
- Cálculo preliminar de cargas que afectarán al hangar.
- Análisis de estabilidad, evaluación de la necesidad de efectuar un cálculo en primer o segundo orden.
- Estudiar diversas tipologías que se adapten a la solución propuesta.
- Predimensionar cada una de ellas y decidir cuál es la mejor opción desde un punto de vista de la eficiencia.
- Calcular la estructura elegida teniendo en cuenta todos los requerimientos del Eurocódigo 3.
- Comparación de los resultados obtenidos y ajustes necesarios.
- Anexos de cálculo y planos estructurales.

Además, en el transcurso de este trabajo, se ha hecho uso de los siguientes programas:

- Dlubal RFEM 6
- AUTOCAD 2024
- Overleaf LaTeX

6 Especificaciones del Hangar

Un hangar es una estructura de dimensiones elevadas y muy esbelta, diseñada principalmente para albergar aeronaves y protegerlas de los elementos externos, como el clima y otros factores ambientales. A continuación, se describen las especificaciones comunes de un hangar:

6.1. Especificaciones Generales

Estas especificaciones pueden variar dependiendo del uso específico del hangar, el tipo de aeronaves que se alojarán, y las normativas aplicables a las instalaciones aeronáuticas.

En el caso de nuestro proyecto, se trata de un hangar situado en Málaga, España y constará de una altura máxima de cumbre de 15 m con una altura de pilares de 10m. Además, tendrá una profundidad de 80 m y una luz de pórtico de 30 m, como se observa en las Figuras 6.1 y 6.2.

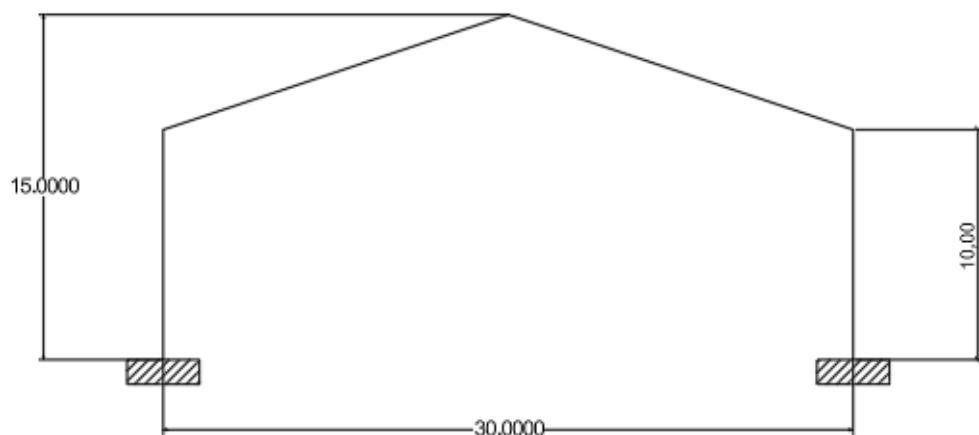


Figura 6.1. Dimensiones pórtico. Fuente:Propia

En cuanto a los materiales, estará formado por perfiles de acero, con paredes y techos de panel sándwich (6.3).

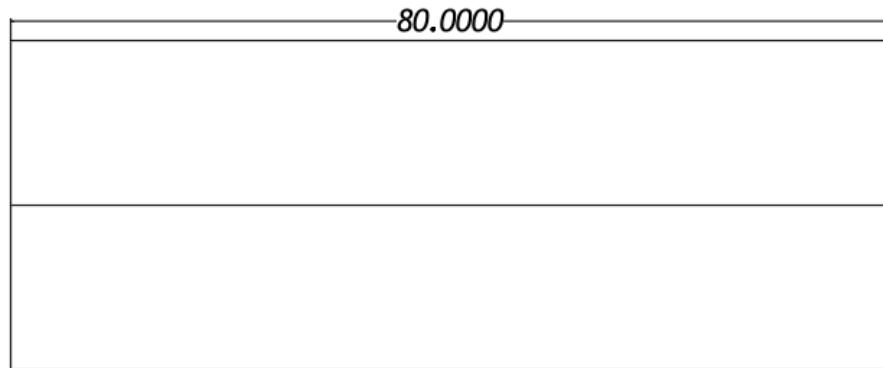


Figura 6.2. Profundidad del pórtico. Fuente:Propia

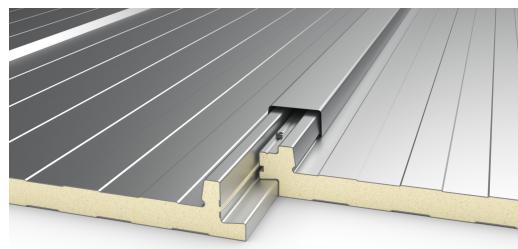


Figura 6.3. Panel Sandwich Tipo

6.2. Cargas Usadas

6.2.1. Peso Propio

Estas incluyen el peso propio de la estructura y las cubiertas. En el caso del hangar, se le aplicará una carga superficial de 0.25 kN/m^2 , carga debida al panel sándwich.

6.2.2. Sobrecarga de Uso

Según el Código Técnico de la Edificación (CTE), este peso corresponde a todas las cargas que pueden actuar sobre el edificio debido a su uso. El valor de esta sobrecarga está especificado en la Tabla 3.1 (Figura 6.4) del documento básico SE-AE. En este caso específico, consideramos la categoría G1, que se refiere a cubiertas ligeras sobre correas, con un valor de $0,4 \text{ kN/m}^2$.

6.2.3. Carga de Nieve

En el caso de las cargas de nieve, el valor se basa en la siguiente expresión:

$$q_n = \mu \cdot s_k \quad (6.1)$$

Siendo:

μ coeficiente de forma de la cubierta según el apartado 3.5.3 del CTE que efectua lo siguiente:

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitalares y hoteles		2
		A2	Trasteros		3
B	Zonas administrativas				2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas		3
		C2	Zonas con asientos fijos		4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.		5
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas		5
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)		5
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales		5
D	Zonas comerciales	D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies		5
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°		1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾		0,4 ⁽⁴⁾
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°		0
					2

Figura 6.4. Valores característicos de las sobrecargas de uso. Tabla 3.1 DB SE-AE

.En un faldón limitado inferiormente por cornisas o limatesas, y en el que no hay impedimento al deslizamiento de la nieve, el coeficiente de forma tiene el valor de 1 para cubiertas con inclinación menor o igual que 30º y 0 para cubiertas con inclinación de mayor o igual que 60º (para valores intermedios se interpolará linealmente). Si hay impedimento, se tomará P = 1 sea cual sea la inclinación." .

S_k el valor característico de la carga de nieve sobre el terreno horizontal según la tabla 3.8 del apartado 3.5.2 del CTE (Figura 6.5).

Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincias y ciudades autónomas

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

Figura 6.5. Sobrecarga de nieve en capitales de provincias y ciudades autónomas, Tabla 3.8 del CTE.

6.2.4. Carga de Viento

La acción del viento o una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto puede expresarse mediante el valor de la presión estática q_e :

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (6.2)$$

siendo:

- q_b presión dinámica del viento, varía en función del emplazamiento geográfico de la obra, anexo D.Figura 6.8
- c_e coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado y en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Figura 6.6
- c_p coeficiente eólico de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento.Figura 6.7

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

Figura 6.6. Coeficiente de exposición, Tabla 3.4 del DBSE-AE.

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Figura 6.7. Coeficiente eólico, Figura D.1 del DBSE-AE.



Figura 6.8. Presión dinámica del viento, Tabla 3.5 del DBSE-AE.

7 Cálculo a partir del Eurocódigo

Tras definir la geometría del hangar, se realizará el modelo en RFEM, siguiendo el Anexo 13.1 .

El modelo constará con los siguientes perfiles:



Figura 7.1. Perfiles seleccionados-RFEM

siendo el perfil 1 para los pilares, el perfil 5 para las correas, el perfil 3 y 4 para los dinteles y el perfil 6 para las cruces de San Andrés.

Una vez realizada la geometría y asignar las cargas (explicadas en el Anexo (13.1.5) procedemos a su análisis de estabilidad.

Un valor fundamental en el análisis de estabilidad, es el cálculo del alfa crítico α_{cr} , especialmente en estructuras con gran esbeltez y sometidas a grandes cargas. Dicho parámetro, representa el factor de carga que hay que aplicar a la estructura para provocar la inestabilidad elástica del modo de pandeo. Determinar este valor es crucial para asegurar la estabilidad de una estructura ya que nos permite evaluar la capacidad que tiene a soportar cargas sin pandear.

Según el Eurocódigo 3, la estructura se calculará mediante uno de los siguientes métodos:

- Análisis en primer orden, utilizando la geometría inicial de la estructura, dicha opción se usará cuando la deformación de la estructura sea despreciable. Según el Eurocódigo 3, en el apartado 5.2.1, se puede encontrar la siguiente clasificación para el cálculo de primer orden.

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ para el análisis elástico} \quad (7.1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \text{ para el análisis plástico} \quad (7.2)$$

siendo:

F_{Ed} carga de cálculo actuante sobre la estructura

F_{cr} carga crítica de inestabilidad elástica para el pandeo de la estructura según un modo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales.

- Análisis en segundo orden, considerando la influencia de la deformación de la estructura, será de aplicación cuando los esfuerzos aumenten significativamente debido a los términos asociados a la matriz de rigidez geométrica.

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \leq 10. \quad (7.3)$$

Para poder entender mejor la clasificación de α_{cr} se explicará la diferencia entre el cálculo de primer orden y segundo orden.

Todo comienza en la siguiente expresión:

$$[K_i - \alpha_i \cdot K_g] \cdot U_i = 0 \quad (7.4)$$

siendo:

K_i la matriz de rigidez lineal.

K_g la matriz de rigidez geométrica

U_i modos de pandeo

α_i factor de ampliación, dicho valor se aproxima a la expresión siguiente:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (7.5)$$

siendo: N axil a compresión.

N_{cr} carga crítica de pandeo.

El valor de la ecuación 7.5 puede verse en el apartado 7.1.4 del libro de Estructuras de Acero, 2º edición, R. Argüelles Álvarez. En el siguiente apartado se explicará mas detalladamente el factor de amplificación.

Factor de Amplificación

El término de factor de amplificación esta asoaciado a la matriz de rigidez geométrica, dicho término va restando al término de rigidez de material y en el caso de que el axil N se acerque al axil crítico de pandeo de Euler, N_{cr} , la rigidez global de la estructura estará afectada negativamente, dando lugar a unos esfuerzos bastante más elevados que los correspondientes a un cálculo de primer orden.

Cuando el axil N es mucho menor que N_{cr} las diferencias entre un cálculo en primer o en segundo orden son insignificantes. En este caso, el término de rigidez geométrica puede considerarse despreciable.

Podría verse claramente en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 1: Se parte con los datos de la Figura 12.1, es decir, un pilar HEB 400 y un pilar HEB 100 soportando los mismos esfuerzos.

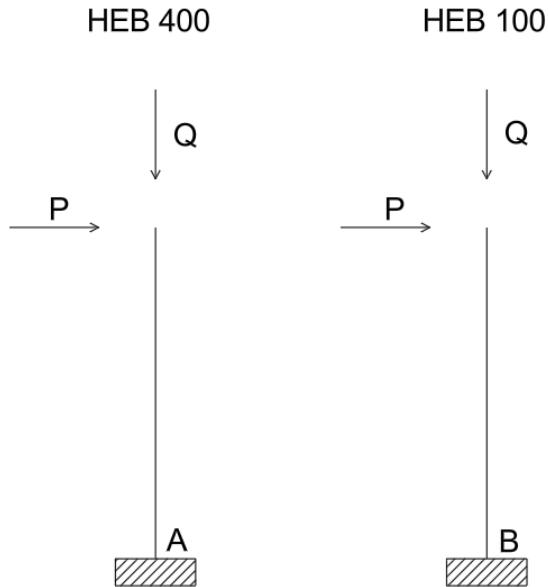


Figura 7.2. Esquema de pilares. Fuente: Propia.

A igualdad de cargas, el pilar HEB 100 tiene un esfuerzo axil proximo al crítico provocando que el término asociado a la matriz de rigidez geométrica sea considerable y, por lo tanto, será necesario un cálculo en segundo orden. Por lo contrario, en el pilar HEB 400 el esfuerzo axil N , idéntico al anterior, está muy alejado del axil crítico de pandeo, haciendo que el término asociado a la matriz de rigidez geométrica sea despreciable, siendo válido un cálculo en primer orden.

Tras la clasificación del coeficiente α_{cr} pasamos al procedimiento de cómo resolver el problema tanto si esta en primer orden como en segundo orden.

7.0.1. Cálculo en Primer Orden

Conforme al cálculo en primer orden, en el apartado 5.2.2 (8) del Eurocódigo 3, se expone que dicha resolución es a través del método denominado de las longitudes eficaces, sin tener en cuenta las imperfecciones. Este es un procedimiento complejo ya que el valor de las longitudes de pandeo depende de cada combinación de carga, por lo tanto, a cada combinación le corresponderá una longitud eficaz diferente. Si en una estructura actual, es habitual contar con decenas, si no, cientos de combinaciones, la cantidad de longitudes eficaces que se generan es muy grande y la elección de la adecuada no es, ni mucho menos, trivial.

7.0.2. Cálculo en Segundo Orden

En el cálculo en segundo orden se deben tener en cuenta las imperfecciones. Estas son desviaciones estructurales que afectan al comportamiento del elemento que se analice frente a un estudio de inestabilidades. En el cálculo de imperfecciones se deberán tener en cuenta las siguientes:

- Cálculo de Imperfecciones globales y locales y Análisis Resistente, según el apartado 5.3.2

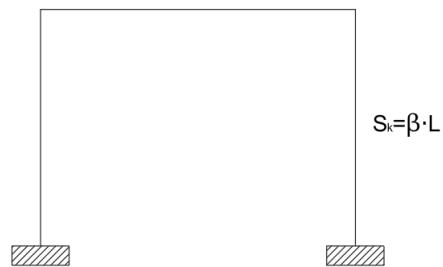


Figura 7.3. Método de Análisis Estructural- 1º orden. Fuente:Propia.

(6) del Eurocódigo 3.

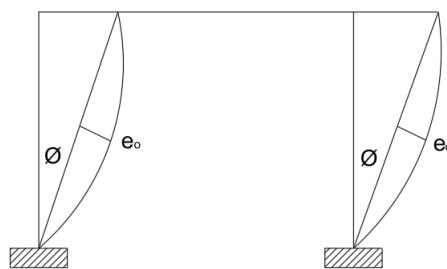


Figura 7.4. Método de Imperfecciones globales y locales junto con un Análisis Resistente. Fuente:Propia.

- Cálculo de Imperfecciones globales, Análisis de Estabilidad y adoptando una longitud de pandeo igual a la longitud del sistema, apartado 5.2.2(7.b) del Eurocódigo 3.

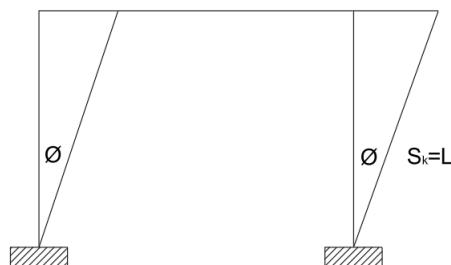


Figura 7.5. Método de Imperfecciones globales, Análisis Resistente y Análisis de Estabilidad. Fuente:Propia.

- Modelo deformado y Análisis Resistente. Esta opción es de las mas complejas ya que hay que establecer para cada elemento de la estructura una deformada según un modo de pandeo afín y cada elemento pandeará con una determinada combinación de acciones, por lo que a nivel práctico se tendrían que establecer un número excesivamente alto de combinaciones diferentes para analizar la totalidad de la estructura, no teniendo, por tanto, mucha utilidad práctica. Esta opción, sin embargo, es buena desde el punto de vista académico analizando un número pequeño de elementos.

7.0.3. Resumen Cálculo Análisis Estabilidad

En la siguiente imagen (7.6) se puede ver esquemáticamente los pasos a seguir para un cálculo completo de Análisis de Estabilidad.

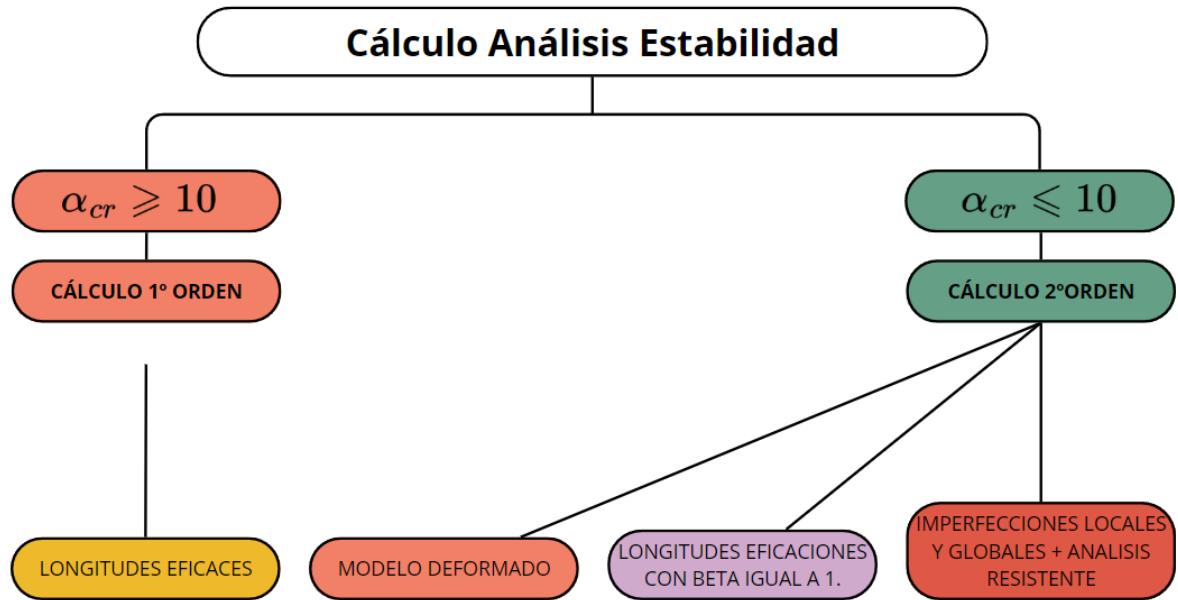


Figura 7.6. Resumen Cálculo Análisis Estabilidad. Fuente:Propia.

8 Modelo con Imperfecciones, Análisis de Estabilidad

Tras finalizar la explicación del procedimiento a seguir se comenzará con el cálculo de la estructura. El primer paso será ejecutar un análisis de estabilidad para obtener el coeficiente α_{cr} y así saber qué tipo de cálculo tenemos que emplear para dimensionar la estructura, ya sea en primer o segundo orden.

Aclarar que el análisis se realizará para un hangar de 40 m de longitud ya que según la normativa, se le aplicará una junta de dilatación a dicha distancia para realizar la unión de las dos naves. Es por eso, que el cálculo se realizará a una de ellas considerando las mismas características para la segunda parte completando toda la estructura del hangar.

8.1. Clasificación del coeficiente α_{cr}

Después de explicar en el apartado 7 la clasificación del α_{cr} , se procede a calcular este coeficiente para la estructura que nos ocupa. Este procedimiento de cálculo en RFEM puede verse paso a paso en el Anexo

Como se puede apreciar en la Figura 8.1 el valor de α_{cr} es menor que 10 por tanto se tendrá que realizar un cálculo en segundo orden.

Me gustaría hacer recalcar este hecho, ya que según la normativa vigente, es obligatorio hacer un cálculo en segundo orden para esta estructura, de manera que estaríamos incumpliendo la normativa si hiciéramos un cálculo en primer orden, como por ejemplo, un cálculo hecho con el programa CYPE 3D.

8.2. Análisis de Estabilidad

Una vez teniendo claro qué tipo de cálculo a realizar, en este caso, segundo orden, el siguiente paso es elegir una de las soluciones de cálculo explicadas en el apartado 7.

En este caso, se decide realizar un cálculo con imperfecciones globales, un análisis de estabilidad y asumiendo una longitud de pandeo igual a la longitud del sistema. El no elegir otro de los métodos se debe a su complejidad a la hora de su resolución, por ejemplo, en la opción de cálculo de imperfecciones globales y locales, el cálculo es bastante complejo ya que al tener que coincidir imperfecciones locales con globales, se obtiene un número muy elevado de combinacio-

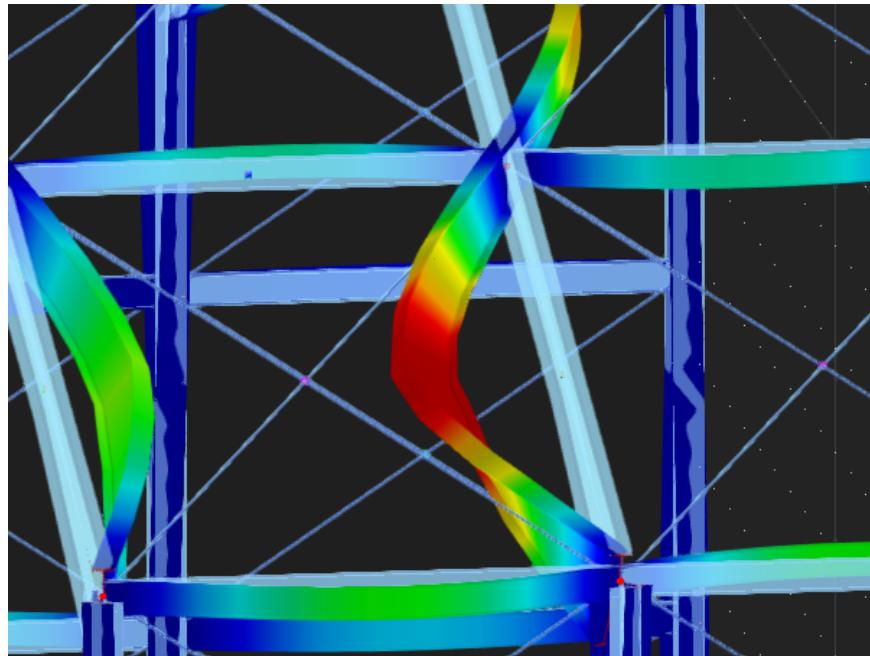


Figura 8.1. Modo de pandeo seleccionado con $\alpha_{cr} = 8.32$ -RFEM

nes independientes siendo un cálculo poco práctico. Respecto al método de modelo deformado, se realizará posteriormente un análisis específico de una viga característica como procedimiento académico debido a que este software tiene la capacidad de realizar dicho cálculo.

El procedimiento para realizar este seguimiento en RFEM se encuentra en el Anexo 1 apartado 13.1.6.

8.3. Análisis de Alabeo por torsión - 7 gdl

Al ser el siguiente análisis bastante complejo, se ha realizado un cálculo por torsión de una sola viga a nivel académico ya que es un procedimiento casi imposible de efectuar en una nave completa. El Eurocódigo afirma que no se puede realizar un análisis de estabilidad en aquellas vigas donde existan momentos en el eje z, es por eso que en una de esas vigas se va a aplicar el método de análisis de torsión de alabeo con 7 grados de libertad. Además se tendrá en cuenta las cargas asignadas.

Se ha escogido el primer dintel del pórtico ya que al ser uno de los que tiene momento en z, tiene aplicada bastante carga en la dirección del viento.

En la imagen 8.2 se puede observar que en el modo 4 comienza el alabeo en dichos dinteles.

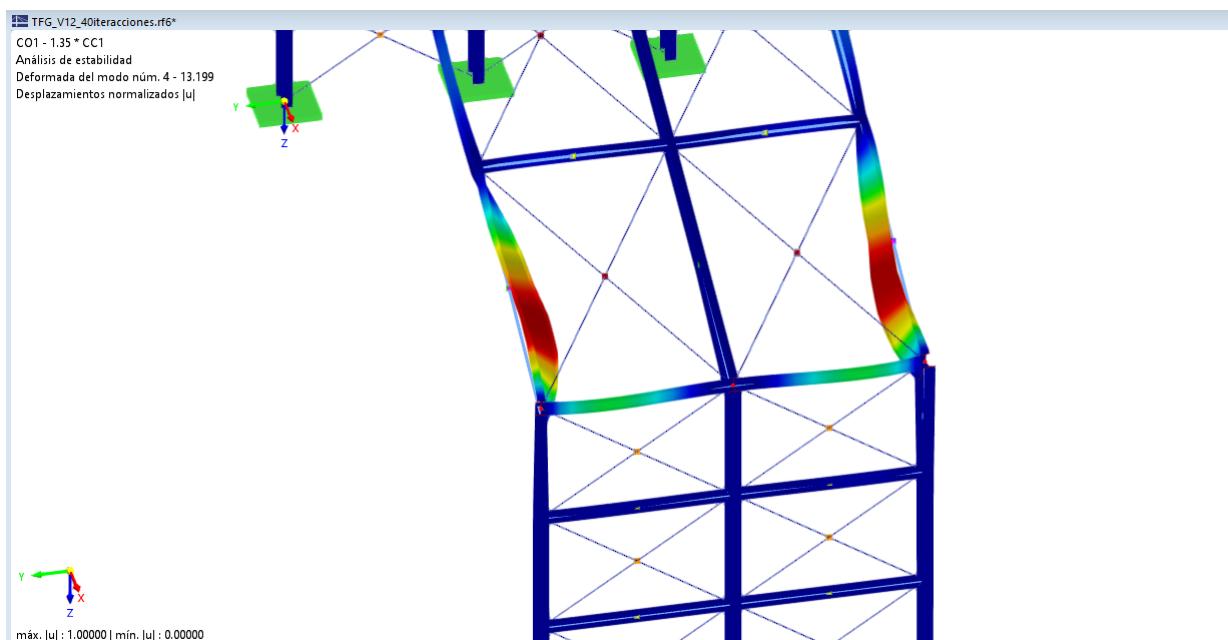


Figura 8.2. Modo de torsión en dinteles-RFEM

9 Comprobación de la estructura

La comprobación de los estados límite último (ELU) y de servicio (ELS) es una parte fundamental del diseño estructural en la ingeniería civil. Estos conceptos son cruciales para asegurar que las estructuras sean seguras y funcionales a lo largo de su vida útil.

El Estado Límite Último se refiere a las condiciones bajo las cuales una estructura o un elemento estructural podría colapsar debido por superar su capacidad resistente. Este estado incluye:

- Fallo de resistencia: Cuando la estructura no puede soportar más carga y colapsa.
- Fallo de estabilidad: Inestabilidades que pueden llevar al colapso, como pandeo o vuelco.
- Fallo de fatiga: Deterioro acumulativo debido a cargas repetidas.
- Fallo por impacto: Cuando la estructura no puede resistir impactos imprevistos.

El Estado Límite de Servicio se refiere a las condiciones bajo las cuales la estructura sigue siendo funcional y habitable. Este estado incluye:

- Deformaciones excesivas: Deformaciones que afectan la apariencia o la funcionalidad de la estructura, como deflexiones en vigas.
- Vibraciones: Vibraciones que pueden causar incomodidad o daño a la estructura o a sus componentes.
- Fisuras: Aparición de fisuras que pueden ser estéticamente inaceptables o indicar problemas a largo plazo.
- Corrosión: Daño a los materiales que comprometa la durabilidad.

Se representarán las comprobaciones de cada uno de los elementos característicos.

9.1. Comprobación Estado Límite Último

9.1.1. Pilares

En la figura 12.1 se puede apreciar varias comprobaciones significativas.

Comprobación Momento Flector

En el apartado 6.2.5 del Eurocódigo EN 1993-1-1, se determina la comprobación del momento flector que debe cumplir en cada sección transversal:

$$\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} = 0,469 \leq 1 \quad (9.1)$$

siendo $M_{ed} = 569.63$ kNm y $M_{c,Rd}=1215.30$ kNm habiendo sido aplicado en esta última un factor de seguridad de 1.05. Especificaciones en el Anexo 2 apartado 13.34.

Comprobación a elasticidad

Para la verificación la comprobación de la sección a tensión normal y tangencial, el Eurocódigo sigue la siguiente fórmula según EN 1993 -1-1,6.2.1(5).

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 = 0,551 \leq 1 \quad (9.2)$$

Veanse el Anexo 2, apartado 13.35.

Comprobación a flexión y esfuerzo axil

Según la fórmula del apartado 6.2.6 de EN 1993-1-1, se comprueba la flexión y los esfuerzos axiles.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (9.3)$$

Siendo:

V_{Ed} la resistencia de cálculo a cortante.

$V_{c,rd}$ la resistencia plástica de cálculo a cortante, siendo la expresión 9.4.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (9.4)$$

Obteniendo un resultado final de:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = 0,469 \leq 1,0 \quad (9.5)$$

Pudiéndose ver el procedimiento de cálculo en el Anexo 2, apartado 13.36.

Comprobación elementos uniformes sometidos a compresión y flexión

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{k_{yy} (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{k_{yz} (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (9.6)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{k_{zy} (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})}{\chi_{LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + \frac{k_{zz} (M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed})}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (9.7)$$

Veanse el Anexo 2 apartado 13.37, para ver el desglose de la fórmula.

Barra númer.	Posición x [m]	Punto de tensión num.	Situación de proyecto	Carga num.	Relación de control de cálculo η [-]	Tipo de compr. de diseño	Descripción
17	Viga 1 - HEB 500 L : 10.000 m						
	0.000 ±	SP1 CO101		0.031 ✓	SP12100_00	Comprobación de la sección Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4	
	0.000 ±	SP1 CO01		0.023 ✓	SP21200_00	Comprobación de la sección Torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7	
7.149	SP1 CO105			0.070 ✓	SP31300_01	Comprobación de la sección Cortante en el eje z y torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7(9) Cálculo plástico	
0.000 ±	SP1 CO105			0.086 ✓	SP31300_02	Comprobación de la sección Cortante en el eje z y según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) Cálculo plástico	
3.333 1/2	SP1 CO01			0.002 ✓	SP32200_02	Comprobación de la sección Cortante en el eje y y según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) Cálculo plástico	
0.000 ±	SP1 CO1			0.000 ✓	SP3500_00	Comprobación de la sección Abolladura por cortante según EN 1993-1-5, 5.1, 5.2, 5.3 y 5.5	
10.000 ±	SP1 CO107			0.469 ✓	SP4100_03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje y según EN 1993-1-1, 6.2.5(1) Cálculo plástico	
0.000 ±	SP1 CO01			0.065 ✓	SP5100_03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje z según EN 1993-1-1, 6.2.5(1) Cálculo plástico	
10.000 ±	SP1 CO105			0.551 ✓	SP6100_00	Comprobación de la sección Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.15(1) Cálculo elástico	
10.000 ±	SP1 CO105			0.216 ✓	SP6500_01	Comprobación de la sección Flexión biaxial, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9 y 6.2.10 Cálculo plástico	
	SP1 CO107			0.469 ✓	SP8500_00	Comprobación de la sección Flexión biaxial, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9 y 6.2.10 Cálculo plástico	
3.810	SP1 CO08			0.007 ✓	SP9500_00	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje z, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico	
0.000 ±	SP1 CO1			0.000 ✓	ST1100_00	Estabilidad Punto de inflexión por flexión respecto al eje y principal según EN 1993-1-1, 6.3.1	
	SP1 CO01			0.000 ✓	ST1200_00	Estabilidad Punto de inflexión por flexión respecto al eje z principal según EN 1993-1-1, 6.3.1	
	SP1 CO1			0.000 ✓	ST1500_00	Estabilidad Pandeo torsional según EN 1993-1-1, 6.3.3	
	SP1 CO107			0.533 ✓	ST3100_00	Estabilidad Flechas y pandeo respecto a los ejes principales según EN 1993-1-1, 6.3.3	
6.667 1/2	SP2 CO276			0.130 ✓	St1100_00	Estado límite de servicio Flechas en dirección z	
2.778	SP2 CO209			0.030 ✓	St1200_00	Estado límite de servicio Flechas en dirección y	
6.190	SP1 CO01			Advertencia ▲	#AS001_00	Advertencia La torsión se ignora para todas las verificaciones de estabilidad	

Figura 9.1. Comprobación de Pilares-RFEM

Como conclusión final se comprueba que los pilares cumple con las normativas necesarias.

9.1.2. Dinteles

En la imagen 9.2 se observa las comprobaciones significativas de los dinteles del hangar.

Comprobación a elasticidad

Al igual que en pilares, se hace la misma comprobación a elasticidad 9.1.1 dando un valor final de:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 = 0,448 \leq 1 \quad (9.8)$$

Desglose de la expresión en el apartado 13.38 del Anexo 2.

Comprobación a flexión, esfuerzo cortante y esfuerzo axil

Según el Eurocódigo 1993 -1-1 del apartado 6.2.9.2 , 6.2.9.3 y 6.2.10.

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = 0,472 \leq 1 \quad (9.9)$$

Comprobación de la estructura

Viga 4 - I 1000/200/14/16/25/0/H 3 - I 600/200/0/2/16/21/0/H L: 15.818 m										
15.818 ±		SP1	C056		0.05 ✓	SP1100.00	Comprobación de la sección Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3			
3.007		SP1	C0107		0.044 ✓	SP2100.00	Comprobación de la sección Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4			
1.981	1	SP1	C0105		0.058 ✓	SP2100.00	Comprobación de la sección Torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7			
3.007		SP1	C0101		0.050 ✓	SP3100.01	Comprobación de la sección Contante en el eje z según EN 1993-1-1, 6.2.7(9) Cálculo plástico			
13.842		SP1	C056		0.010 ✓	SP3200.01	Comprobación de la sección Contante en el eje y y torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7(9) Cálculo plástico			
3.007	11	SP1	C0111		0.155 ✓	SP3400.01	Comprobación de la sección Contante y torsión según EN 1993-1-1, 6.2.6(4) y 6.2.7(9) Cálculo elástico			
3.960 1	11	SP1	C09		0.116 ✓	SP3400.02	Comprobación de la sección Contante según EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Cálculo elástico			
3.007		SP1	C0107		0.372 ✓	SP4100.03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje y según EN 1993-1-1, 6.2.5 Cálculo plástico			
13.842		SP1	C056		0.035 ✓	SP5100.03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje z según EN 1993-1-1, 6.2.5 Cálculo plástico			
1.981	14	SP1	C0105		0.448 ✓	SP6100.00	Comprobación de la sección Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.1(5) Cálculo elástico			
15.818 ±	8	SP1	C067		0.472 ✓	SP6200.00	Comprobación de la sección Flexión, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Cálculo elástico			
13.842		SP1	C056		0.039 ✓	SP6500.01	Comprobación de la sección Flexión biaxial, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico			
3.007		SP1	C0107		0.372 ✓	SP6500.02	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje y, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico			
0.000 ±		SP2	C0148		0.000 ✓	SE0100.00	Estado límite de servicio Flechas insignificantes			
9.889		SP2	C0154		0.305 ✓	SE1100.00	Estado límite de servicio Flechas en dirección z			
7.909		SP2	C0215		0.000 ✓	SE1200.00	Estado límite de servicio Flechas en dirección z			
0.000 ±		SP1	C01	No calculable ❌		SP3500.00	Comprobación de la sección Abolladura por cortante según EN 1993-1-5, 5.1, 5.2, 5.3 y 5.5			
		SP1	C01	No calculable ❌		ER3100.00	Error El método general según EN 1993-1-1, 6.3.4 no es aplicable para flexión respecto al eje z			

Figura 9.2. Comprobación de Dinteles-RFEM

Pudiendo ver las especificaciones de la misma en en Anexo 2 apartado 13.39.

9.1.3. Correas

En cuanto a las correas, se repite una comprobación característica de todos los elementos, comprobación a elasticidad.(Anexo 2, apartado 13.40).

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \frac{1}{\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \frac{1}{\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \frac{1}{\gamma_{M0}}\right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \frac{1}{\gamma_{M0}}\right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \frac{1}{\gamma_{M0}}\right)^2 = 0,767 \leq 1 \quad (9.10)$$

Viga 5 - IPE 160 L: 5.000 m										
2.778		SP1	C067		0.082 ✓	SP1200.00	Comprobación de la sección Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4			
1.500	1	SP1	C056		0.039 ✓	SP2100.00	Comprobación de la sección Torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7			
5.000 ±		SP1	C015		0.058 ✓	SP3100.01	Comprobación de la sección Cortante en el eje z y torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7(9) Cálculo plástico			
		SP1	C09		0.064 ✓	SP3100.02	Comprobación de la sección Cortante en el eje z según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) Cálculo plástico			
0.500		SP1	C056		0.011 ✓	SP3200.01	Comprobación de la sección Cortante en el eje y y torsión según EN 1993-1-1, 6.2.7(9) Cálculo plástico			
		SP1	C068		0.010 ✓	SP3200.02	Comprobación de la sección Cortante en el eje y según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) Cálculo plástico			
0.000 ±		SP1	C01		0.000 ✓	SP3500.00	Comprobación de la sección Abolladura por cortante según EN 1993-1-5, 5.1, 5.2, 5.3 y 5.5			
5.000 ±		SP1	C013		0.292 ✓	SP4100.03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje y según EN 1993-1-1, 6.2.5 Cálculo plástico			
		SP1	C056		0.277 ✓	SP5100.03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje z según EN 1993-1-1, 6.2.5 Cálculo plástico			
1		SP1	C056		0.767 ✓	SP6100.00	Comprobación de la sección Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.1(5) Cálculo elástico			
		SP1	C056		0.328 ✓	SP6500.01	Comprobación de la sección Flexión biaxial, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico			
1.667 1		SP1	C034		0.152 ✓	SP6500.02	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje y, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico			
2.500 1		SP1	C0148		0.092 ✓	SP6500.03	Comprobación de la sección Flexión respecto al eje z, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 Cálculo plástico			
0.000 ±		SP2	C0149		0.000 ✓	SE0100.00	Estado límite de servicio Flechas insignificantes			
2.222		SP2	C0191		0.369 ✓	SE1100.00	Estado límite de servicio Flechas en dirección z			
2.500 1		SP2	C0204		0.443 ✓	SE1200.00	Estado límite de servicio Flechas en dirección z			

Figura 9.3. Comprobación de Correas-RFEM

9.2. Comprobación Estado Límite de Servicio

En el caso de este proyecto, se escogerá un límite de deformación de L/300. En la figura 9.4 se puede demostrar como este proyecto cumple con la condición nombrada,es decir:

$$deformacion \leq \frac{L}{300} \quad (9.11)$$

$$68,1 \leq 100 \quad (9.12)$$

siendo L=30 m = 30000 mm

Por lo tanto se puede concluir que la estructura cumple a flexión.

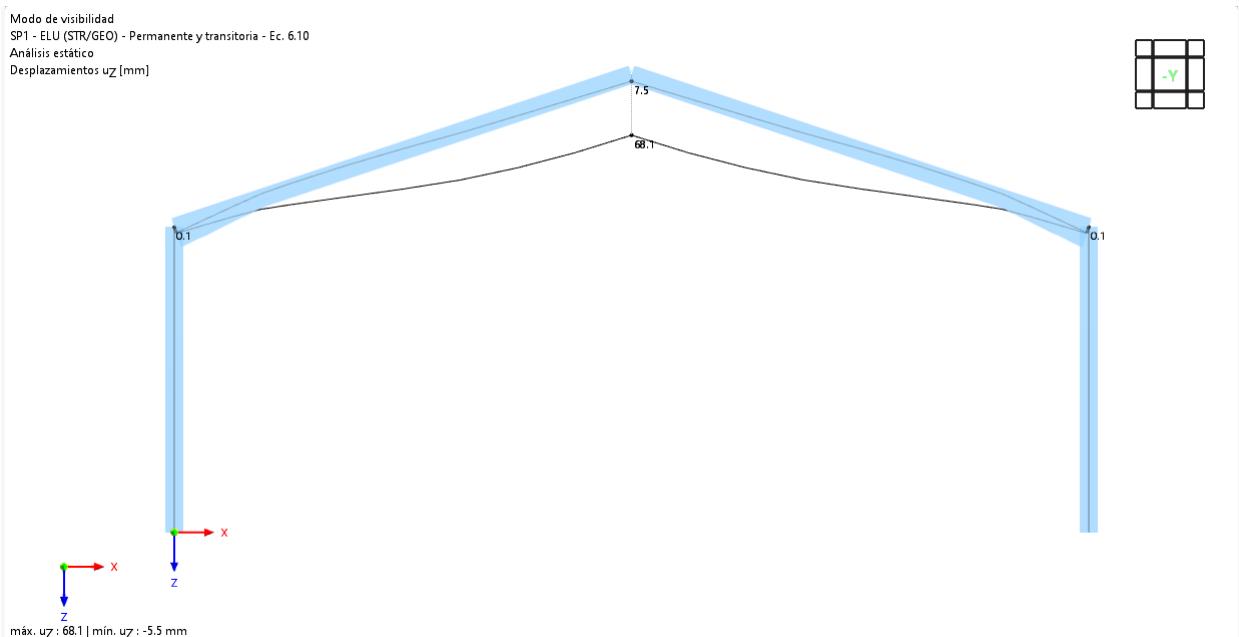


Figura 9.4. Valor de Cálculo de deflexión en RFEM

10 Cálculo de Uniones

Las uniones metálicas son elementos fundamentales en estructuras de acero, ya que conectan diferentes componentes estructurales como vigas, columnas y otros elementos. El diseño y cálculo de estas uniones deben asegurar que la estructura en su totalidad tenga un comportamiento adecuado bajo las cargas previstas.

Existen varios métodos de unión, siendo los más empleados en la actualidad:

- Uniones soldadas.
- Uniones atornilladas.

- **Uniones Soldadas:** En este tipo de unión, dos metales con una composición idéntica o similar se unen mediante la acción del calor, ya sea directamente o mediante la adición de otro metal con una composición similar. Las uniones soldadas son el tipo más comúnmente utilizado en la mayoría de las conexiones de estructuras metálicas realizadas en taller.
- **Uniones Atornilladas:** Las uniones atornilladas se utilizan principalmente en construcciones desmontables y uniones provisionales. Actualmente, hay una tendencia creciente a utilizarlas en uniones ejecutadas en obra.

En el caso de este proyecto se ha realizado dos uniones tipo, una para la cumbre y otro para los pilares y dinteles. Dichas uniones constarán tanto de soldadura como tornillos.

10.0.1. Unión en Cumbre

Se ha realizado una unión (10.1) formada por placa, tornillo y soldadura donde se han verificado las comprobaciones que aparecen en la siguiente imagen 10.2.

En las Figuras 10.3 y 10.4 se encuentra los valores de los componentes de la unión así como el tamaño de soldadura.

Comprobación de la placa

Se comprueba la verificación del estado límite último para placas, basada en las deformaciones plásticas equivalentes. Para ello se sigue la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\varepsilon_{p-Mises}}{\varepsilon_{p-limit}} \quad (10.1)$$

siendo:

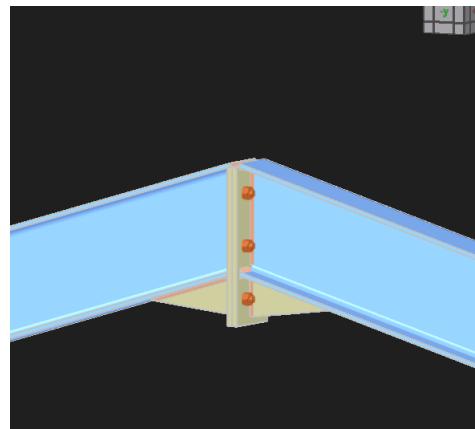


Figura 10.1. Unión en Cumbreña

1	Nudos : 5							
5	Placa	Barra 1 Ala 1	SP1	CO1	0.000 ✓	UL1000 .00	Estado límite último Comprobación de placas	
	Medio de fijación	Unión de chapas entre sí 1 Grupo...	SP1	CO1	0.021 ✓	UL1100 .00	Estado límite último Comprobación de tornillos	
	Soldadura	Unión de chapas entre sí 1 Corte ...	SP1	CO1	0.069 ✓	UL1200 .00	Estado límite último Comprobación de la soldadura en ángulo	

Figura 10.2. Comprobaciones en Unión Cumbreña- RFEM

The screenshot shows the RFEM software interface with the 'Cartela' configuration dialog open. The dialog is divided into several sections:

- General:** Shows 'Corte de barra' and 'Cartela' selected in the tree view.
- Cartela 1:** Contains settings for 'Rigidizadores' (Rigidizers).
- Configuración de componentes (Components Configuration):**
 - Chapa (Plate):** Material: S275JR | Isótropo | Elástico lineal, Thickness: 10.0 mm, Position: Inferior, Orientation: Inclinada.
 - Ala (Flange):** Material: S275JR | Isótropo | Elástico lineal, Thickness: 10.0 mm, Width: 100.0 mm.
 - Soldaduras (Welds):** Lists various weld types and parameters for both the plate and flange.

Figura 10.3. Componentes cartela Unión Cumbreña- RFEM

The screenshot shows the RFEM software interface with the 'Chapa fronta' configuration dialog open. The dialog is divided into several sections:

- Configuración de componentes (Components Configuration):**
 - Chapa fronta (Front Plate):** Material: S275JR | Isótropo | Elástico lineal, Thickness: 20.0 mm.
 - Desviaciones (Deviations):** Superior deviation: Δcup = 10.0 mm, Inferior deviation: Δinf = 280.0 mm, Left deviation: Δizq = 5.0 mm, Right deviation: Δder = 5.0 mm.
- Tornillos (Screws):** Lists screw types and dimensions: M16 x 8.8, 2 screws at 40.0 80.0 40.0 mm, 4 screws at 65.0 50.0 300.0 170.0 mm.
- Soldaduras (Welds):** Lists weld types and parameters for the plate: Ala 1, Ala 2, Alma.

Figura 10.4. Componentes de Chapa en Unión Cumbreña- RFEM

e_p Mises: Es la deformación plástica equivalente máxima, también conocida como deformación plástica de von Mises. Representa el valor máximo de deformación plástica que el material

ha experimentado.

e_{plimit} : Es la deformación plástica equivalente límite, que es el valor máximo permitido de deformación plástica según las especificaciones del diseño o el código de normas aplicable.

Comprobación de tornillos

Según la tabla 3.4 del apartado 3.6 del EN 1993-1-8, se encuentras las verificaciones a comprobar en cuanto a tornillos así como la resistencia a cortante, aplastamiento, tracción y resistencia a punzonamiento. Figura 10.5.

Los tornillos de la siguiente unión obtienen los siguientes resultados:

- Resistencia a cortante $0 \leq 1$.
- Resistencia al aplastamiento $0 \leq 1$.
- Resistencia a tracción $0.021 \leq 1$.
- Resistencia al punzonamiento $0.01 \leq 1$.
- Resistencia a cortante y tracción combinadas $0.021 \leq 1$.

En el Anexo 3 13.42 se verifica el seguimiento del mismo.

Comprobación de soldadura

Para la comprobación de la soldadura, se sigue el procedimiento del apartado 4.5.3.2 del Eurocódigo 1993 1.8.

$$[\sigma_1^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{y} \quad \sigma_1 \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (10.2)$$

donde:

f_u es la resistencia nominal última a tracción de la parte más débil de la unión

β_w es el coeficiente de correlación correspondiente tomado de la tabla 4.1.

Obteniendo un resultado de 0.069 siendo mucho menor que 1.

10.0.2. Unión en Pilares

Se ha realizado una unión (10.7 formada por placa, tornillo y soldadura donde se han verificado las comprobaciones que aparecen en la siguiente figura 10.8.

Modo de fallo	Tornillos	Remaches
Resistencia a cortante por el plano de cortante	$F_{v,Rd} = \frac{a_v f_{ub} A}{\gamma_M 2}$ <ul style="list-style-type: none"> - cuando el plano de cortante pasa por la parte roscada del tornillo (A es el área traccionada del tornillo A_s): - para las clases 4.6, 5.6 y 8.8: $a_v = 0,6$ - para las clases 4.8, 5.8, 6.8 y 10.9: $a_v = 0,5$ <ul style="list-style-type: none"> - cuando el plano de cortante pasa por la parte no roscada del tornillo (A es el área bruta de la sección transversal del tornillo): $a_v = 0,6$ 	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_M 2}$
Resistencia a aplastamiento ^{1), 2), 3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_M 2}$ <p>donde a_b es el menor de $a_d \frac{f_{ub}}{f_u}$ o 1,0;</p> <p>En la dirección de transmisión de la carga:</p> <ul style="list-style-type: none"> - para tornillos de extremo: $a_d = \frac{e_1}{3d_0}$; para tornillos interiores: $a_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ <p>En la dirección perpendicular a la transmisión de la carga:</p> <ul style="list-style-type: none"> - para tornillos de borde: k_1 es el menor de $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$, $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ y 2,5 - para tornillos interiores: k_1 es el menor de $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ o 2,5 	
Resistencia a tracción ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_M 2}$ <p>donde $k_2 = 0,63$ para tornillos de cabeza avellanada, en otros casos $k_2 = 0,9$.</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_M 2}$
Resistencia a punzonamiento	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_M 2$	Comprobación no necesaria
Cortante y tracción combinadas	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

Figura 10.5. Resistencia de cálculo para elementos de fijación individuales. Tabla 3.4, EN 1993 1-8.

Normas y tipos de acero			Coeficiente de correlación β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

Figura 10.6. Coeficiente de correlación β_w para soldaduras en ángulo. Tabla 4.1, EN 1993 1-8.

Comprobación de la placa

Se vuelve a hacer una comprobación a placa con en la anterior obteniendo:

$$\eta = \frac{\varepsilon_{p-Mises}}{\varepsilon_{p-limit}} = 0 \leq 1. \quad (10.3)$$

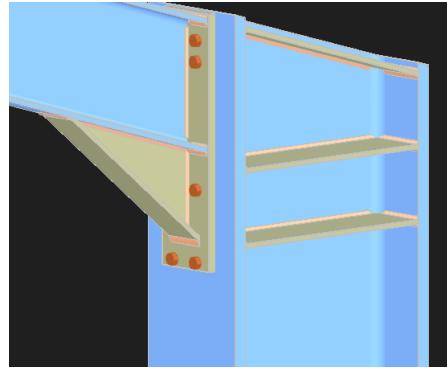


Figura 10.7. Unión en Pilar

2	Nudos : 4							
4	Placa	Barra 1 Ala 1	SP1	CO1	0.000	✓	ULL1000..00	Estado límite último Comprobación de placas
	Medio de fijación	Chapa frontal 1 Grupo de tornillo...	SP1	CO1	0.972	✓	ULL101..00	Estado límite último Comprobación de tornillos pretensados
	Soldadura	Chapa frontal 1 Soldadura 2	SP1	CO1	0.186	✓	ULL1200..00	Estado límite último Comprobación de la soldadura en ángulo

Figura 10.8. Comprobaciones en Unión Pilar- RFEM

Datos principales Barras Componentes Comprobación plausible

Componentes

Tipo de componente	Nombre del componente
Rigidizador	Rigidizador 1
Chapa frontal	Chapa frontal 1
Corte de barra	Corte de barra 2
Cartela	Cartela 1
Rigidizador	Rigidizador 2
Rigidizador	Rigidizador 3

Configuración de componentes

Material de la chapa	t	Cartela 1
1 - S275JR Isótropo Elástico lineal	10.0 mm	
Espesor		
Posición		
Alineación de la chapa		
Anchura	b	400.0 mm
Altura	h	200.0 mm
Hendidura de barra extendida	Δe	0.0 mm
Hendidura de referencia	Δr	0.0 mm
Bordes con alas		Inclinada

Ala

Material del ala	t _f	Cartela 1
1 - S275JR Isótropo Elástico lineal	10.0 mm	
Espesor		
Anchura	b _f	100.0 mm

Soldaduras

Chapa para barra extendida	a _{w,p1}	1 - S275JR...	5.0 mm
Chapa para referencia	a _{w,p2}	1 - S275JR...	5.0 mm
Chapa para ala	a _{w,p3}	1 - S275JR...	5.0 mm
Ala para barra extendida	a _{w,f1}	1 - S275JR...	5.0 mm
Ala para referencia	a _{w,f2}	1 - S275JR...	5.0 mm

Figura 10.9. Componentes Cartela en Unión Pilar- RFEM

Viendose en el Anexo 3, apartado 13.44.

Comprobación de tornillos

En esta sección se hace de nueva la comprobación obteniendo:

- Resistencia a cortante $0.004 \leq 1$.
- Resistencia al aplastamiento $0.004 \leq 1$.
- Resistencia a tracción $0.972 \leq 1$.
- Resistencia al punzonamiento $0.273 \leq 1$.

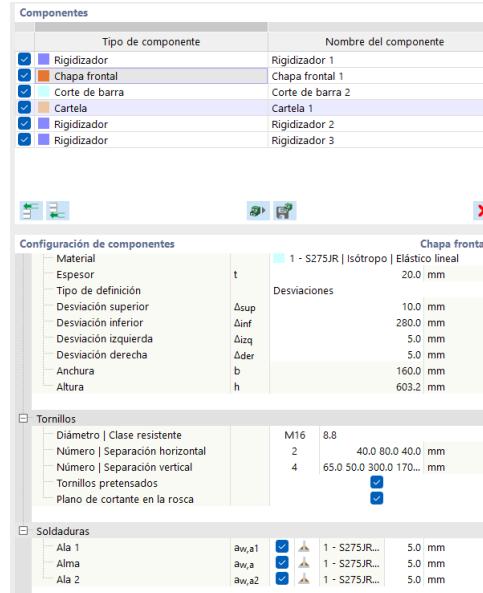


Figura 10.10. Componentes Chapa en Unión Pilar- RFEM

- Resistencia a deslizamiento $0.055 \leq 1$.

Dicha comprobación podría obtener un rendimiento menor en la resistencia a tracción pero se ha resuelto como un cálculo académico, en el mundo real es conveniente reducir dicho valor.

Puede verse el seguimiento de cálculo en el Anexo 3, apartado 13.45.

Comprobación de soldadura

Se realiza la misma comprobación que en la ecuación 10.2 obteniendo un resultado de $0.186 \leq 1$. Anexo 3, apartado 10.2

11 Cálculo de la Cimentación

En el proceso de cálculo de la cimentación del Hangar, hemos utilizado herramientas específicas para asegurar la precisión y eficiencia en el diseño. Aunque RFEM 6 es una herramienta potente para muchos aspectos del análisis estructural, actualmente no está totalmente preparado para el cálculo de cimentaciones. Por esta razón, se ha optado por realizar este cálculo utilizando Cype, que ofrece capacidades avanzadas y específicas para esta tarea. Este enfoque combinado nos permite aprovechar las fortalezas de cada software, asegurando un análisis estructural completo y preciso, y un diseño de cimentación optimizado y seguro.

Pasos Realizados:

1. Obtención de Reacciones de los Apoyos: - Se han calculado las reacciones de los apoyos del Hangar utilizando RFEM 6. Esta fase del análisis estructural nos permite determinar las fuerzas y momentos que actúan sobre los puntos de apoyo de la estructura.
 2. Transferencia de Datos a Cype: - Las reacciones obtenidas en RFEM 6 se han transferido a Cype. Este proceso asegura que los datos del análisis estructural inicial se utilicen directamente en el cálculo de la cimentación.
 3. Cálculo de la Cimentación en Cype: - En Cype, se ha llevado a cabo el diseño detallado de la cimentación. En la opción Introducción-Entrada de Pilares-Nuevo Arranque (11.1) se le asigna las características del mismo. Luego, en la sección de Pilares-Cargas en Cabeza, se le asigna las reacciones calculadas en RFEM 6. Estas reacciones se han dividido por 1.5 ya que RFEM 6 da las cargas mayoradas (11.2 y 11.3).



Figura 11.1. Introducción-Entrada de Pilares- CYPE

Se han calculado dos zapatas tipo, una para las zapatas donde se harán las juntas de dilatación y otras para el resto del hangar. En la Figura 11.4 se puede ver la distribución de las mismas.

Ademas, se ha llevado a cabo una comprobación de la cimentación incluyendo vigas centradoras. Al ser la distancia entre zapatas de 30 metros, se procede a realizar pozos de hormigón. Los pozos de hormigón han sido dimensionados para complementar la función de una viga centradora proporcionando soporte y garantizando la transferencia de cargas de manera eficaz. En la Figura 11.5 se puede ver como se llevaría a cabo el proceso constructivo de las mismas.

Al comparar las dimensiones de zapatas sin pozo y con pozo, se ha llegado a la conclusión que es una diferencia mínima, por tanto se procederá a una cimentación sin pozos siendo así más eficiente en términos de material y coste.

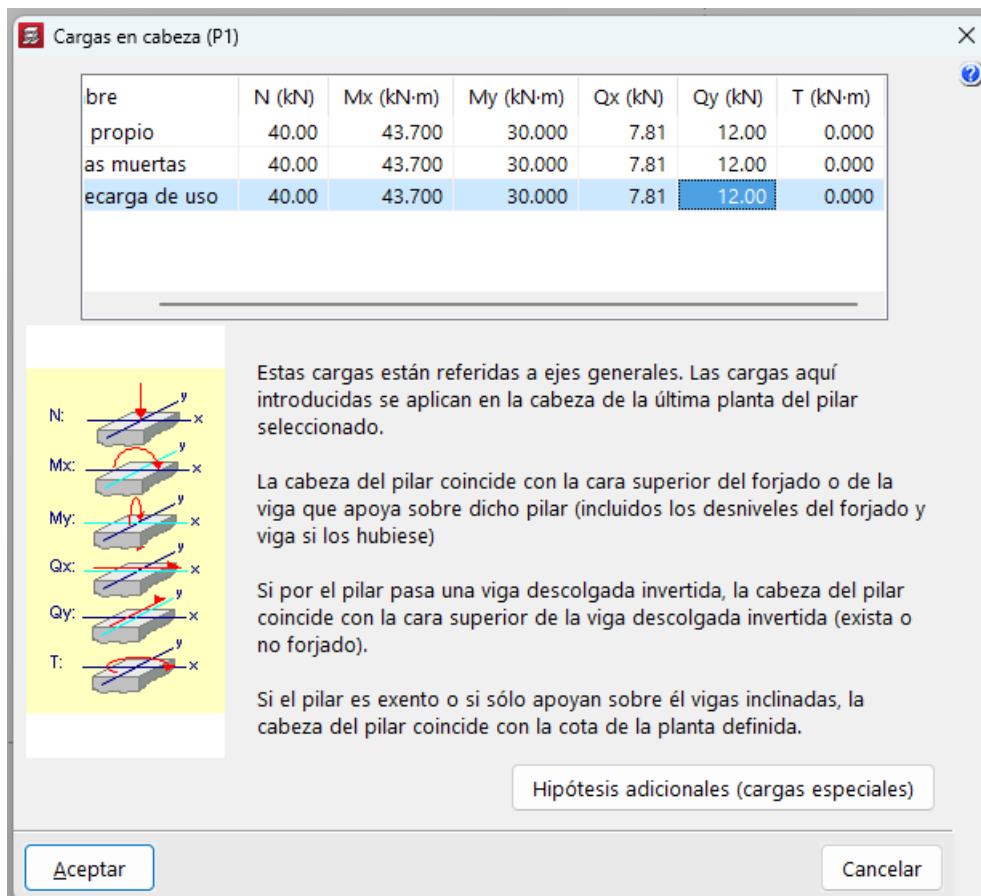


Figura 11.2. Reacciones Primer Pórtico- RFEM

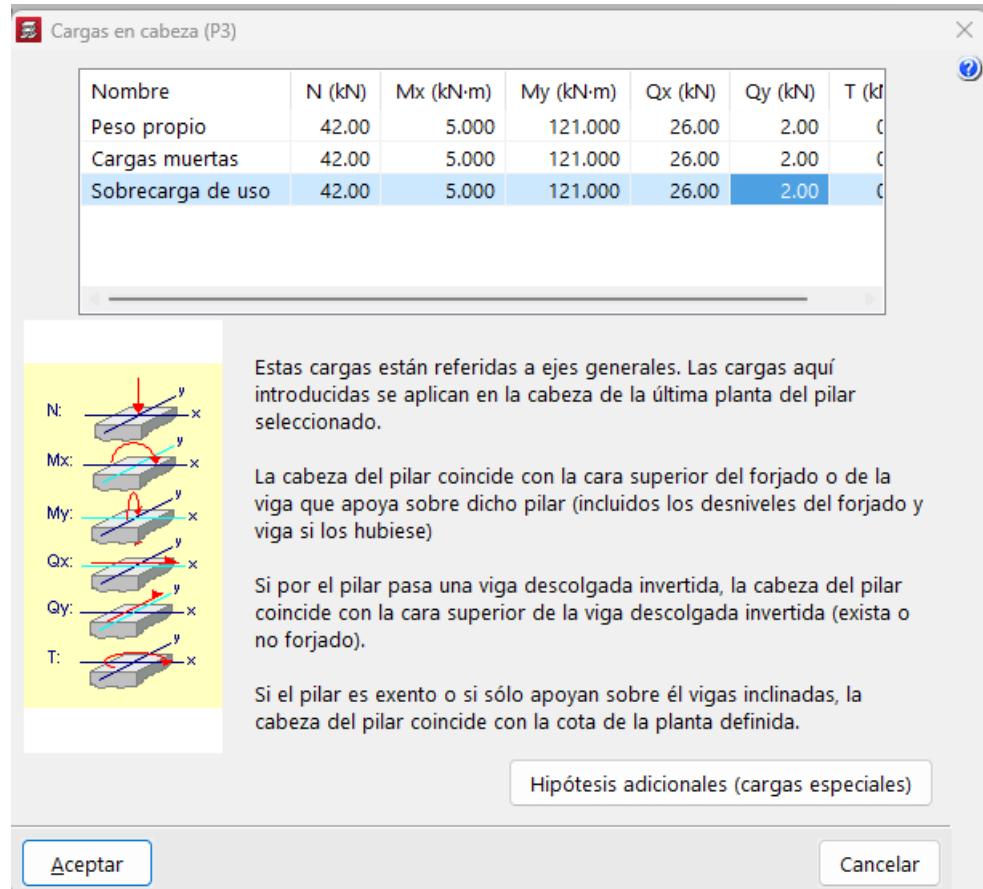


Figura 11.3. Reacciones Pórtico Medio- RFEM

CUADRO DE ELEMENTOS DE CIMENTACIÓN						
Referencias	Dimensiones (cm)	Canto (cm)	Armado inf. X	Armado inf. Y	Armado sup. X	Armado sup. Y
P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P14, P15, P16, P17, P21, P22, P23, P24, P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37 y P38	310x310	70	15Ø16c/20	15Ø16c/20	15Ø16c/20	15Ø16c/20
P13-P19 y P18-P20	340x375	75	18Ø16c/20	16Ø16c/20	18Ø16c/20	16Ø16c/20

Figura 11.4. Dimensiones y elementos de Cimentación- Cype

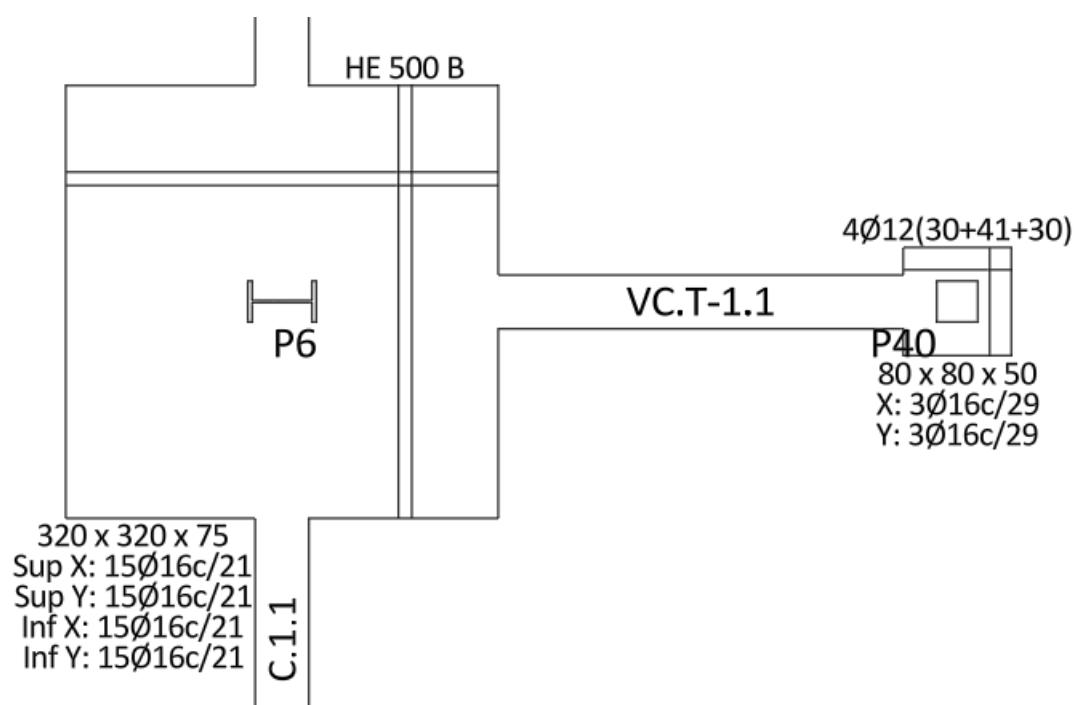


Figura 11.5. Proceso constructivo de zapatas con pozos-Cype

12 Conclusión

En conclusión, el cálculo de estabilidad del hangar, junto con el análisis de uniones y cimentación, ha sido detallado, asegurando un diseño seguro. La combinación de diferentes herramientas de software, como RFEM 6 y Cype, ha permitido un enfoque preciso en cada etapa del proceso.

El análisis de estabilidad del hangar ha sido crucial para asegurar que la estructura puede soportar todas las cargas previstas, incluidas las fuerzas de viento y otros factores. Utilizando RFEM 6, se han obtenido las reacciones de los apoyos, determinando las fuerzas y momentos en cada punto de la estructura.

Las uniones han sido diseñadas y verificadas para asegurar que cada conexión dentro de la estructura del hangar sea capaz de transmitir las fuerzas de manera eficiente y segura. Este análisis detallado ha sido fundamental para evitar puntos débiles en la estructura que podrían comprometer su estabilidad.

El cálculo de la cimentación ha sido realizado utilizando Cype, que ofrece capacidades avanzadas específicas para esta tarea. Se ha llevado a cabo un diseño detallado, considerando tanto las zapatas con juntas de dilatación como las del resto del hangar. La inclusión de pozos de hormigón fue evaluada y, tras un análisis comparativo, se decidió no utilizarlos para optimizar el uso de materiales sin comprometer la seguridad.

Entre los aprendizajes más importantes del proyecto se destaca el uso de herramientas especializadas. La combinación de RFEM 6 para el análisis estructural y Cype para el diseño de cimentaciones ha demostrado ser una estrategia efectiva para aprovechar las fortalezas de cada software. La optimización de recursos ha permitido tomar decisiones informadas que reducen costos y materiales sin comprometer la seguridad estructural. Finalmente, la integración de diferentes tipos de análisis (estabilidad, uniones y cimentación) a asegurado que todos los elementos funcionen en conjunto para proporcionar una estructura segura.

En resumen, el proceso ha dado como resultado un diseño de hangar que es seguro y eficiente, dando como resultado final el siguiente hangar:

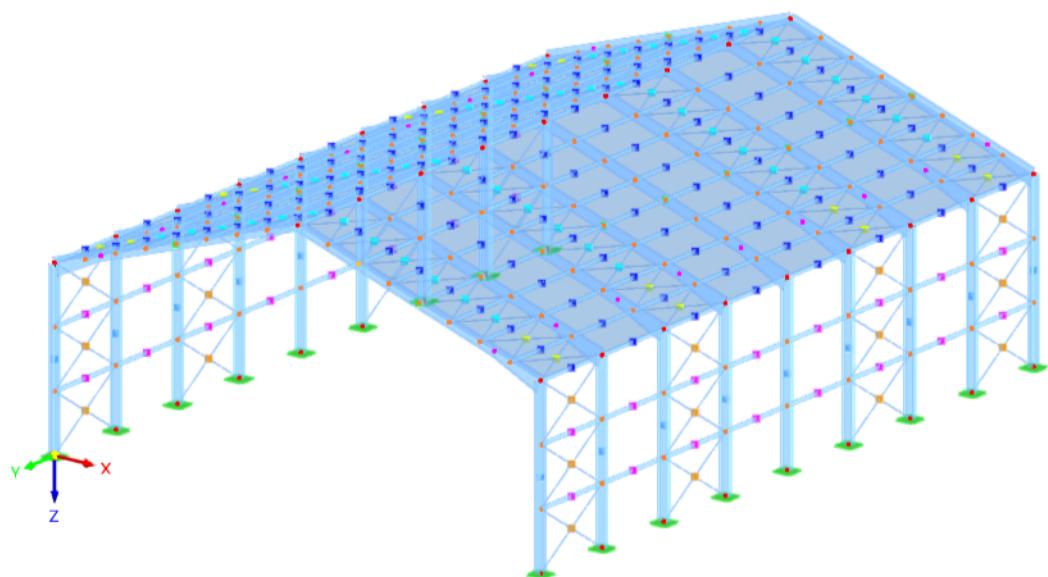


Figura 12.1. Resolución Hangar 40 m -RFEM

13 Anexo

13.1. Anexo 1: Manual RFEM

Este anexo tiene como objetivo proporcionar una visión general sobre el uso de RFEM en el contexto del análisis y diseño de estructuras, destacando sus capacidades, ventajas y aplicaciones específicas en el diseño de un hangar, conforme a las normativas del Eurocódigo.

13.1.1. Datos generales

En este apartado, se describe la obra y el fichero donde se guardarán dichas pruebas. Tam-

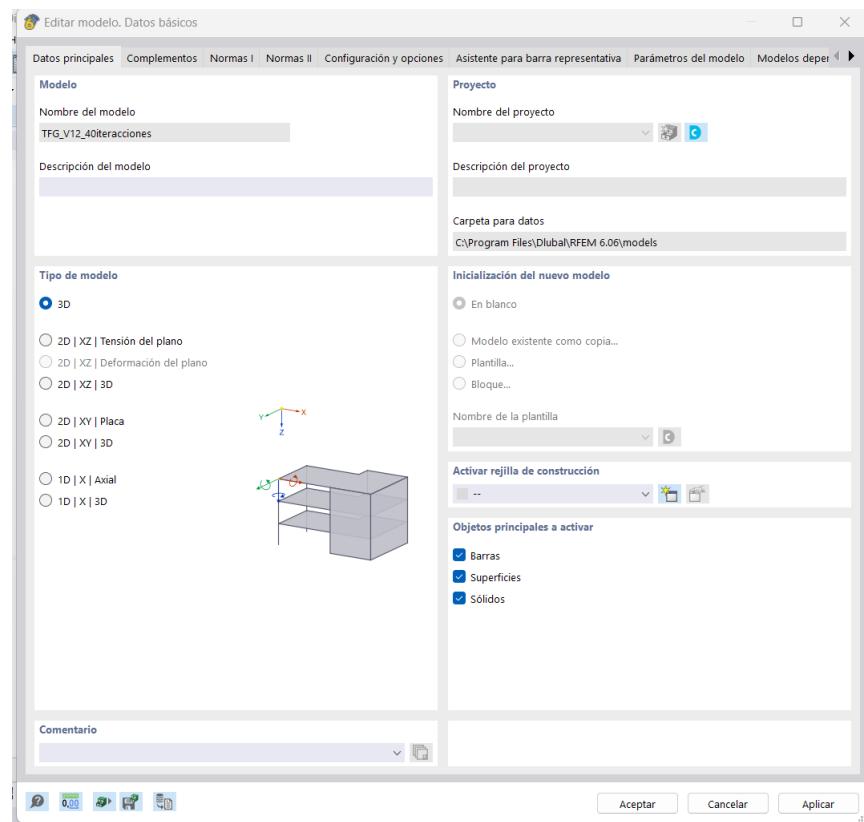


Figura 13.1. Datos generales

bien se especificaran los cálculos que se quiere realizar, en el caso del proyecto del hangar se necesitarán los complementos subrayados en la figura 13.2. Luego se especificarán las normas a

usar, parámetros de modelo, configuraciones...

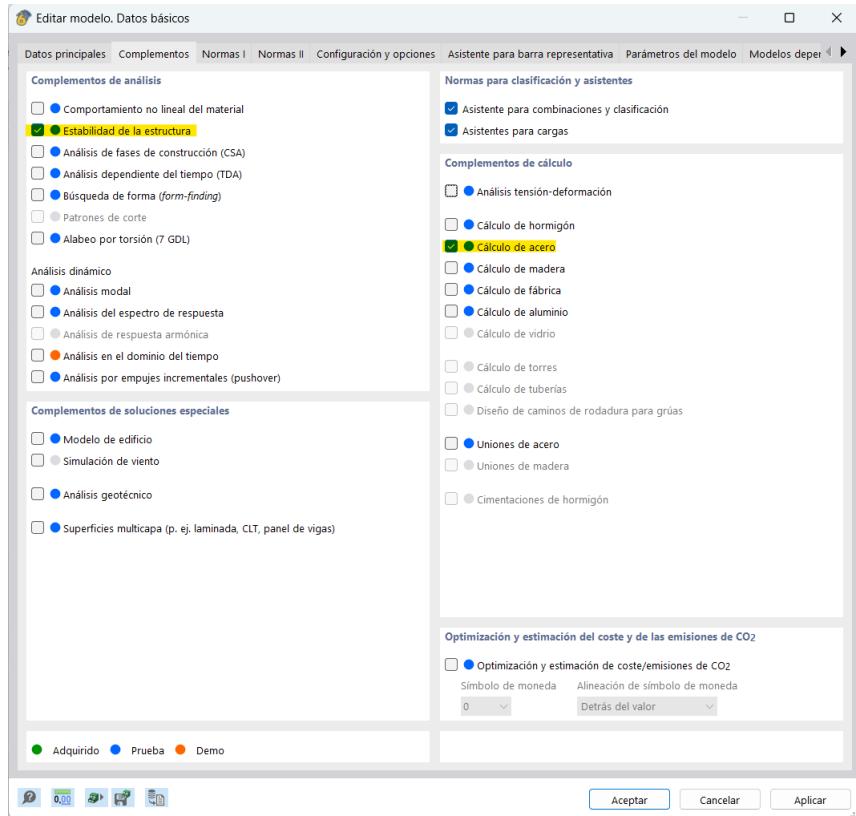


Figura 13.2. Datos generales-Complementos

Una de las secciones mas usadas a lo largo de la creacion de cualquier modelo es el Navegador de Datos que se encontrará en la parte izquierda del programa, en cualquier caso puede editarse y posicionarlo en dicho lugar.

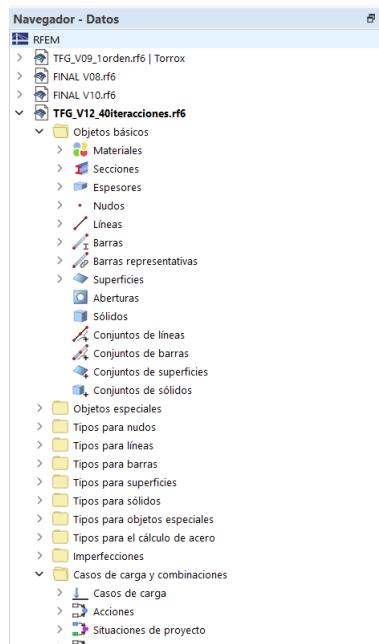


Figura 13.3. Navegador de Datos - RFEM

13.1.2. Creacion de materiales

Dicho programa te da la opcion a crear cualquier tipo de material, tanto introduciendo los parámetros manualmente como en la libreria de RFEM.

En este caso, se obtiene por un Acero S275, por lo que lo exportamos de la biblioteca de la siguiente manera.

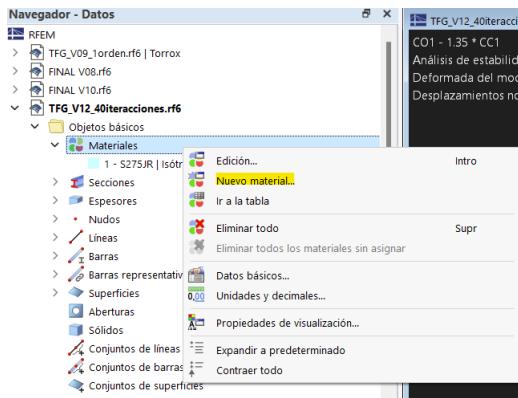


Figura 13.4. Nuevo Material - RFEM

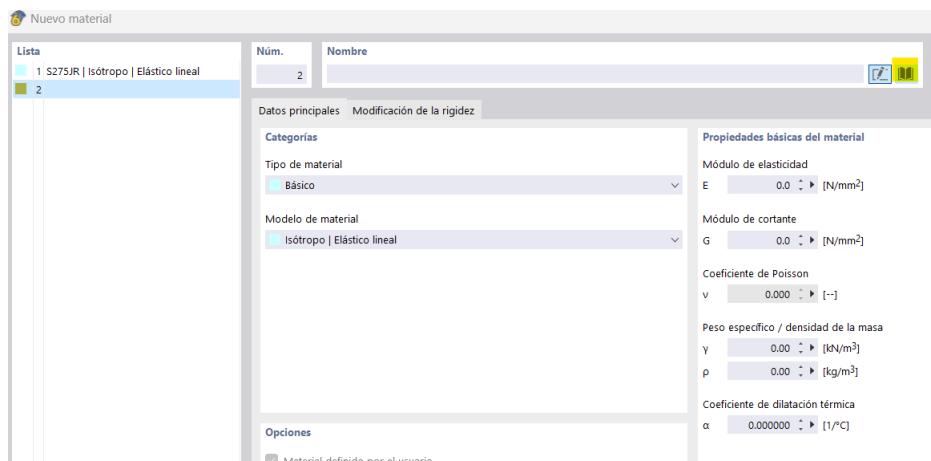


Figura 13.5. Librería de materiales - RFEM

A partir de ahí se seleccionará el tipo de material elegido, ya sea acero, hormigón, madera, etc.

13.1.3. Creacion de tipos de secciones

De la misma metodología que en materiales, nos vamos al apartado de secciones. Al pulsar nueva sección, pinchamos en la libreria de RFEM.

En dicha libreria podemos encontrar una infinidad de secciones, pero ademas al tener la opcion de secciones parametrizadas, se pueden realizar las secciones que le usuario quiera.

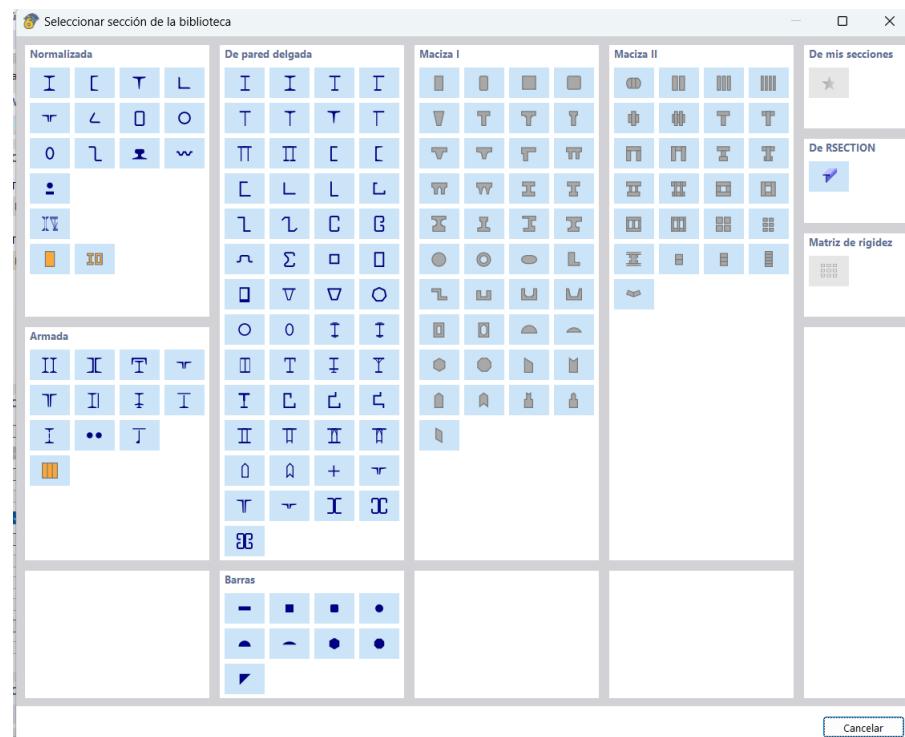


Figura 13.6. Nueva sección - RFEM

Creación de barras

Una vez definido los materiales y las barras, llega el momento de crear nuestro modelo a traves de barras. Para ello volvemos al Navegador de datos pinchando en crear nueva barra.

Como se puede apreciar en la figura 13.7 se puede seleccionar una gran variedad de tipos de barras.

En el apartado de secciones, también se puede encontrar una variedad de tipos.

Creación de cartelas

Una sección caracteristica son las cartelas, para realizarla tan solo hay que elegir la opción de canto variable al inicio de la barra y definir las distitas secciones de las barras como se muestra en la figura 13.8.

Es recomendable que el uso de las secciones sea de perfil delgado y parámetro, como en la figura 13.9, donde con la opción subrraya facilita la exportación de cualquier perfil.

Creación de Cruces de San Andres

Para hacer que una barra se comporte como una cruz de San Andrés, tan solo hay que seleccionar en el tipo de barra la opción Traccionada y elegir un tipo de perfil circular.

Anexo

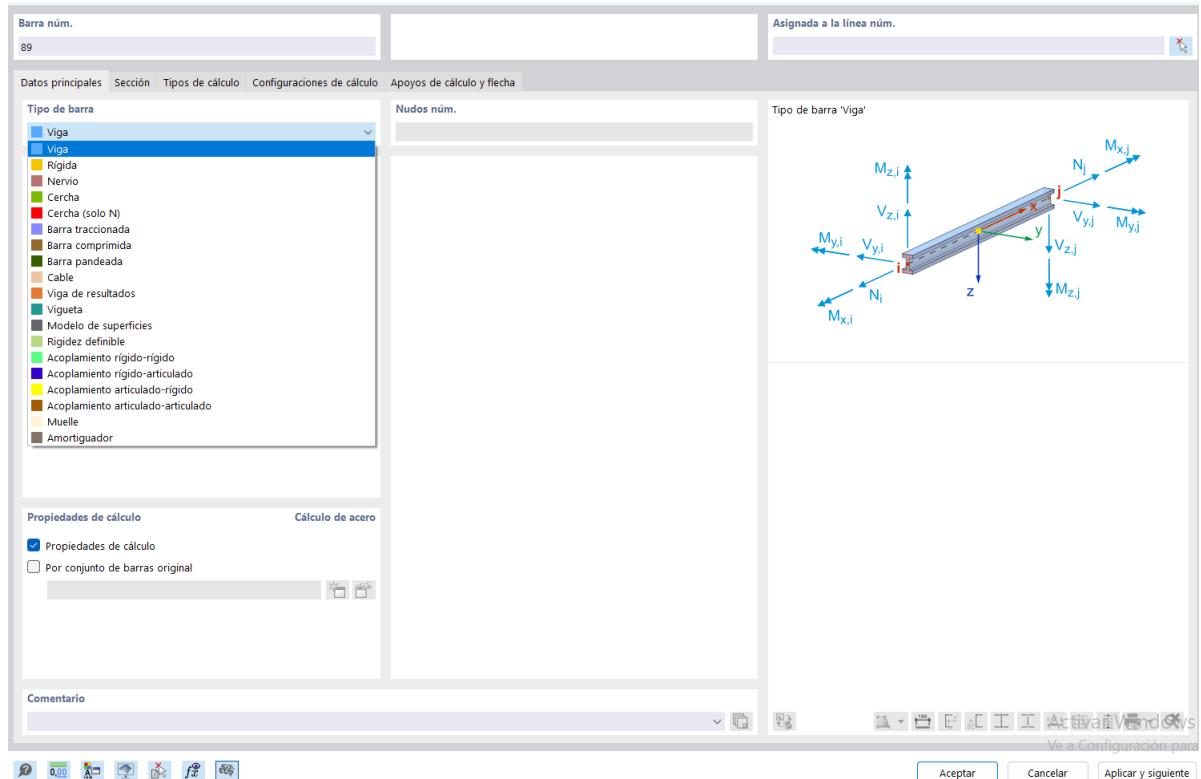


Figura 13.7. Nueva barra- RFEM

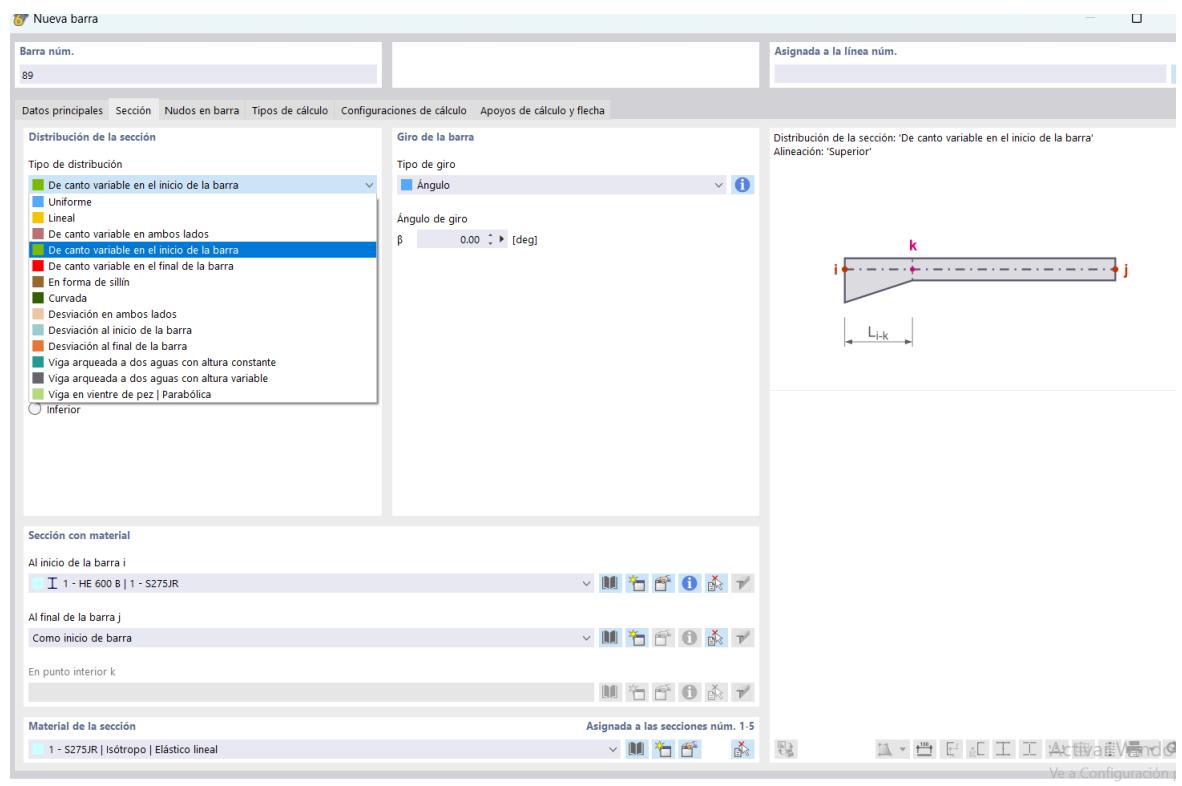


Figura 13.8. Nueva barra- canto variable- RFEM

13.1.4. Tipos de Apoyos

En figura 13.10 vemos como en el icono seleccionado encontramos los apoyos.

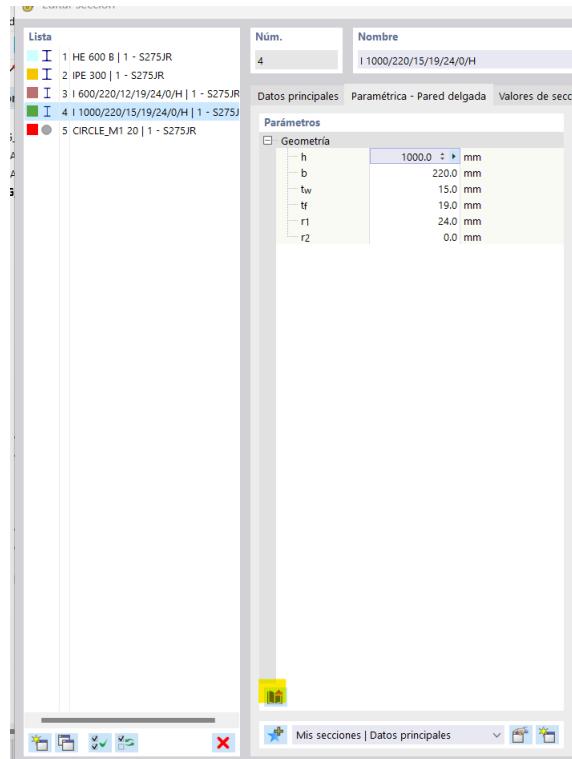


Figura 13.9. Nueva barra- canto variable-sección parametrizada-RFEM

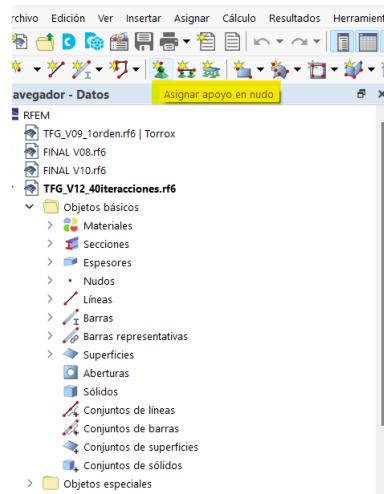


Figura 13.10. Nuevo apoyo-RFEM

Al cliquear en él, se puede encontrar todos los tipos de apoyos, pudiéndose ver en la figura 13.11.

13.1.5. Cálculo de cargas

Para realizar las cargas, primero hay que crear los casos de cargas donde posteriormente se le aplicarán las cargas correspondientes.

En la figura 13.13 encontramos los tipos de casos de carga que se pueden realizar.

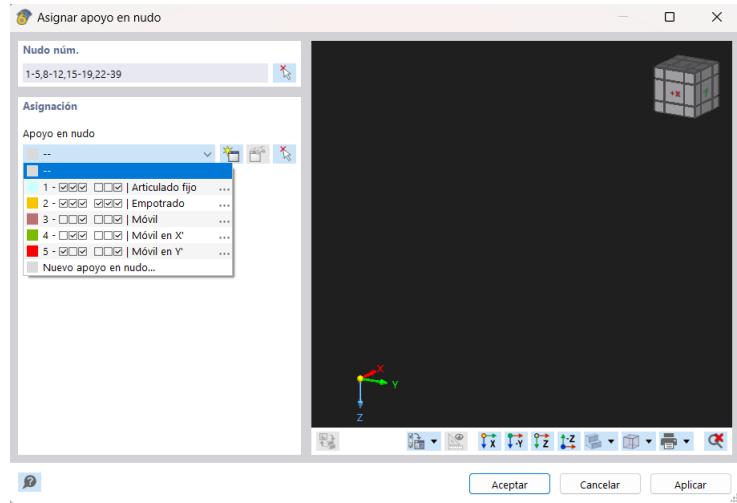


Figura 13.11. Nuevo apoyo-Tipos de apoyos-RFEM

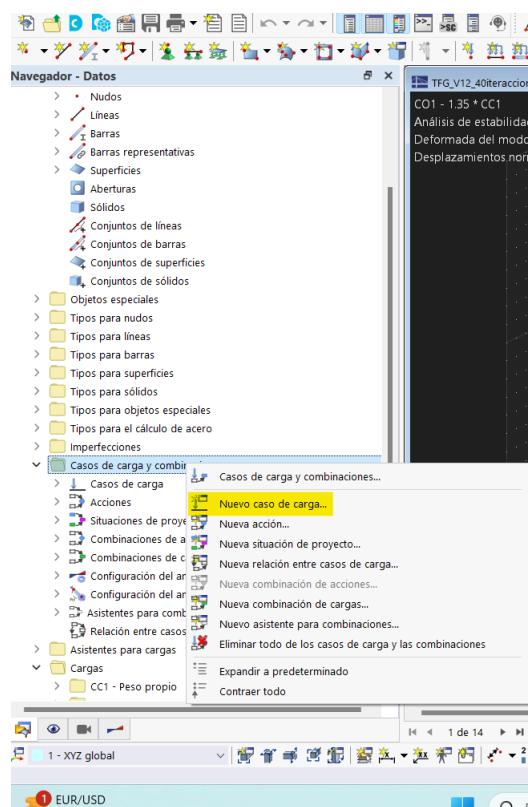


Figura 13.12. Nuevo caso de carga-RFEM

Tras realizar los casos, definimos las cargas.

Peso Propio y Sobrecarga de Uso

Tras crear un caso de carga nombrado como peso propio, se creará una superficie (Figura 13.14) para aplicar así una carga superficial.

Anexo

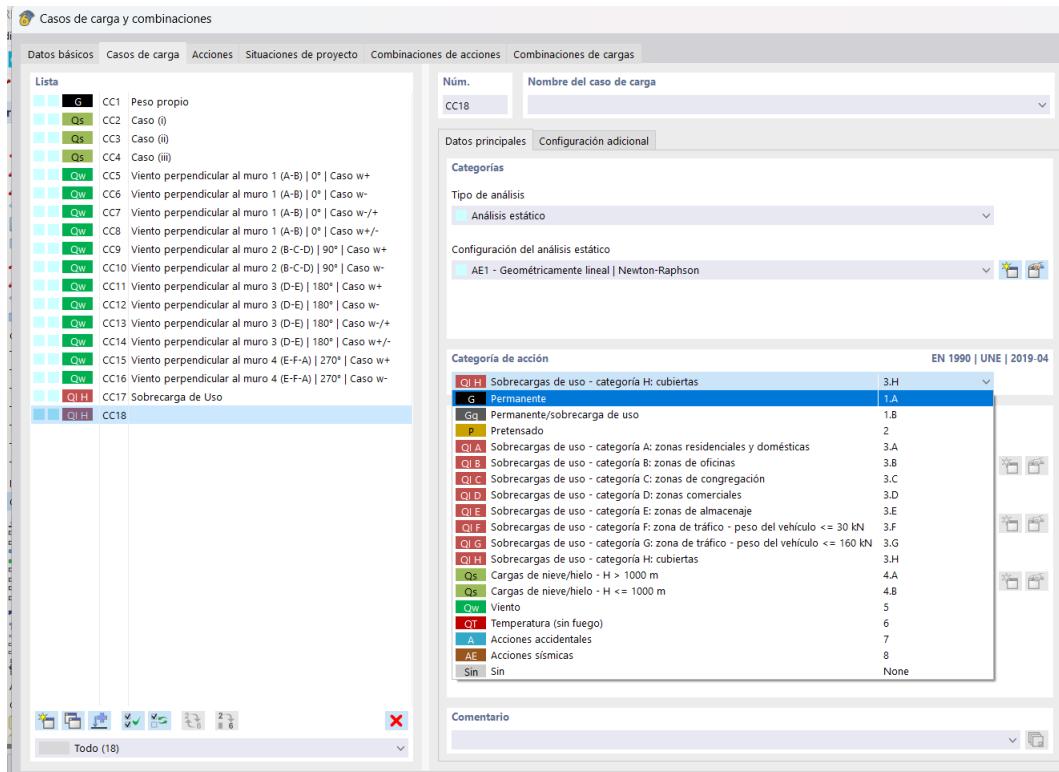


Figura 13.13. Nuevo caso de carga- Tipo de caso- RFEM

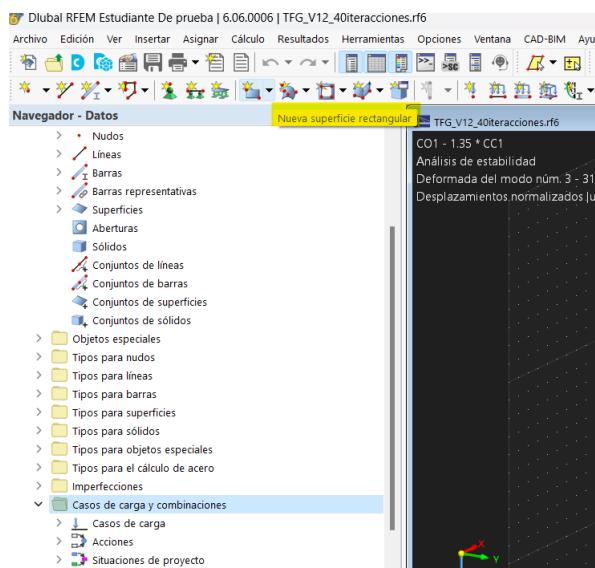


Figura 13.14. Nueva superficie- RFEM

Carga de Viento

Para las cargas de viento, RFEM 6 tiene la opción de un Asistente de cargas automático dependiendo de la zona. Esto se puede encontrar en el Navegador, Figura 13.15.

Luego se elige el tipo de cubierta, Figura 13.16.

Seguidamente en la sección parámetros, se introducen los datos necesarios a introducir de

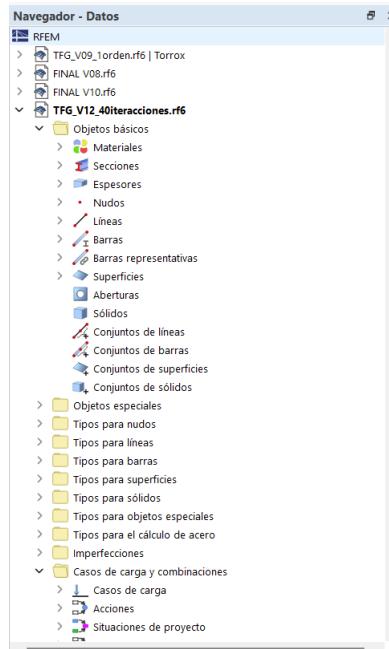


Figura 13.15. Asistente de cargas- RFEM

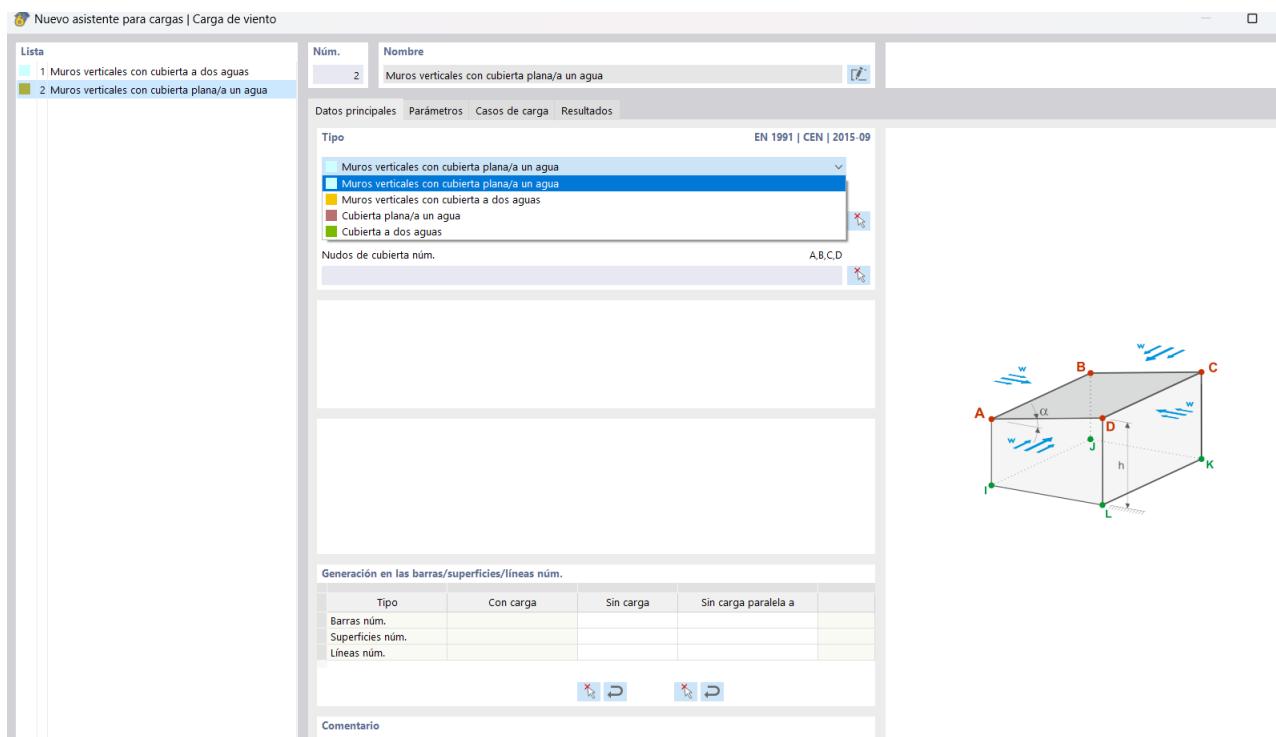


Figura 13.16. Asistente de carga de viento- RFEM

nuestro proyecto, Figura 13.17.

Por último, en la zona de y pinchando en la opción coloreada de la Figura 13.18, el mismo asistente crea los casos de carga para cada una de las opciones posibles de viento.

Anexo

2 Muros verticales con cubierta a dos aguas				
Datos principales	Parámetros	Casos de carga	Resultados	
EN 1991 CEN 2015-09				
Parámetros	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
<input type="checkbox"/> Parámetros	Categoría del terreno		Categoría 0	
	Altura de la estructura	h	-- m	
	Densidad del aire	ρ	1.25 kg/m ³	
<input type="checkbox"/> Velocidad del viento	Velocidad básica fundamental del viento	$v_{b,0}$	20.00	m/s
<input type="checkbox"/> Coeficientes	Coefficiente de orografía	C_o	1.00	--
	Factor direccional	C_{dir}	1.00	--
	Factor estacional	C_{season}	1.00	--
	Factor de turbulencia	k_t	1.00	--
<input type="checkbox"/> Factor del terreno	Definición manual del factor del terreno	k_r	<input type="checkbox"/>	0.00
	Factor del terreno			--
<input type="checkbox"/> Presión correspondiente a la velocidad	Presión de la velocidad básica del viento	q_b	0.00	kN/m ²
<input type="checkbox"/> Tipo de distribución de carga	Tipo de distribución de carga		Trapezoidal	
<input type="checkbox"/> Opciones	Falta de correlación según 7.2.2(3)		<input type="checkbox"/>	
	Bloquear para nuevos objetos		<input type="checkbox"/>	
	Considerar la excentricidad de barra		<input type="checkbox"/>	
	Considerar la distribución de la sección		<input type="checkbox"/>	
	Considerar la presión interna		<input type="checkbox"/>	

Figura 13.17. Parámetros de carga de viento- RFEM

Núm.	Nombre
2	Muros verticales con cubierta a dos aguas
EN 1991 CEN 2015-09	
Datos principales	Parámetros
Generar en casos de carga	Caso de carga
<input type="checkbox"/> Viento perpendicular al muro 1 (A-B) 0.00 deg	<input checked="" type="checkbox"/> Caso w+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w- ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w-/+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w+/+ ??
<input type="checkbox"/> Viento perpendicular al muro 2 (B-C-D) 90.00 deg	<input checked="" type="checkbox"/> Caso w+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w- ??
<input type="checkbox"/> Viento perpendicular al muro 3 (D-E) 180.00 deg	<input checked="" type="checkbox"/> Caso w+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w- ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w-/+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w+/+ ??
<input type="checkbox"/> Viento perpendicular al muro 4 (E-F-A) 270.00 deg	<input checked="" type="checkbox"/> Caso w+ ?? <input checked="" type="checkbox"/> Caso w- ??

Figura 13.18. Parámetros de carga de viento- RFEM

Carga de Nieve

Para el caso de las carga de Nieve, se realiza el mismo proceso que para las cargas de viento, es decir, clicleando en en asistente de cargas pero en este caso de nieve, Figura 13.15.

Cargas Cruces de San Andres

En cuanto a las cruces de San Andres, hay que aplicarle una carga superficial con la opción de Desplazamiento axial y a dicha magnitud de carga se le suele aplicar -1 mm. Figura 13.19.

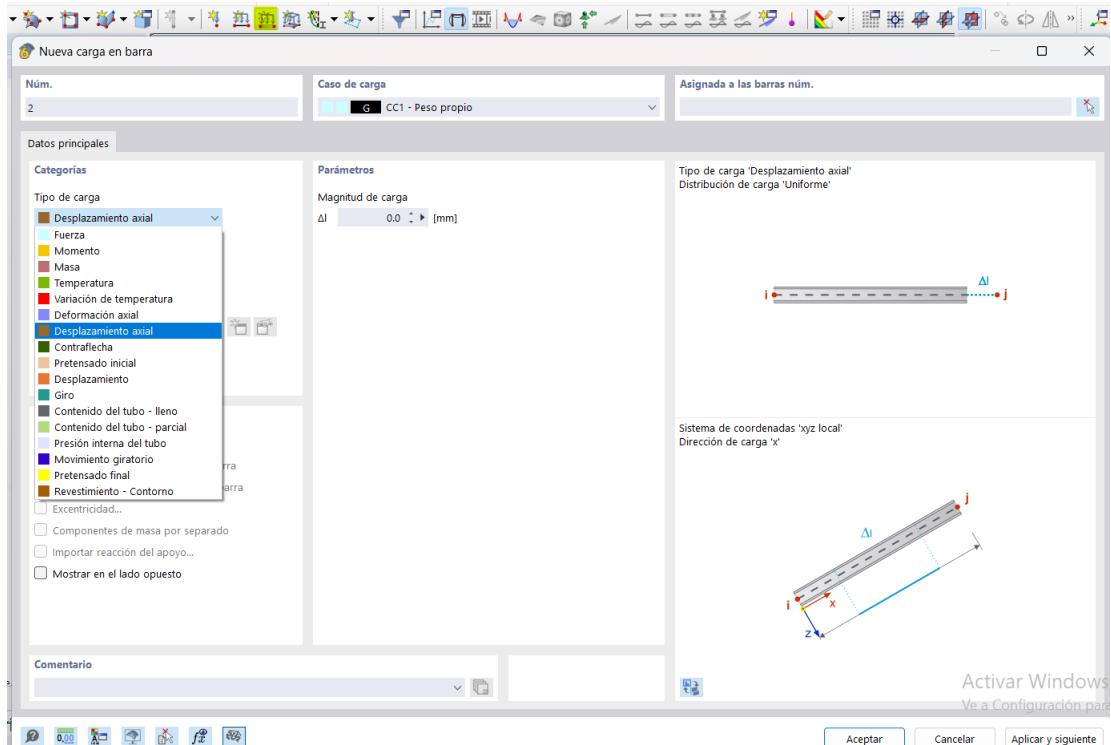


Figura 13.19. Carga para Cruces de San Andres- RFEM

Cargas de Imperfecciones

En la opción de Casos de imperfecciones, Figura 13.20, en el apartado nombre de caso de carga, se tendrá que crear dos tipos de imperfecciones, una en el eje x y otra en el eje y. Ademas en la sección de Asignación (Figura 13.21) se tendrá que aplicar las combinaciones de carga en las direcciones correspondientes, es decir, combinaciones de viento en el eje x y combinaciones de viento en el eje y.

Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno son cruciales para un análisis preciso. Definir correctamente los apoyos y vinculaciones asegura que el modelo actua con las condiciones del mundo real.

Para implementarlo en RFEM 6, hay que hacer doble click en la barra a la que se le quiere aplicar condiciones de contorno. Luego en la sección Tipos de Cálculo, y desplegando el menú de condiciones de contorno, dar a Nueva condición de contorno. Desde ahí se abre una nueva pantalla apareciendo una sección llamada apoyos en nudos pudiendo modificarlo con las condiciones necesarias. Figura 13.22 y 13.23

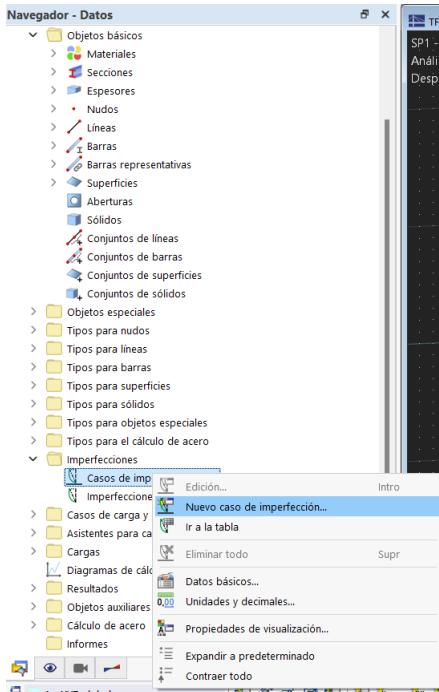


Figura 13.20. Caso de Imperfección- RFEM

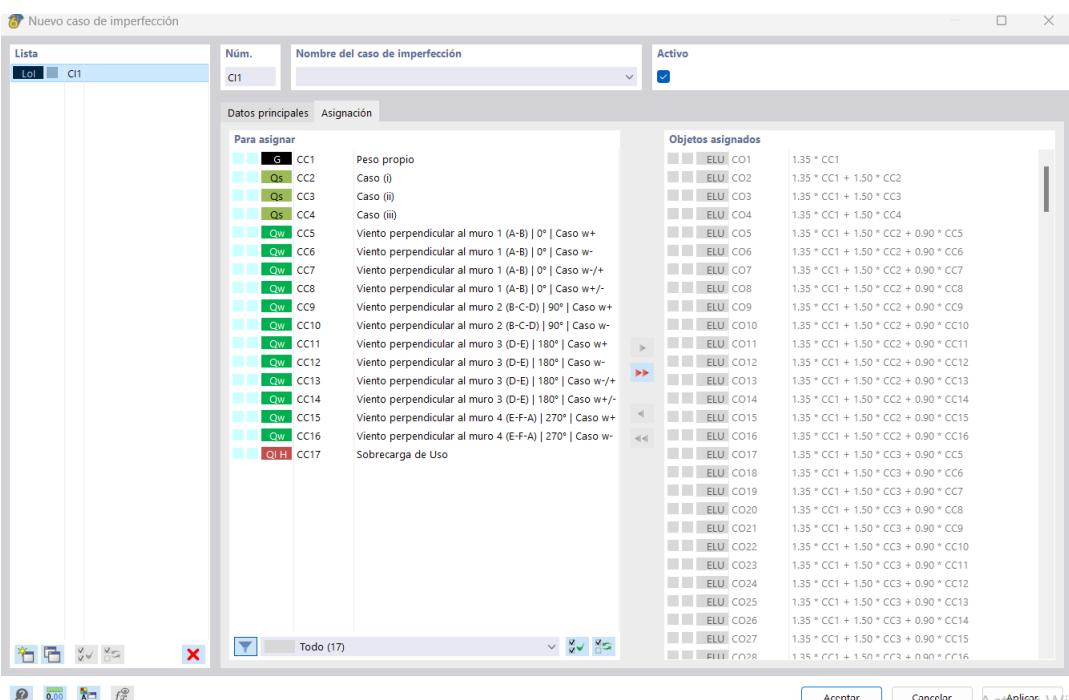


Figura 13.21. Caso de Carga-Asignación-RFEM

13.1.6. Análisis de 1ºorden y 2ºorden

Para realizar uno de los cálculos requeridos, tan solo hay que pinchar en Caso de cargas y combinaciones en la parte del Navegador de Datos.

Una vez dentro, en la sección Situación de proyecto, en el apartado tipo de situación de proyecto, se pueden encontrar numerosas situaciones. Figura 13.24.

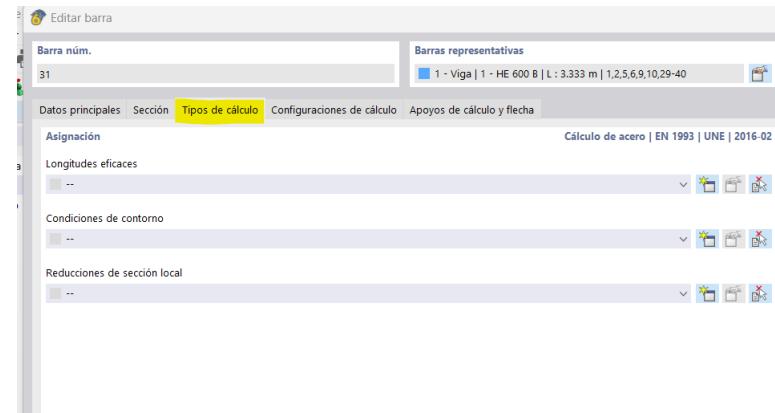


Figura 13.22. Tipos de Cálculo-Condición de Contorno-RFEM

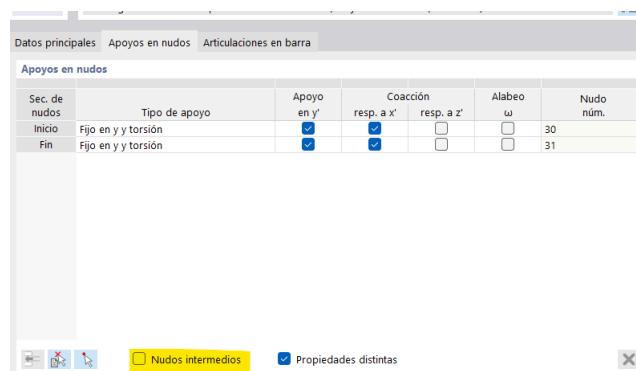


Figura 13.23. Tipos de Apoyos-RFEM

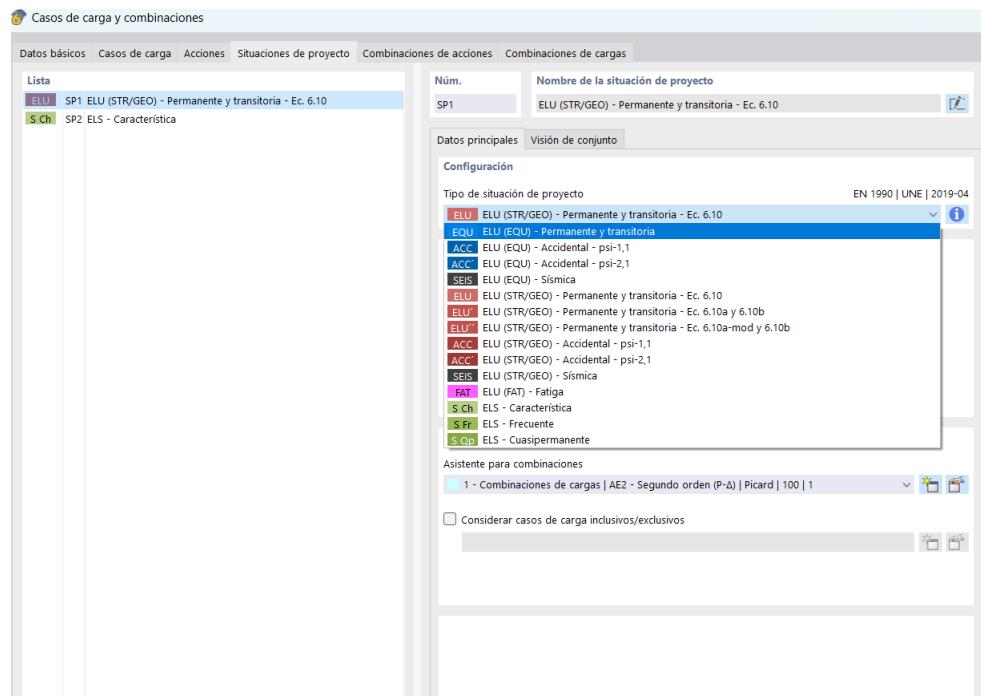


Figura 13.24. Situación de proyecto- Tipos de situación- RFEM

En el apartado Asistente para combinaciones, cliqueando en la zona coloreada, Figura 13.25, se abre la pestaña de nuevo asistente para combinaciones, Figura 13.27, donde aparece el tipo de

configuración a elegir ademas de cliquear la opción de Análisis de Estabilidad si se desea.

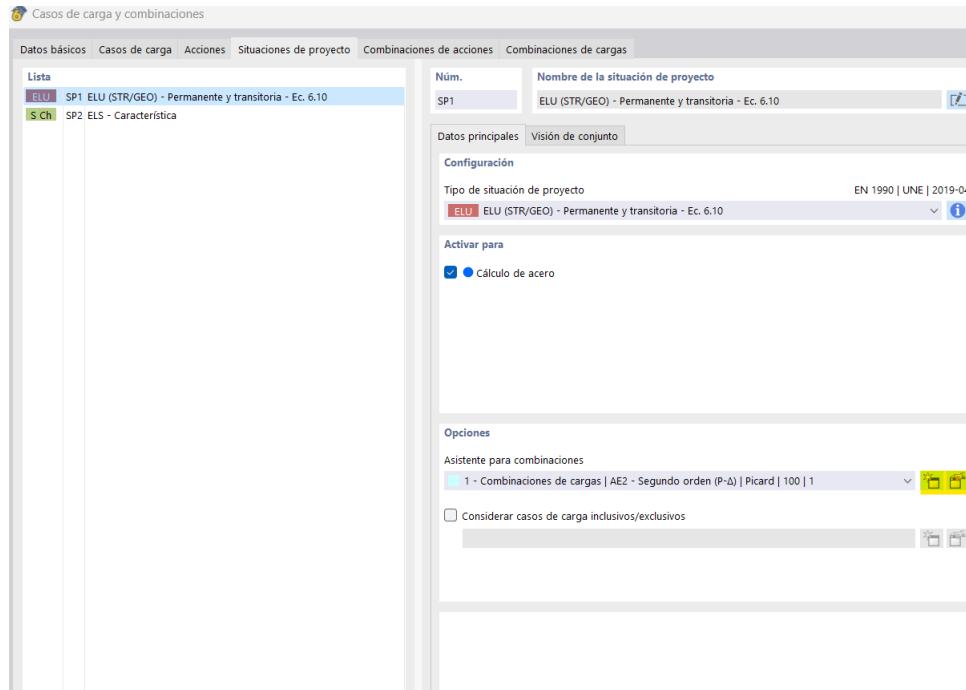


Figura 13.25. Configuración- RFEM

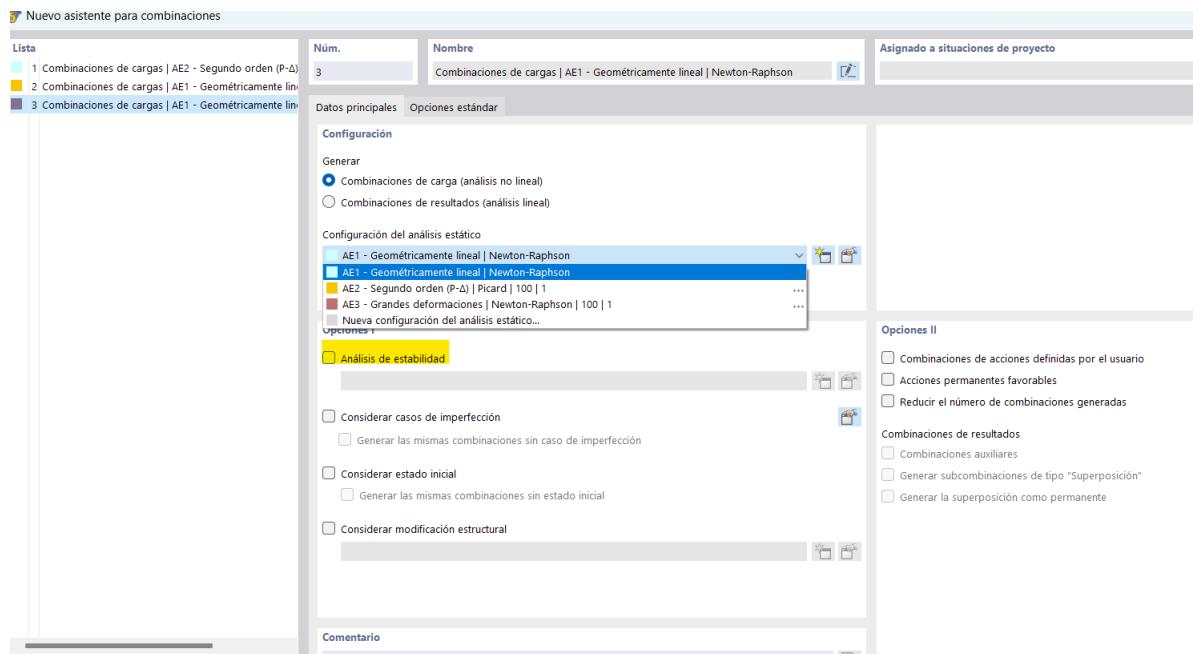


Figura 13.26. Tipos de configuración y análisis de estabilidad- RFEM

13.1.7. Análisis de Estabilidad con alabeo por torsión-7gdl

Para activar la opción de cálculo de alabeo por torsión, simplemente hay que activar la opción en datos generales. Figura 13.27

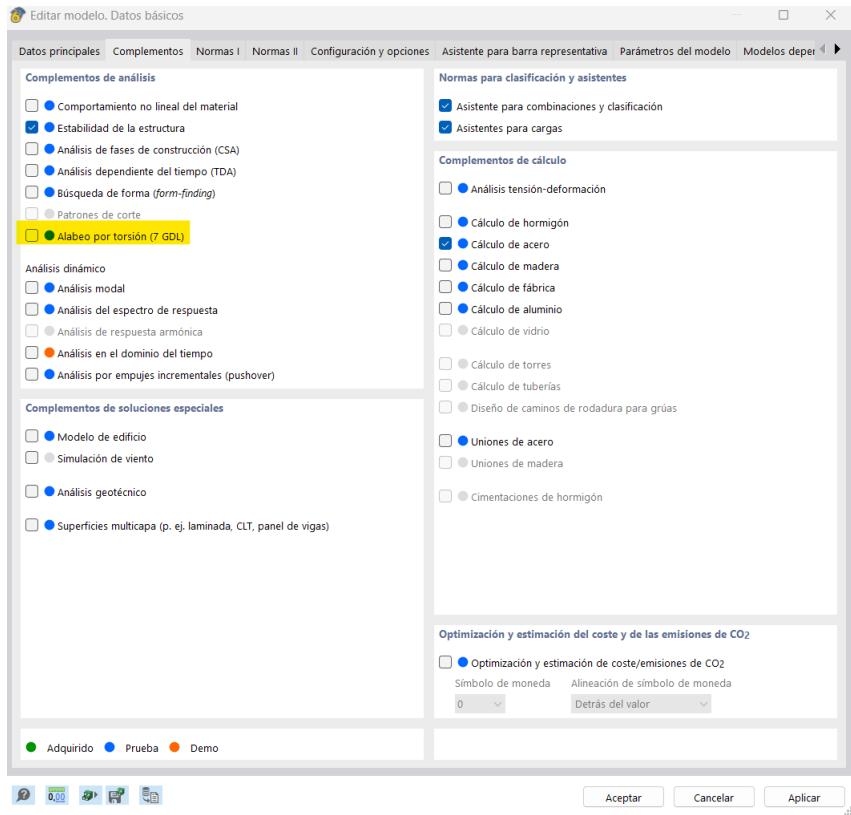


Figura 13.27. Situación de proyecto- Tipos de situación- RFEM

13.1.8. Uniones

Para el cálculo de uniones es necesario activar la opción Cálculo de Uniones en Datos Básicos 13.28.

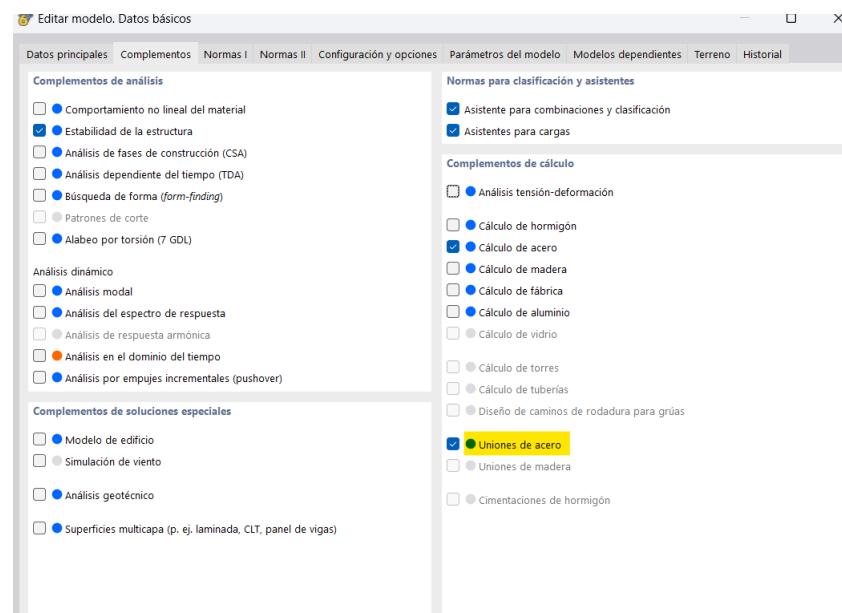


Figura 13.28. Datos Básicos-Uniones de Acero - RFEM

Luego, se selecciona uno de los nudos donde se quiere realizar la unión y se le da click derecho.

Seguidamente seleccionamos Crear Unión 13.29.

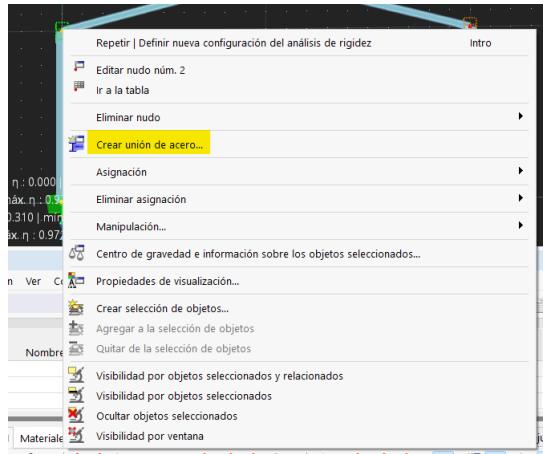


Figura 13.29. Creación de Uniones - RFEM

A continuación se observan varios apartados, en la sección de Datos principales, se asigna las barras y la configuración de cálculo (13.30). En barras, el terminal y el material a usar. En la opción de Componentes, en la opción de Insertar componentes de la biblioteca, aparecen bastantes tipos de uniones a elegir (13.33). Una vez aplicada la plantilla se incorporarán todos los materiales al listado de componentes y así poder ir variando las mediciones (13.31). Por último, en la opción de Comprobación plausible (13.32), el programa confirmará si esa unión tiene algún error.

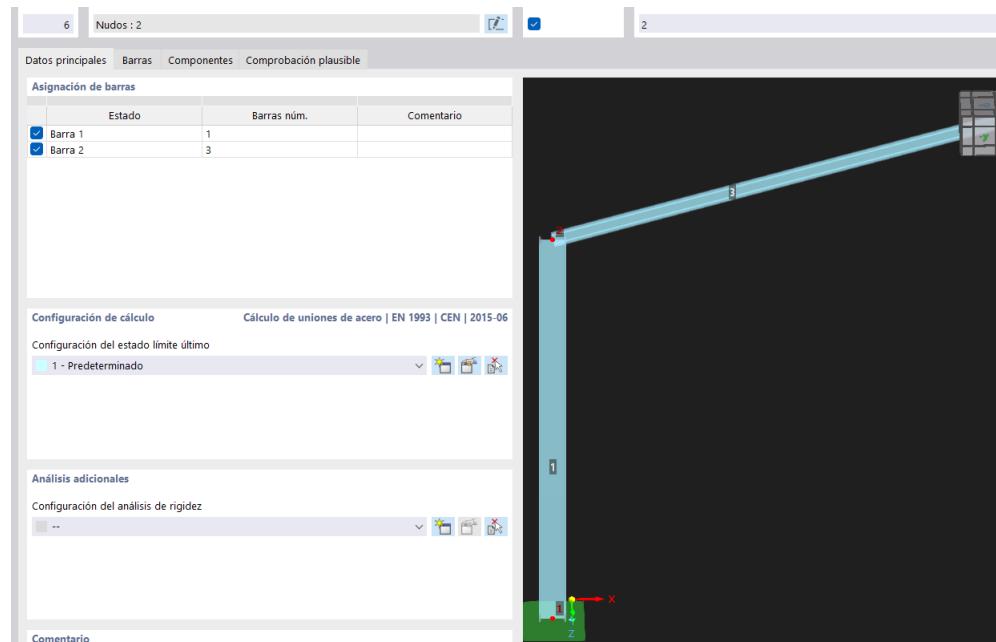


Figura 13.30. Datos principales Uniones - RFEM

Anexo

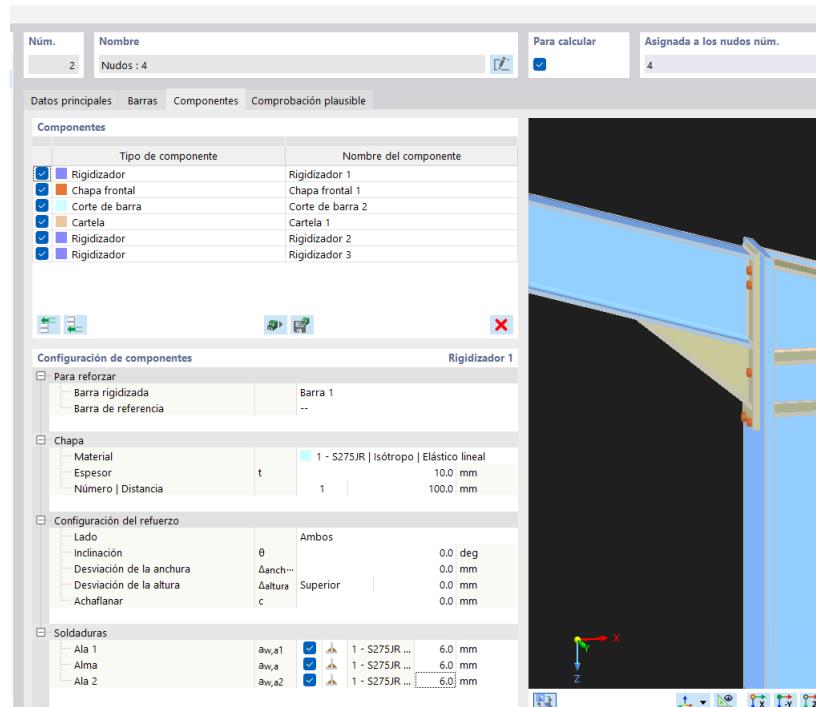


Figura 13.31. Componentes de Uniones - RFEM

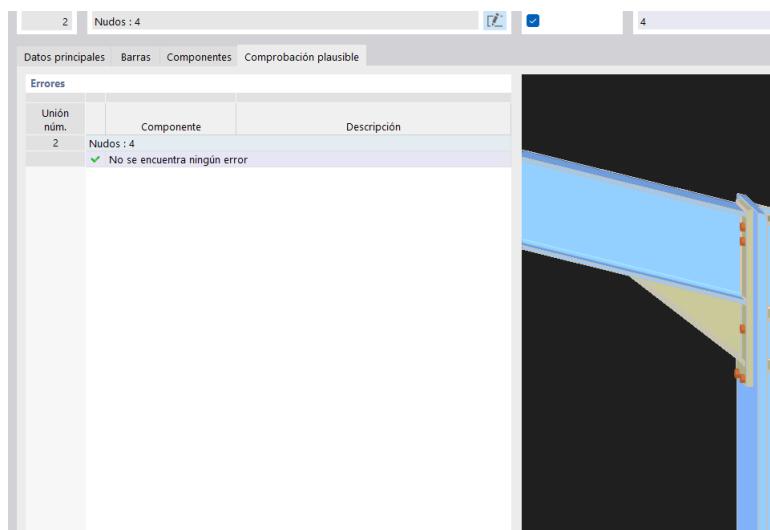


Figura 13.32. Comprobación plausible de Uniones - RFEM

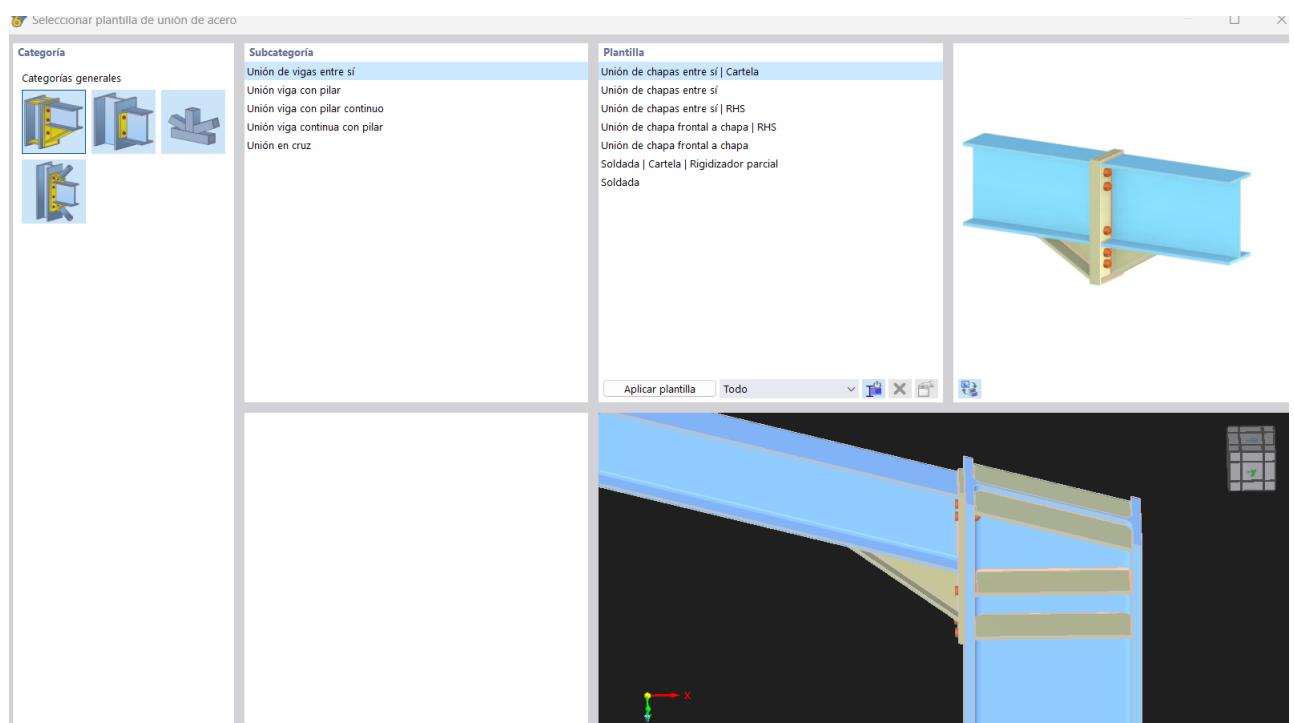
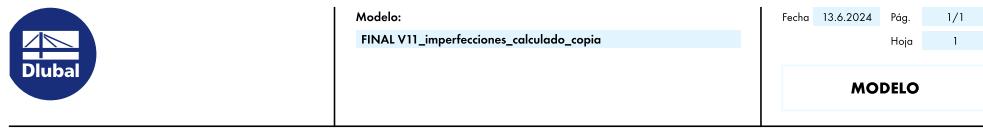


Figura 13.33. Listado de Componentes de Uniones - RFEM

13.2. Anexo 2: Comprobaciones de Cálculo en RFEM



A BARRA NÚM. 17 | SP1 | CO107 | 10.000 M | CARA IZQUIERDA | SP4100.03

Cálculo de acero

Verificación SP4100.03 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Flexión respecto al eje y según EN 1993-1-1, 6.2.5 | Cálculo plástico

$$\begin{aligned} V_{pl,z,Rd} &= \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_M O} \\ &= \frac{89.78 \text{ cm}^2 \cdot \left(\frac{275.000 \text{ N/mm}^2}{\sqrt{3}} \right)}{1.05} \\ &= 1357.57 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.2.6(2), Ec. 6.18

$$\begin{aligned} V_{z,Rd,min.} &= V_{pl,z,Rd} \\ &= 1357.57 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{Vz} &= \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd,min.}} \\ &= \frac{104.15 \text{ kN}}{1357.57 \text{ kN}} \\ &= 0.077 \end{aligned}$$

Según 6.2.8(2) or 6.2.10(2), se ignora el efecto del esfuerzo cortante/tensión tangencial en el eje z porque es menor que la mitad de la resistencia a cortante.

$$\begin{aligned} M_{pl,y,Rd} &= \frac{M_{pl,y}}{\gamma_M O} \\ &= \frac{1276.07 \text{ kNm}}{1.05} \\ &= 1215.30 \text{ kNm} \end{aligned}$$

6.2.5, Ec. 6.13

$$\begin{aligned} \eta_{My} &= \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \\ &= \frac{569.63 \text{ kNm}}{1215.30 \text{ kNm}} \\ &= 0.469 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{My} \\ &= 0.469 \end{aligned}$$

V _{pl,z,Rd}	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
A _{v,z}	Área de cortante
f _{y,w}	Límite elástico del alma
γ _{MO}	Coeficiente parcial
η _{Vz}	Componente de cálculo para V _z
V _{z,Ed}	Esfuerzo cortante de cálculo
V _{z,Rd,min.}	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
M _{pl,y,Rd}	Momento resistente de cálculo
M _{pl,y}	Resistencia plástica a flexión
η _{My}	Componente de cálculo para M _y
M _{y,Ed}	Momento flector de cálculo

Figura 13.34. Comprobación Momento Flector del Pilar



Modelo:
FINAL V11_imperfecciones_calculado_copia

Fecha 13.6.2024 Pág. 1/1
Hoja 1

MODELO

A
BARRA NÚM. 17 | SP1 | CO105 | 10.000 M | CARA IZQUIERDA | PUNTO DE TENSIÓN NÚM. 14 | SP6100
Cálculo de acero

Verificación SP6100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.1(5) | Cálculo elástico

$$\begin{aligned} \eta_{6,1} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-139.006 \text{ N/mm}^2}{265.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2.722 \text{ N/mm}^2}{265.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2} \\ &= 0.551 \end{aligned}$$

6.2.1(5), ec. 6.1

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{6,1} \\ &= 0.551 \end{aligned}$$

6.2.1(5), ec. 6.1

$\eta = 0.551 \leq 1$ ✓

$\eta_{6,1}$ Razón de tensiones
 $\sigma_{x,Ed}$ Tensión normal de cálculo
 f_y Límite elástico del punto de tensión
 γ_{M0} Coeficiente parcial
 τ_{Ed} Tensión tangencial de cálculo



Figura 13.35. Comprobación a elasticidad en Pilares

A BARRA NÚM. 17 | SP1 | CO107 | 10.000 M | CARA IZQUIERDA | SP6500.02

Cálculo de acero

Verificación SP6500.02 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Flexión respecto al eje y, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 | Cálculo plástico

$\begin{aligned} V_{pl,z,Rd} &= \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_M} \\ &= \frac{89.78 \text{ cm}^2 \cdot \left(\frac{275.000 \text{ N/mm}^2}{\sqrt{3}} \right)}{1.05} \\ &= 1357.57 \text{ kN} \end{aligned}$ $\begin{aligned} \eta_{Vz} &= \frac{V_z,Ed}{V_{z,Rd,min}} \\ &= \frac{104.15 \text{ kN}}{1357.57 \text{ kN}} \\ &= 0.077 \end{aligned}$ <p>Según 6.2.8(2) o 6.2.10(2), se ignora el efecto del esfuerzo cortante/tensión tangencial en el eje z porque es menor que la mitad de la resistencia a cortante.</p> $\begin{aligned} N_{pl,Rd} &= \frac{N_{pl}}{\gamma_M} \\ &= \frac{6393.320 \text{ kN}}{1.05} \\ &= 6088.870 \text{ kN} \end{aligned}$ $\begin{aligned} M_{pl,y,Rd} &= \frac{M_{pl,y}}{\gamma_M} \\ &= \frac{1276.07 \text{ kNm}}{1.05} \\ &= 1215.30 \text{ kNm} \end{aligned}$ $\begin{aligned} N_{lim,6.33} &= 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \\ &= 0.25 \cdot 6088.870 \text{ kN} \\ &= 1522.220 \text{ kN} \end{aligned}$ $\begin{aligned} N_{lim,6.34} &= 0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_M} \\ &= 0.5 \cdot 444.0 \text{ mm} \cdot 14.5 \text{ mm} \cdot \frac{275.000 \text{ N/mm}^2}{1.05} \\ &= 843.071 \text{ kN} \end{aligned}$ <p>$N_{Ed} \leq N_{lim,6.33}$ and $N_{Ed} \leq N_{lim,6.34}$</p> <p>Ningún efecto del esfuerzo axil en el cálculo de la resistencia a flexión respecto al eje y según 6.2.9.1(4)</p> $\begin{aligned} \eta_{My} &= \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \\ &= \frac{569.63 \text{ kNm}}{1215.30 \text{ kNm}} \\ &= 0.469 \end{aligned}$ <p>$\eta = \eta_{My}$</p> <p>$\boxed{\eta = 0.469 \leq 1 \checkmark}$</p>	<p>Modelo: FINAL V11_imperfecciones_calculado_copia</p> <p>Fecha 13.6.2024 Pág. 1/2 Hoja 1</p> <p>MODELO</p>
---	---

6.2.6(2), Ec. 6.18

6.2.3, Ec. 6.6

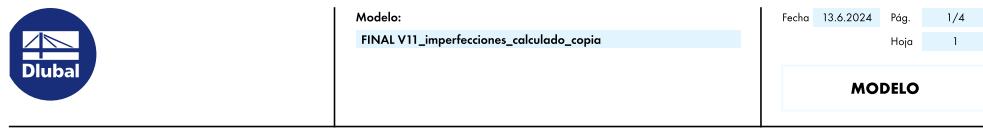
6.2.5, Ec. 6.13

6.2.9.1(4), ec. 6.33

6.2.9.1(4), ec. 6.34

$V_{pl,z,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$A_{v,z}$	Área de cortante
$f_{y,w}$	Límite elástico del alma
γ_M	Coeficiente parcial
η_{Vz}	Componente de cálculo para V_z

Figura 13.36. Comprobación a flexión y esfuerzo axil en Pilares



A BARRA NÚM. 17 | SP1 | CO107 | 0.000 M | ST3100 **Cálculo de acero**

Verificación ST3100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad

Flexión y pandeo respecto a los ejes principales según EN 1993-1-1, 6.3.3

$$\begin{aligned} N_{cr,y} &= (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{l_y}{(L_{cr,y})^2} \\ &= (\pi)^2 \cdot 210000.000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{107180.00 \text{ cm}^4}{(10.000 \text{ m})^2} \\ &= 22214.30 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.3.1.2(1)

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_y &= \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} \\ &= \sqrt{\frac{6393.320 \text{ kN}}{22214.30 \text{ kN}}} \\ &= 0.536 \end{aligned}$$

6.3.1.3(1)

$$\begin{aligned} \Phi_y &= 0.5 \cdot [1 + a_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + (\bar{\lambda}_y)^2] \\ &= 0.5 \cdot [1 + 0.210 \cdot (0.536 - 0.2) + (0.536)^2] \\ &= 0.679 \end{aligned}$$

6.3.1.2(1)

$$\begin{aligned} \chi_y &= \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{(\Phi_y)^2 - (\bar{\lambda}_y)^2}} \\ &= \frac{1}{0.679 + \sqrt{(0.679)^2 - (0.536)^2}} \\ &= 0.91 \end{aligned}$$

6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$\begin{aligned} N_{cr,z} &= (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{l_z}{(L_{cr,z})^2} \\ &= (\pi)^2 \cdot 210000.000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{12624.00 \text{ cm}^4}{(10.000 \text{ m})^2} \\ &= 2616.47 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.3.1.2(1)

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_z &= \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} \\ &= \sqrt{\frac{6393.320 \text{ kN}}{2616.47 \text{ kN}}} \\ &= 1.563 \end{aligned}$$

6.3.1.3(1)

$$\begin{aligned} \Phi_z &= 0.5 \cdot [1 + a_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + (\bar{\lambda}_z)^2] \\ &= 0.5 \cdot [1 + 0.340 \cdot (1.563 - 0.2) + (1.563)^2] \\ &= 1.953 \end{aligned}$$

6.3.1.2(1)

$$\begin{aligned} \chi_z &= \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{(\Phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \\ &= \frac{1}{1.953 + \sqrt{(1.953)^2 - (1.563)^2}} \\ &= 0.32 \end{aligned}$$

6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$\begin{aligned} M_{cr} &= a_{cr} \cdot M_{y,Ed} \\ &= 5.84 \cdot 569.63 \text{ kNm} \\ &= 3327.64 \text{ kNm} \end{aligned}$$

6.3.2.2(1)

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{LT} &= \sqrt{\frac{|M_{pl,y}|}{M_{cr}}} \\ &= \sqrt{\frac{1276.07 \text{ kNm}}{3327.64 \text{ kNm}}} \\ &= 0.619 \end{aligned}$$

6.3.2.2(1)

Figura 13.37. Comprobación elementos uniformes sometidos a compresión y flexión en Pilares



Modelo:
FINAL V11_imperfecciones_calculado_copia

Fecha 13.6.2024 Pág. 1/1
Hoja 1

MODELO

A
BARRA NÚM. 18 | SP1 | CO105 | 1.981 M | CARA IZQUIERDA | PUNTO DE TENSIÓN NÚM. 14 Cálculo de acero | SP6100

Verificación SP6100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.1(5) | Cálculo elástico

$$\begin{aligned} \eta_{6,1} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-115.891 \text{ N/mm}^2}{275.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{-10.580 \text{ N/mm}^2}{275.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2} \\ &= 0.448 \end{aligned}$$

$\eta = \eta_{6,1}$
 $= 0.448$

$\eta = 0.448 \leq 1$ ✓

6.2.1(5), ec. 6.1

6.2.1(5), ec. 6.1

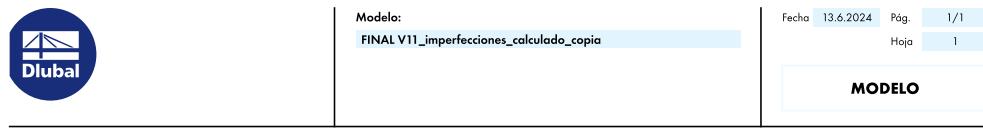
$\eta_{6,1}$ Razón de tensiones
 $\sigma_{x,Ed}$ Tensión normal de cálculo

f_y Límite elástico del punto de tensión
 γ_{M0} Coeficiente parcial

τ_{Ed} Tensión tangencial de cálculo



Figura 13.38. Comprobación a elasticidad en Dinteles



A BARRA NÚM. 18 | SP1 | CO67 | 15.818 M | PUNTO DE TENSIÓN NÚM. 8 | SP6200

Cálculo de acero

Verificación SP6200 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Flexión, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 | Cálculo elástico

$$\begin{aligned} V_{p,y,Rd} &= \frac{A_{v,y} \cdot \left(\frac{f_y f}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_M 0} \\ &= \frac{64.00 \text{ cm}^2 \cdot \left(\frac{275.000 \text{ N/mm}^2}{\sqrt{3}} \right)}{1.05} \\ &= 967.75 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_{y,Rd,min} = V_{p,y,Rd} = 967.75 \text{ kN}$$

$$\eta_{V_y} = \frac{V_{y,Ed}}{V_{y,Rd,min}} = \frac{9.10 \text{ kN}}{967.75 \text{ kN}} = 0.009$$

Según 6.2.8(2) o 6.2.10(2), se ignora el efecto del esfuerzo cortante/tensión tangencial en el eje y porque es menor al 50 % de la resistencia a cortante.

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_M 0} = \frac{275.000 \text{ N/mm}^2}{1.05} = 261.905 \text{ N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{|\sigma_{x,Ed}|}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{|-123.623 \text{ N/mm}^2|}{261.905 \text{ N/mm}^2} = 0.472$$

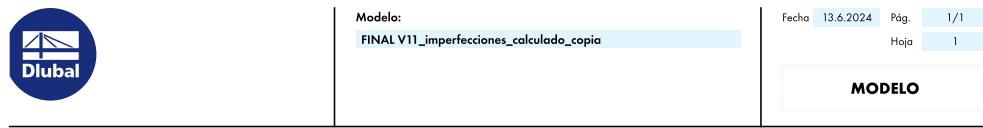
$$\boxed{\eta = 0.472 \leq 1 \checkmark}$$

6.2.6(2), Ec. 6.18

6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10

$V_{p,y,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$A_{v,y}$	Área de cortante
f_y,f	Límite elástico del ala
$\gamma_M 0$	Coeficiente parcial
η_{V_y}	Componente de cálculo para V_y
$V_{y,Ed}$	Esfuerzo cortante de cálculo
$V_{y,Rd,min}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$\sigma_{x,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
f_y	Límite elástico del punto de tensión
$\sigma_{x,Ed}$	Tensión normal de cálculo

Figura 13.39. Comprobación a flexión, esfuerzo cortante y esfuerzo axil en Dinteles



A BARRA NÚM. 45 | SP1 | CO56 | 5.000 M | PUNTO DE TENSIÓN NÚM. 1 | SP6100

Cálculo de acero

Verificación SP6100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección

Tensión normal y tangencial según EN 1993-1-1, 6.2.1(5) | Cálculo elástico

$$\begin{aligned}\eta_{6,1} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-200.846 \text{ N/mm}^2}{275.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{3.124 \text{ N/mm}^2}{275.000 \text{ N/mm}^2}\right)^2} \\ &= 0.767\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_{6,1} \\ &= 0.767\end{aligned}$$

$\eta = 0.767 \leq 1$ ✓

6.2.1(5), ec. 6.1

6.2.1(5), ec. 6.1

$\eta_{6,1}$ Razón de tensiones

$\sigma_{x,Ed}$ Tensión normal de cálculo

f_y Límite elástico del punto de tensión

γ_{M0} Coeficiente parcial

τ_{Ed} Tensión tangencial de cálculo



Figura 13.40. Comprobación a elasticidad en Correas

13.3. Anexo 3: Comprobaciones de Cálculo de Uniones en RFEM

13.3.1. Comprobación Unión en Cumbreña

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfgunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha 18.6.2024 Pág. 1/1 Hoja 1
MODELO			

A UNIÓN DE ACERO NÚM. 1 | NUDO NÚM. 5 | PLACA | BARRA 1 | ALA 1 | SP1 | Cálculo de uniones de acero
CO1 | UL1000

Verificación UL1000 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de placas

$$\begin{aligned}\eta &= \left| \frac{\epsilon_{p-Mises}}{\epsilon_{p-limit}} \right| \\ &= \left| \frac{0.00\%}{5.00\%} \right| \\ &= 0.000\end{aligned}$$

$$\eta = 0.000 \leq 1 \quad \checkmark$$

$\epsilon_{p-Mises}$: Deformación plástica equivalente máxima

$\epsilon_{p-limit}$: Deformación plástica equivalente límite

Figura 13.41. Comprobación de Placa de Unión Cumbreña

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha 18.6.2024 Pág. 1/3 Hoja 1
MODELO			

A UNIÓN DE ACERO NÚM. 1 | NUDO NÚM. 5 | MEDIO DE FIJACIÓN | UNIÓN DE CHAPAS ENTRE SÍ 1 | GRUPO DE TORNILLOS | TORNILLO 2, 3 | SP1 | CO1 | UL1100

Cálculo de uniones de acero

Verificación UL1100 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de tornillos

Resistencia a cortante:

$$\begin{aligned} F_{v,Rd} &= \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma M2} \\ &= \frac{0.60 \cdot 800.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245.0 \text{ mm}^2}{1.25} \\ &= 94.08 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\begin{aligned} \eta_{Fv} &= \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \\ &= \frac{0.00 \text{ kN}}{94.08 \text{ kN}} \\ &= 0.000 \end{aligned}$$

Resistencia al aplastamiento:

Posición del tornillo con borde, a la izquierda de la dirección de la fuerza

$$\begin{aligned} k_{1,izq} &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{e_{2,izq}}{d_0} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{112.9 \text{ mm}}{22.0 \text{ mm}} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= 2.50 \end{aligned}$$

Posición del tornillo con borde, a la derecha de la dirección de la fuerza

$$\begin{aligned} k_{1,der} &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{e_{2,der}}{d_0} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{73.7 \text{ mm}}{22.0 \text{ mm}} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= 2.50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \min(k_{1,izq}, k_{1,der}) \\ &= \min(2.50, 2.50) \\ &= 2.50 \end{aligned}$$

Posición del tornillo de borde, en dirección de la fuerza

$$\begin{aligned} \alpha_b &= \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right) \\ &= \min \left(\frac{43.7 \text{ mm}}{3 \cdot 22.0 \text{ mm}}, \frac{800.000 \text{ N/mm}^2}{410.000 \text{ N/mm}^2}, 1 \right) \\ &= 0.66 \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\begin{aligned} F_{b,Rd} &= \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma M2} \\ &= \frac{2.50 \cdot 0.66 \cdot 410.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 20.0 \text{ mm} \cdot 15.0 \text{ mm}}{1.25} \\ &= 163.00 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{Fb} &= \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \\ &= \frac{0.00 \text{ kN}}{163.00 \text{ kN}} \\ &= 0.000 \end{aligned}$$

Resistencia a tracción:

$$\begin{aligned} F_{t,Rd} &= \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma M2} \\ &= \frac{0.90 \cdot 800.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245.0 \text{ mm}^2}{1.25} \\ &= 141.12 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

Figura 13.42. Comprobación de tornillos de Unión Cumbreña

13.3.2. Comprobación Unión en Pilares

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfgunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha 18.6.2024 Pág. 1/1 Hoja 1
MODELO			

A UNIÓN DE ACERO NÚM. 1 | NUDO NÚM. 5 | SOLDADURA | UNIÓN DE CHAPAS ENTRE SÍ 1 | CORTE DE BARRA 2 | SOLDADURA 1 | SP1 | CO1 | UL1200 Cálculo de uniones de acero

Verificación UL1200 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de la soldadura en ángulo

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{\sigma_{eqv,w}}{f_u} \\ &= \frac{\beta_w \cdot \gamma M2}{410.000 \text{ N/mm}^2} \\ &= \frac{26.808 \text{ N/mm}^2}{0.85 \cdot 1.25} \\ &= 0.069\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \frac{|\sigma_{\perp}|}{0.9 \cdot f_u} \\ &= \frac{\gamma M2}{0.9 \cdot 410.000 \text{ N/mm}^2} \\ &= \frac{|-9.227 \text{ N/mm}^2|}{1.25} \\ &= 0.031\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \max(\eta_1, \eta_2) \\ &= \max(0.069, 0.031) \\ &= 0.069\end{aligned}$$

$\eta = 0.069 \leq 1$ ✓

4.5.3.2

4.5.3.2

4.5.3.2

η_1 Criterio de cálculo de la tensión equivalente
 $\sigma_{eqv,w}$ Tensión de soldadura equivalente
 f_u Resistencia última a tracción
 β_w Coeficiente de correlación
 $\gamma M2$ Coeficiente parcial de seguridad
 η_2 Criterio de cálculo de la tensión perpendicular
 σ_{\perp} Tensión normal perpendicular al eje de soldadura

Figura 13.43. Comprobación de soldadura en Unión Cumbreña

Anexo

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha 23.6.2024 Pág. 1/1 Hoja 1
MODELO			

A UNIÓN DE ACERO NÚM. 2 | NUDO NÚM. 4 | PLACA | BARRA 1 | ALA 1 | SP1 | CO1 | UL1000 Cálculo de uniones de acero

Verificación UL1000 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de placas

$$\begin{aligned}\eta &= \left| \frac{\epsilon_{p-Mises}}{\epsilon_{p-limit}} \right| \\ &= \left| \frac{0.00\%}{5.00\%} \right| \\ &= 0.00\end{aligned}$$

$$\eta = 0.000 \leq 1 \checkmark$$

$\epsilon_{p-Mises}$ Deformación plástica equivalente máxima

$\epsilon_{p-limit}$ Deformación plástica equivalente límite

Figura 13.44. Comprobación de Placa de Unión en Pilares

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfgunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha: 23.6.2024 Pág.: 1/2 Hoja: 1
MODELO			

A UNIÓN DE ACERO NÚM. 2 | NUDO NÚM. 4 | MEDIO DE FIJACIÓN | CHAPA FRONTAL 1 | GRUPO DE TORNILLOS 1 | TORNILLO 1, 3 | SP1 | CO1 | UL1101

Cálculo de uniones de acero

Verificación UL1101 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de tornillos pretensados

Resistencia al aplastamiento:
Posición del tornillo con borde, a la izquierda de la dirección de la fuerza

$$\begin{aligned} k_{1,izq} &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{e_{2,izq}}{d_0} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= \min \left(2.8 \cdot \left(\frac{40.0 \text{ mm}}{18.0 \text{ mm}} \right) - 1.7, 2.5 \right) \\ &= 2.50 \end{aligned}$$

Posición del tornillo que no está en el borde, a la derecha de la dirección de la fuerza

$$k_{1,der} = 2.5$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \min (k_{1,izq}, k_{1,der}) \\ &= \min (2.50, 2.50) \\ &= 2.50 \end{aligned}$$

Posición del tornillo que no está en el borde, en dirección de la fuerza

$$a_b = 1$$

$$\begin{aligned} F_{b,Rd} &= \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \\ &= \frac{2.50 \cdot 1.00 \cdot 410.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 16.0 \text{ mm} \cdot 20.0 \text{ mm}}{1.25} \\ &= 262.40 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\begin{aligned} \eta_{Fb} &= \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \\ &= \frac{1.16 \text{ kN}}{262.40 \text{ kN}} \\ &= 0.004 \end{aligned}$$

Resistencia a tracción:

$$\begin{aligned} F_{t,Rd} &= \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \\ &= \frac{0.90 \cdot 800.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 157.0 \text{ mm}^2}{1.25} \\ &= 90.43 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\begin{aligned} \eta_{Ft} &= \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \\ &= \frac{87.89 \text{ kN}}{90.43 \text{ kN}} \\ &= 0.972 \end{aligned}$$

Resistencia al punzonamiento:

$$\begin{aligned} B_{p,Rd} &= \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \\ &= \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 26.0 \text{ mm} \cdot 20.0 \text{ mm} \cdot 410.000 \text{ N/mm}^2}{1.25} \\ &= 321.50 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\begin{aligned} \eta_{Bp} &= \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \\ &= \frac{87.89 \text{ kN}}{321.50 \text{ kN}} \\ &= 0.273 \end{aligned}$$

Resistencia al deslizamiento:

$$\begin{aligned} F_{p,C} &= k_p \cdot f_{ub} \cdot A_s \\ &= 0.70 \cdot 800.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 157.0 \text{ mm}^2 \\ &= 87.92 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8, 3.9.1

Figura 13.45. Comprobación de tornillos de Unión en Pilares

Antonia Sanchez Calle Antonio Machado 34 29560 Málaga Spain 	Modelo: tfgunion	Proyecto: TFG FINAL	Fecha 23.6.2024 Pág. 1/1 Hoja 1
MODELO			

**A UNIÓN DE ACERO NÚM. 2 | NUDO NÚM. 4 | SOLDADURA | CHAPA FRONTAL 1 | Cálculo de uniones de acero
SOLDADURA 2 | SP1 | CO1 | UL1200**

Verificación UL1200 | EN 1993 | CEN | 2015-06

Estado límite último
Comprobación de la soldadura en ángulo

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{eqv,w}}{f_u} \\ = \frac{\beta_w \cdot \gamma M2}{\frac{71.640 \text{ N/mm}^2}{410.000 \text{ N/mm}^2}} \\ = \frac{0.85 \cdot 1.25}{0.85 \cdot 1.25} \\ = 0.186$$

$$\eta_2 = \frac{|\sigma_{\perp}|}{0.9 \cdot f_u} \\ = \frac{\gamma M2}{\frac{|42.359 \text{ N/mm}^2|}{0.9 \cdot 410.000 \text{ N/mm}^2}} \\ = \frac{1.25}{1.25} \\ = 0.143$$

$$\eta = \max(\eta_1, \eta_2) \\ = \max(0.186, 0.143) \\ = 0.186$$

$\eta = 0.186 \leq 1$ ✓

4.5.3.2

4.5.3.2

4.5.3.2

- η_1 Criterio de cálculo de la tensión equivalente
- $\sigma_{eqv,w}$ Tensión de soldadura equivalente
- f_u Resistencia última a tracción
- β_w Coeficiente de correlación
- $\gamma M2$ Coeficiente parcial de seguridad
- η_2 Criterio de cálculo de la tensión perpendicular
- σ_{\perp} Tensión normal perpendicular al eje de soldadura

Figura 13.46. Comprobación de soldadura en Unión en Pilares