

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Análisis y diseño de nudos de estructuras tubulares según el Eurocódigo 3

Titulación: Ingeniería Industrial
Intensificación: Construcción e
Instalaciones Industriales
Alumno: D. Antonio Ochoa Fraile
Directores: Dr. Pascual Martí Montrull
Dr. David Herrero Pérez

Cartagena, septiembre de 2013

Agradecimientos

A Conchi y a Jorge, por su apoyo y los sacrificios que han tenido que hacer para poder concederme la posibilidad de concluir este trabajo. Nunca podré recuperar el tiempo que dejé de estar con ellos.

Mi más sincero agradecimiento al Departamento de Estructuras y Construcción, y en especial al Dr. Pascual Martí Montrull, por su paciencia infinita, por animarme cuando avanzar se hacía muy cuesta arriba, y sobre todo, por saber trazar en cada momento el camino correcto. Gracias también al Dr. David Herrero Pérez por despejar el camino cuando la maleza no permitía verlo.

Pedir perdón, también, por todos esos fines de semana encerrado delante del ordenador. A todos ellos, que saben muy bien quienes son, lo siento.

Por último, una mención especial a mi padre, que me muestra con su ejemplo, la virtud de no dejar nunca de aprender, y sobre todo, la perseverancia para superarme cada día.

Índice general

1	Introducción	1
	1.1 Generalidades	1
2	Verificación de nudos de estructuras tubulares según Eurocódigo 3	5
	2.1 Introducción	5
	2.2 Estructuras con perfiles tubulares	6
	2.2.1 Bases de cálculo generales.....	6
	2.2.2 Bases de cálculo específicas para el análisis global de vigas en celosía	7
	2.2.3 Tipología de las uniones de vigas en celosía con perfil hueco.....	9
	2.2.4 Bases de cálculo específicas en el cálculo de uniones de perfiles huecos	11
	2.2.5 Cálculo de uniones de perfiles huecos.....	12
	2.2.6 Soldaduras	12
	2.2.7 Tipos de rotura de la uniones de perfiles huecos.....	15
	2.3 Formulación para la verificación de los nudos en estructuras con perfiles tubulares	17
	2.3.1 Generalidades.....	17
	2.3.2 Condiciones de validez generales para el análisis global de vigas en celosía	21
	2.3.3 Condiciones de validez geométricas para uniones soldadas entre diagonales y cordones RHS	24
	2.3.4 Resistencia de cálculo	30
3	Estructura ejemplo de verificación de nudos	51
	3.1 Introducción	51

II ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

3.2	Normativa empleada y programas de cálculo	51
3.3	Descripción general de la estructura modelo	52
3.4	Sistema estructural adoptado	53
3.5	Diseño de las uniones	55
3.6	Materiales empleados	57
3.7	Hipótesis de cálculo	58
3.7.1	Modelo de cálculo	58
3.7.2	Acciones adoptadas en el cálculo	59
3.7.3	Coefficientes de ponderación de acciones	63
3.7.4	Combinación de acciones adoptadas	63
3.7.5	Deformaciones admisibles	66
3.7.6	Resistencia de cálculo del acero	66
3.7.7	Propiedades del acero	66
3.7.8	Longitudes de pandeo	67
3.8	Cálculo de los esfuerzos por medio de ordenador	67
3.8.1	Análisis de la estructura	67
3.8.2	Verificación del dimensionado de la estructura según ELU	69
3.8.3	Comprobación de las deformaciones según ELS.....	71
3.9	Comprobación de la eficiencia de los nudos de la celosía	72
3.9.1	Introducción.....	72
3.9.2	Modelo de cálculo	73
3.9.3	Comprobación de la eficiencia del nudo 2.....	78
3.9.4	Comprobación de la eficiencia del nudo 11	83
3.10	Comprobación de la eficiencia mediante ordenador	86
3.10.1	Introducción.....	86
3.10.2	Geometría, símbolos y nomenclatura de CIDJOINT	87
3.10.3	Hoja de resultados análisis nudo n°2.....	88
3.10.4	Hoja de resultados análisis nudo n°11.....	90
3.10.5	Conclusiones	91
4	Implementación del programa DINET	93
4.1	Introducción	93
4.2	Programación en MATLAB	94
4.2.1	Descripción general del entorno GUIDE de MATLAB	94
4.2.2	Inicio del diseño de la GUI	95
4.2.3	Gestión de variables.....	97

4.2.4	Relación de archivos	98
4.2.5	Descripción del programa principal <i>DINET</i>	99
4.2.6	Descripción de la función <i>Crea_Avisos</i>	110
4.2.7	Descripción de la función <i>Crea_Informe</i>	110
4.2.8	Descripción de la función <i>CreaTR</i>	112
4.2.9	Descripción de la función <i>CreaTVG</i>	112
4.2.10	Descripción de la función <i>Creditos</i>	112
4.2.11	Descripción de la función <i>Datosexcen</i>	114
4.2.12	Descripción de la función <i>Datosnudo</i>	114
4.2.13	Descripción de la función <i>Descr_perfil</i>	114
4.2.14	Descripción de la función <i>dibReprnudo</i>	116
4.2.15	Descripción de la función <i>dibTiponudo</i>	117
4.2.16	Descripción de la función <i>espaciamiento</i>	117
4.2.17	Descripción de la función <i>excentricidad</i>	117
4.2.18	Descripción de la función <i>Garg_sin_solape</i>	117
4.2.19	Descripción de la función <i>iniDINET</i>	118
4.2.20	Descripción de la función <i>Paramperfil</i>	119
4.2.21	Descripción de la función <i>Ratio_esfuerzos</i>	120
4.2.22	Descripción de la función <i>Selectboton</i>	120
4.2.23	Descripción de la función <i>Selectnudo</i>	120
4.2.24	Descripción de la función <i>Tabla_esfuerzos</i>	120
4.2.25	Descripción de la función <i>V_ga</i>	121
4.2.26	Descripción de la función <i>V_gb</i>	121
4.2.27	Descripción de la función <i>V_gbKe</i>	122
4.2.28	Descripción de la función <i>V_gbT</i>	122
4.2.29	Descripción de la función <i>V_grKe</i>	123
4.2.30	Descripción de la función <i>V_grT</i>	124
4.2.31	Descripción de la función <i>Verifexc</i>	125
4.2.32	Descripción de la función <i>VerifNRd</i>	126
4.2.33	Descripción de la función <i>VerifVgb</i>	127
4.3	Vinculación entre programas y variables.....	128
5	Validación de los resultados de DINET.....	135
5.1	Introducción	135
5.2	Ejecución de los programas	136
5.2.1	Datos de entrada	136

IV ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

5.2.2	Ejecución de Robot	137
5.2.3	Ejecución de CoP2 VM.....	140
5.3	Comparación de los resultados obtenidos	147
5.3.1	Resultado de los cálculos de resistencias	147
5.3.2	Resultado de los cálculos de soldaduras	149
5.3.3	Diferencias entre la formulación para el cálculo de soldaduras de la norma ENV 1993-1-1:1992 y la norma EN 1993-1-8:2005	153
5.4	Conclusiones	154
6	Conclusiones y trabajos futuros.....	157
6.1	Introducción	157
6.2	Trabajos realizados.....	157
6.3	Conclusiones	158
6.4	Trabajos futuros	160
Referencias		161
Generales		161
Programación en MATLAB		161
Normativa		161
Documentación CIDECT-ICT		162
Catálogos		162
Software		162
Anejo A Manual del usuario del programa DINET		163
A.1 Introducción		163
A.2 Descripción del programa.....		164
A.2.1	Descripción de los archivos del programa	164
A.2.2	Descripción general de la ventana principal.....	164
A.2.3	Introducción de los datos generales.....	165
A.2.4	Selección del tipo de nudo.....	166
A.2.5	Introducción de la excentricidad o espaciamiento	166
A.2.6	Introducción de los parámetros de los perfiles	167
A.2.7	Panel de coeficientes de seguridad	169
A.2.8	Espesor de garganta de soldaduras	169
A.2.9	Tabla de esfuerzos del nudo.....	169
A.2.10	Panel de comprobación de validez geométrica	170
A.2.11	Ventana de visualización del nudo.....	171
A.2.12	Panel de comprobación de validez geométrica	172

A.2.13 Panel comentarios.....	172
A.2.14 Botones de validación	173
A.2.15 Botón de informe	174
A.2.16 Ratio total	175
A.3 Créditos.....	176
Anejo B Informe de resultados de DINET.....	177
B.1 Informe resultados nudo nº2	178
B.2 Informe resultados nudo nº11.....	181
Anejo C Informe de resultados de CoP2 VM.....	184
C.1 Informe resultados nudo nº2	185
C.2 Informe resultados nudo nº11.....	190
Anejo D Informe de resultados de Autodesk Robot.....	195
D.1 Informe resultados nudo nº2	196
D.2 Informe resultados nudo nº11.....	202

Índice de figuras

Figura 2-1 - Tipos de nudos 1.....	9
Figura 2-2 - Tipos de nudos 2.....	9
Figura 2-3 - Tipos de nudos 3.....	10
Figura 2-4 - Tipos de nudos 4.....	10
Figura 2-5 - Tipos de nudos 5.....	10
Figura 2-6 - Tipos de solicitaciones (cargas).....	10
Figura 2-7 - Detalle de la garganta de una soldadura.....	13
Figura 2-8 - Detalle de soldaduras.....	14
Figura 2-9 - Medida del espesor de la garganta de soldadura entre bordes curvos....	14
Figura 2-10 - Rotura de la cara del cordón.....	15
Figura 2-11 - Rotura de la cara lateral del cordón.....	15
Figura 2-12 - Rotura del cordón por esfuerzo cortante.....	16
Figura 2-13 - Rotura por punzonamiento.....	16
Figura 2-14 - Rotura de la diagonal.....	16
Figura 2-15 - Rotura por pandeo local.....	16
Figura 2-16 - Parámetros geométricos del nudo con una única diagonal.....	17
Figura 2-17 - Parámetros geométricos del nudo con 2 diagonales y espaciamiento...	17
Figura 2-18 - Parámetros de la geometría del nudo con 2 diagonales y solape.....	18
Figura 2-19 - Excentricidad de la unión.....	18
Figura 2-20 - Espaciamiento y solape entre diagonales.....	19
Figura 2-21 - Sección perfil rectangular hueco.....	25
Figura 2-22 - Interpretación física de los términos de anchura eficaz.....	36
Figura 2-23 - Representación del momento en el plano en nudos en T y X.....	38
Figura 2-24 - Representación del momento fuera del plano en nudos en T y X.....	39
Figura 2-25 - Representación nudo doble Y (DY).....	40

Figura 2-26 - Representación nudo KT.....	40
Figura 2-27 - Representación nudo doble K (DK) - Caso 1	41
Figura 2-28 - Representación nudo doble K (DK) - Caso 2	41
Figura 2-29 - Representación unión soldada acodada	42
Figura 2-30 - Representación cordón acodado.....	43
Figura 2-31 - Tensiones en la sección de la garganta de una soldadura en ángulo....	44
Figura 2-32 - Detalle de esfuerzos en soldaduras	46
Figura 2-33 - Tensiones abatidas del cordón de soldadura.....	47
Figura 2-34 - Tensiones en cordón transversal 1.....	47
Figura 2-35 - Tensiones en cordón transversal 2.....	48
Figura 2-36 - Tensiones en cordón longitudinal	49
Figura 3-1 - Estructura metálica de la nave	52
Figura 3-2 - Topología de la celosía	53
Figura 3-3 - Dimensiones principales de la celosía	53
Figura 3-4 - Relación de perfiles seleccionados.....	54
Figura 3-5 - Detalle en planta unión pilar a zapata.....	54
Figura 3-6 - Asignación de números a nudos y barras	55
Figura 3-7 - Uniones en K con espaciamiento.....	56
Figura 3-8 - Garganta mínima en soldaduras en ángulo	56
Figura 3-9 - Detalles de soldaduras.....	57
Figura 3-10 - Condiciones básicas de aplicación de soldaduras	57
Figura 3-11 - Detalle definición de nudos.....	58
Figura 3-12 - Detalle nudo 10 y 19 del cordón inferior	58
Figura 3-13 - Cargas por Cubierta (G_{k1})	59
Figura 3-14 - Cargas por correas (G_{k3}).....	59
Figura 3-15 - Cargas puntuales por Cubierta y correas ($G_{k1} + G_{k3}$).....	60
Figura 3-16 - Cargas por nieve	60
Figura 3-17 - Cargas puntuales por nieve	60
Figura 3-18 - Cargas por Uso.....	61
Figura 3-19 - Cargas puntuales por Uso	61
Figura 3-20 - Coeficientes eólicos.....	62
Figura 3-21 - Cargas por viento.....	62
Figura 3-22 - Cargas puntuales por viento.....	62
Figura 3-23 - Esfuerzos Axiales en las barras de la celosía.....	68
Figura 3-24 - Comprobación pandeo cordón superior guía ICT	70

Figura 3-25 - Comprobación pandeo cordón superior guía ICT (continuación)	70
Figura 3-26 - Resultado flecha máxima en Y	72
Figura 3-27 - Parámetros de la geometría del nudo en K	73
Figura 3-28 - Esfuerzos actuantes en el nudo en K	73
Figura 3-29 - Detalle del Nudo 2	78
Figura 3-30 - Excentricidad en nudo 2	82
Figura 3-31 - Cálculo de Momentos de la guía del ICT	82
Figura 3-32 - Detalle del Nudo 11	83
Figura 3-33 - Captura de pantalla programa CIDJOINT	86
Figura 3-34 - Símbolos de nudo en K soldado en CIDJoint	87
Figura 3-35 - Datos nudo n°2 en CIDJoint	88
Figura 3-36 - Datos nudo n°11 en CIDJoint	90
Figura 4-1 - Ventana principal <i>DINET</i>	95
Figura 4-2 - Ventana Descripción Perfil	96
Figura 5-1 - Ventana inicial de Robot para nudos de celosía de tubos	137
Figura 5-2 - Robot: Geometría del Nudo	138
Figura 5-3 - Robot: Ventana arriostramientos	139
Figura 5-4 - Robot: Vista general del nudo a escala	139
Figura 5-5 - Robot: Introducción de cargas para cálculo manual	140
Figura 5-6 - CoP2 VM: Pantalla General	141
Figura 5-7 - CoP2 VM: Ventana Members - Chord	142
Figura 5-8 - CoP2 VM: Ventana información perfil	142
Figura 5-9 - CoP2 VM: Ventana información material	143
Figura 5-10 - CoP2 VM: Ventana Members – Brace 1	143
Figura 5-11 - CoP2 VM: Ventana Members – Brace 2	144
Figura 5-12 - CoP2 VM: Ventana Connection	144
Figura 5-13 - CoP2 VM: Ventana Loading	145
Figura 5-14 - CoP2 VM: Ventana Results	146
Figura 5-15 - CoP2 VM: Detalle de resultados	146
Figura A-1 - Ventana principal	164
Figura A-2 - Panel datos generales	165
Figura A-3 - Panel tipo de nudo	166
Figura A-4 - Panel geometría del nudo	166
Figura A-5 - Panel cordón	167
Figura A-6 - Panel montante	167

X ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

Figura A-7 - Panel diagonal.....	168
Figura A-8 – Ventana descripción del perfil	168
Figura A-9 - Panel coeficientes de seguridad	169
Figura A-10 - Panel soldaduras	169
Figura A-11 - Panel esfuerzos en el nudo.....	170
Figura A-12 - Panel comprobación validez geométrica	171
Figura A-13 – Ventana visualización del nudo.....	171
Figura A-14 – Ventana visualización del nudo.....	172
Figura A-15 – Panel comentarios.....	172
Figura A-16 – Boton de validez general.....	173
Figura A-17 – Boton de validez nudo	173
Figura A-18 – Boton de informe	174
Figura A-19 – Ventana ratio unión.....	175
Figura A-20 - Créditos.....	176

Índice de tablas

Tabla 2.1 - Valores nominales del límite elástico y resistencia a la tracción (UNE EN 10210-1)	6
Tabla 2.2 - Valores nominales del límite elástico y resistencia a la tracción (UNE EN 10219-1)	6
Tabla 2.3 - Tipos de nudos y de carga.....	9
Tabla 2.4 - Condiciones para soldar en zonas conformadas en frío	15
Tabla 2.5 - Rango de validez para uniones soldadas entre diagonales CHS o RHS y cordones RHS	24
Tabla 2.6 - Coeficiente de imperfección para las curvas de pandeo en perfiles huecos	33
Tabla 2.7 - Coeficiente de correlación para soldaduras en ángulo (Tabla 4.1 EN 1993-1-8:2005)	45
Tabla 3.1 - Coordenadas de los nudos	55
Tabla 3.2 - Estados de combinación de cargas para el Cálculo del Estado Límite Último y de Servicio	65
Tabla 3.3 - Comparativa resultados análisis estructural	68
Tabla 4.1 - Vinculación entre programas y variables.....	128
Tabla 5.1 - Comparación entre resultados obtenidos con los distintos programas para el cálculo de la resistencia a los tipos de fallo del nudo 2.....	147
Tabla 5.2 - Comparación entre resultados obtenidos con los distintos programas para el cálculo de la resistencia a los tipos de fallo del nudo 11.....	148
Tabla 5.3 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Transversal 1	150
Tabla 5.4 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura de l nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Transversal 2.....	150

XII ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

Tabla 5.5 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Longitudinal	150
Tabla 5.6 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Transversal 1	150
Tabla 5.7 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Transversal 2.....	150
Tabla 5.8 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Longitudinal	151
Tabla 5.9 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Transversal 1	151
Tabla 5.10 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura de l nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Transversal 2	151
Tabla 5.11 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Longitudinal.....	151
Tabla 5.12 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Transversal 1	151
Tabla 5.13 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Transversal 2	151
Tabla 5.14 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Longitudinal.....	152
Tabla 5.15 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 2 – Diagonal 1.....	152
Tabla 5.16 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 2 – Diagonal 2.....	152
Tabla 5.17 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 11 – Diagonal 1.....	152
Tabla 5.18 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 11 – Diagonal 2.....	152

Lista de símbolos

ABREVIATURAS

CHS	para perfil hueco de sección circular (Circular Hollow Section)
RHS	para perfil hueco de sección rectangular (Rectangular Hollow Section)
SHS	para perfil hueco de sección cuadrada (Square Hollow Section)

MAYÚSCULAS ROMANAS

A_i	área transversal del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
A_v	área resistente frente al esfuerzo cortante del cordón
$A_{v,eff}$	área eficaz frente al esfuerzo cortante del cordón
L	longitud del elemento
$M_{ip,i,Rd}$	resistencia de la unión expresada en momento flector interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3) en el plano de la unión
$M_{ip,i,Ed}$	valor de cálculo del momento flector interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3) en el plano de la unión
$M_{op,i,Rd}$	resistencia de la unión expresada en momento flector interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3) fuera del plano de la unión
$M_{op,i,Ed}$	valor de cálculo del momento flector interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3) fuera del plano de la unión
$N_{i,Rd}$	resistencia de la unión expresada en esfuerzo axil interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
$N_{i,Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo axil interno del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
$N_{p,Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo axil en el cordón, en la zona de espaciamiento, entre diagonales.
V_{Ed}	valor máximo de las componentes perpendiculares al eje del cordón de los esfuerzos axiales de las diagonales (cortante máximo en el cordón)
$V_{pl,Rd}$	resistencia plástica a cortante del cordón
$W_{el,i}$	módulo resistente elástico de la sección del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
$W_{pl,i}$	módulo resistente plástico de la sección del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)

MINÚSCULAS ROMANAS

a	espesor de garganta de una soldadura en ángulo
b_i	anchura transversal al plano de la unión, del perfil hueco de sección rectangular (RHS) del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
b_{eff}	anchura eficaz de la diagonal en la conexión al cordón
$b_{e,ov}$	anchura eficaz de la barra de relleno que recubre en la conexión a la barra de relleno recubierta en una unión con solape
$b_{e,p}$	anchura eficaz a punzonamiento
e	excentricidad de la unión
f_b	resistencia a pandeo de la cara lateral del cordón
f_{yi}	límite elástico del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)
f_u	resistencia nominal última a tracción de la parte más débil de la unión
g	espaciamiento entre las diagonales de una unión en K o N
g_a	funciones para comprobar la validez general del nudo
g_b	funciones para comprobar el cumplimiento de las condiciones de validez geométrica
g_r	funciones para obtener el valor de resistencia para cada tipo de fallo del nudo
h_i	canto total de la sección del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3) en el plano de la unión
i	subíndice que se utiliza para designar un elemento de la unión ($i = 0$ denota un cordón, e $i = 1, 2$ o 3 , hacen referencia a las diagonales y montante)
j	subíndice que se utiliza en uniones solapadas, siendo entonces el subíndice i el que designa la diagonal que recubre y j para designar la diagonal recubierta
k	coeficientes utilizados para los cálculos, con el subíndice g, m, n o p
n	ratio utilizado para los cálculos, referido a la tensión en el cordón
p	longitud de la proyección del área de contacto de la diagonal que solapa sobre la cara de conexión del cordón, en ausencia de la diagonal recubierta
q	longitud de solape, medida en la cara de conexión del cordón, entre las diagonales de una unión en K o en N
r	radio exterior de redondeo de la arista en perfiles huecos de sección rectangular
t_i	espesor de la pared del elemento i ($i = 0, 1, 2$ o 3)

MINÚSCULAS GRIEGAS

α	coeficiente de imperfección para las curvas de pandeo en perfiles huecos
β	ratio utilizado para los cálculos, referido a la relación entre la anchura media de las diagonales y la anchura del cordón
β_w	coeficiente de correlación utilizado para la comprobación de soldaduras en ángulo, que depende del material

γ	ratio utilizado para los cálculos, referido a la relación entre la anchura del cordón y el doble de su espesor de pared
γ_{M0}	coeficiente parcial de seguridad general para análisis de estructuras
γ_{M2}	coeficiente parcial de seguridad para soldaduras
γ_{M5}	coeficiente parcial de seguridad para uniones de celosías de perfiles huecos
η_i	ratio utilizado para los cálculos, referido a la relación entre el canto de la diagonal i ($i = 1, 2$ o 3) y la anchura del cordón
θ_i	ángulo entre la diagonal i ($i = 1$ o 2) y el cordón
κ	coeficiente adimensional para la comprobación de uniones acodadas
$\bar{\lambda}$	esbeltez relativa adimensional, utilizado en el cálculo a pandeo
λ_{ov}	solape entre dos diagonales expresado como un porcentaje
$\lambda_{ov,lim}$	solape entre dos diagonales para el que el cortante entre la diagonal y la cara del cordón puede ser crítico
$\sigma_{0,Ed}$	máxima tensión de compresión en el cordón en una unión
σ_1	tensión normal perpendicular a la garganta de soldadura
τ_1	tensión tangencial en el plano de la garganta, perpendicular al eje de la soldadura
τ_2	tensión tangencial en el plano de la garganta, paralela al eje de la soldadura
σ_{co}	tensión de comparación para la comprobación de la tensión máxima en la soldadura
$\sigma_{p,Ed}$	valor de $\sigma_{0,Ed}$ excluyendo la tensión debida a las componentes paralelas al eje del cordón de los esfuerzos axiales que actúan en las diagonales
ϕ	defecto inicial global de verticalidad, utilizado en el cálculo a pandeo
χ	coeficiente de reducción, utilizado en el cálculo a pandeo

Capítulo 1

Introducción

1.1 GENERALIDADES

En la naturaleza existen numerosos ejemplos que demuestran las excelentes propiedades de los perfiles tubulares como elementos estructurales resistentes a la compresión, la tracción, la flexión y la torsión. Las secciones tubulares han demostrado ser la forma más adecuada para los elementos sometidos a la fuerza del viento, el agua o las olas. Además, las estructuras fabricadas con perfiles tubulares presentan una superficie menor que las estructuras comparables de perfiles abiertos. Este hecho, combinado con la ausencia de esquinas pronunciadas, hace que la protección frente a la corrosión sea mejor. Los perfiles tubulares combinan estas características con un atractivo aspecto desde el punto de vista arquitectónico.

Estas excelentes propiedades permiten la creación de diseños ligeros y "abiertos" con un menor número de uniones simples en las que, a menudo, se pueden eliminar las cartelas o placas rigidizadoras. Dado que la resistencia de la unión depende de las propiedades geométricas de los elementos, el diseñador sólo podrá obtener un diseño óptimo si comprende el comportamiento del nudo y lo tiene en cuenta a la hora de realizar el diseño conceptual. Aunque el coste unitario material de los perfiles tubulares es superior al de los perfiles abiertos, esta diferencia puede compensarse por el menor peso de la construcción, la menor superficie exterior a proteger contra la corrosión y la reducción del coste de fabricación gracias a la aplicación de uniones simples sin elementos rigidizadores. Existen numerosos ejemplos de aplicaciones estructurales que muestran que las estructuras tubulares pueden competir desde el punto de vista económico con los diseños con perfiles abiertos.

Los costes de fabricación de toda estructura metálica dependen principalmente de las horas de mano de obra necesarias para producir los componentes estructurales. El número de horas no tiene porqué ser mayor en el diseño con perfiles tubulares (RHS o CHS) que con perfiles abiertos, y puede ser incluso menor dependiendo de las configuraciones de la unión. A este respecto es imprescindible que el proyectista tenga en cuenta que, por ejemplo, la selección de componentes de celosía de perfil estructural tubular, determina la complejidad de las uniones en los nudos. No es de esperar que las barras seleccionadas por peso mínimo puedan unirse en un tiempo

mínimo de trabajo. Esto rara vez sucederá porque la eficiencia de las uniones de perfiles tubulares es una función sutil de una serie de parámetros que se definen por las dimensiones relativas de los elementos que se conectan.

Los costes de manipulación y montaje pueden ser menores para las celosías de perfiles tubulares que para otras celosías alternativas. Su mayor rigidez y resistencia transversal las hace más fáciles de levantar y más estables durante su montaje. Además, las celosías compuestas por perfiles tubulares es probable que sean más ligeras que otras similares fabricadas con perfiles no tubulares, ya que las barras de la celosía están principalmente cargadas axialmente, y los perfiles estructurales tubulares presentan un aprovechamiento más eficiente de la sección transversal de acero en compresión.

Los costes de protección son significativamente más bajos para celosías de perfil tubular que para otras celosías. Un perfil tubular cuadrado tiene aproximadamente $2/3$ de superficie exterior que un perfil en "I" del mismo tamaño, y las celosías de perfil tubular pueden tener barras más pequeñas, como resultado de su mayor eficiencia estructural. La ausencia de ángulos entrantes hace más fácil la aplicación de pintura o protección contra el fuego y su duración puede ser más larga. Los perfiles tubulares rectangulares (que incluyen a los cuadrados), si están cerrados en los extremos, sólo tienen cuatro superficies que pintar, mientras que para un perfil en "I", habría que pintar ocho superficies planas. Todas estas características suponen para las estructuras de sección tubular menos material y menos mano de obra.

La galvanización por inmersión en caliente de perfiles tubulares o subconjuntos soldados de estructuras tubulares proporciona una liberación parcial, a la vez que repentina, de las tensiones del elemento o del conjunto fabricado. Además de la potencial deformación del elemento, que debe considerarse y compensarse antes de llevar a cabo el proceso de galvanización, el acero seleccionado debe ser adecuado para someterse a dicho proceso (no deben emplearse aceros calmados al silicio; sólo deben emplearse aceros con un contenido de Si limitado).

Las uniones de perfiles tubulares circulares son más caras de realizar que las uniones de perfiles tubulares rectangulares. Los nudos CHS precisan de un corte espacial de los extremos de las barras, cuando van a ser unidos directamente, a no ser que las barras de relleno sean mucho menores que los cordones. Además, en aquellas estructuras en las que los paneles o cubierta se colocan directamente sobre el cordón superior de las celosías, los RHS ofrecen superficies mayores que los CHS para conectar y soportar la cubierta. Otros aspectos a tener en consideración al elegir entre perfiles tubulares circulares y rectangulares son la relativa facilidad de colocar en los RHS chapas dorsales para la soldadura, y para manejar y apilar RHS.

Las configuraciones de los nudos son cada vez más económicas siguiendo este orden: recubrimiento parcial, recubrimiento total y espaciado. Los nudos con espaciado tienen la ventaja de un único corte de bisel, si el cordón es un RHS, y una facilidad total de ajuste. En los buenos diseños, debe existir una separación mínima $g \geq t_1 + t_2$ que permita que las soldaduras no se solapen entre sí. Los nudos con recubrimiento parcial tienen cortes dobles con mínima flexibilidad de ajuste.

En estructuras en celosía comunes (por ejemplo, cerchas), cerca del 50% del peso del material se usa para los cordones comprimidos, aproximadamente un 30% para el cordón traccionado y cerca de un 20% para las barras de relleno. Esto significa que, con respecto al peso del material, los cordones comprimidos serían los

elementos a optimizar, obteniendo perfiles con paredes finas. Sin embargo, en cuanto a la protección contra la corrosión (pintura), debería minimizarse la superficie exterior.

La resistencia de los nudos aumenta al disminuir la relación entre la anchura y altura del cordón y el espesor b_0/t_0 y h_0/t_0 , respectivamente, y al aumentar la relación entre el espesor del cordón y el espesor de la barra de relleno t_0/t_i . Sin embargo, desde un punto de vista de resistencia al pandeo (como elemento estructural aislado), un perfil de dimensiones exteriores grandes y espesor pequeño es más eficaz frente a esfuerzos de compresión. Como resultado, la relación final entre la anchura-altura y el espesor para el cordón comprimido será un compromiso entre la resistencia del nudo y la resistencia del elemento al pandeo, lo que normalmente llevará a la elección de perfiles relativamente robustos. Además, las barras de relleno deben tener espesores de pared pequeños, considerando también, que con paredes finas requerirán soldaduras en ángulo más pequeñas que en el caso de riostras de gran espesor (el volumen de soldadura es proporcional a t^2).

En cuanto al cordón traccionado, la relación entre la anchura y altura y el espesor b_0/t_0 y h_0/t_0 , respectivamente, deben elegirse de forma que sea lo más pequeña posible. En el diseño de estructuras tubulares, el diseñador debe tener en cuenta que los costes de la estructura dependen, en gran medida, de los costes de fabricación. Esto significa que deben minimizarse los costes asociados al corte, preparación de extremos y soldadura.

Los costes de soldadura se ven afectados por la geometría de las uniones, el tipo de soldadura y el tamaño de la misma. Las soldaduras en ángulo, normalmente no requieren la preparación de superficies de bisel que es inherente a casi todas las soldaduras a tope o de penetración total o parcial. Una soldadura en ángulo de 12 mm tiene el doble de resistencia que una de 6 mm, sin embargo tiene cuatro veces su volumen. Por lo tanto, el coste por unidad de resistencia es claramente favorable con menores espesores de los elementos y con soldaduras de menor tamaño. Con respecto a la geometría de la soldadura, una barra de relleno de RHS, cuya anchura sea la misma que un elemento de cordón de RHS, presenta una situación en la que las paredes de los lados de la barra de relleno se alinean con las esquinas redondeadas del cordón. Dependiente del radio de la esquina y de los espesores de la pared, en el mejor de los casos hay una unión de bisel con abocinamiento (más dificultoso que un cordón en ángulo), o más probablemente, en especial para secciones conformadas en frío, un bisel con abocinamiento con una separación que requiere una chapa dorsal ajustada a la medida. Por ello, son más económicas las uniones de anchura menor que la total entre barra de relleno de RHS y cordón.

Un ángulo inferior a 30° entre la barra de relleno y el cordón crea serias dificultades de soldadura en el talón de la conexión por lo que se recomienda que los ángulos entre barras sean superiores a este valor. Sin embargo, ángulos inferiores a 30° son posibles si el cálculo se realiza tomando un valor de 30° y el fabricante demuestra que se puede realizar una soldadura satisfactoria.

Las piezas de unión, tales como cartelas, obviamente añaden costes de material y mano de obra. Los rigidizadores y otros tipos de refuerzo, que incrementan de igual manera los costes, deberían mantenerse siempre al mínimo y ser utilizados únicamente cuando realmente se necesiten (por ejemplo, para reparaciones).

4 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se ha seleccionado para la verificación en este proyecto las estructuras tubulares formadas por tubos RHS.

Capítulo 2

Verificación de nudos de estructuras tubulares según Eurocódigo 3

2.1 INTRODUCCIÓN

Se ha decidido emplear como base normativa para el cálculo de los elementos considerados en este proyecto la colección de códigos, de ámbito europeo, denominados Eurocódigos Estructurales. En concreto, de todos ellos, serán de especial aplicación en este proyecto las siguientes normas:

- EN 1990 Eurocódigo: Bases de cálculo de estructuras
- EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras
- EN 1993 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

Cada una de las normas se organizan internamente por partes. La norma UNE-EN 1993-1-8:2011 es la versión oficial, en español, de la norma europea EN 1993-1-8:2005 y EN 1993-1-8:2005/AC:2009, y corresponde a la parte dedicada a las uniones dentro de la norma EN 1993. Además, el capítulo 7 está dedicado específicamente a las uniones de perfiles huecos, por lo que se ha escogido como referencia normativa para la verificación de los perfiles tubulares en este proyecto. Con el fin de facilitar su consulta, se ha incluido al final del presente proyecto como Anejo.

En este capítulo se empezará realizando una descripción de las características específicas de las estructuras realizadas con perfiles tubulares. Se continuará con una descripción de los tipos de fallo catalogados para los nudos de este tipo de estructuras. Y se terminará por exponer la formulación que propone el Eurocódigo 3, para la verificación del diseño de dichos nudos.

En este proyecto se utilizarán de forma general tres abreviaturas para identificar los perfiles huecos:

- **CHS:** para perfiles huecos de sección circular (Circular Hollow Section)
- **RHS:** para perfiles huecos de sección rectangular (Rectangular Hollow Section)
- **SHS:** para perfiles huecos de sección cuadrada (Square Hollow Section)

2.2 ESTRUCTURAS CON PERFILES TUBULARES

2.2.1 Bases de cálculo generales

Los métodos de cálculo dados en la Norma EN 1993-1-8 toman como hipótesis que el procedimiento de construcción se adecúa a lo especificado en las normas de ejecución de la norma y que los materiales y productos de construcción son los especificados en la Norma EN 1993 o en las especificaciones de materiales y productos correspondientes.

Los valores nominales del límite elástico f_y y de la resistencia a tracción f_u para perfiles tubulares estructurales son los indicados en las tablas adjuntas para perfiles huecos de acero para la construcción de acero no aleado según las normas EN 10210-1:2006 y EN 10219-1:2006, en lugar de los valores indicados en la norma EN 1993-1-1:2005, por ser más actuales.

Tabla 2.1 - Valores nominales del límite elástico y resistencia a la tracción (UNE EN 10210-1)

Clase de acero		Límite elástico mínimo R_{eH} MPa						Resistencia a la tracción R_m MPa		
		Espesor nominal mm						Espesor nominal mm		
Designación simbólica	Designación numérica	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120	≤ 3	> 3 ≤ 100	> 100 ≤ 120
S235JRH ^c	1.0039	235	225	215	215	215	195	360-510	360-510	350-500
S275J0H ^c	1.0149	275	265	255	245	235	225	430-580	410-560	400-540
S275J2H	1.0138									
S355J0H ^c	1.0547	355	345	335	325	315	295	510-680	470-630	450-600
S355J2H	1.0576									
S355K2H	1.0512									

Tabla 2.2 - Valores nominales del límite elástico y resistencia a la tracción (UNE EN 10219-1)

Clase de acero		Límite elástico mínimo R_{eH} MPa		Resistencia a la tracción R_m MPa	
		Espesor nominal mm		Espesor nominal mm	
Designación simbólica	Designación numérica	≤ 16	> 16 ≤ 40	< 3	≥ 3 ≤ 40
S235JRH ^a	1.0039	235	225	360-510	360-510
S275J0H ^a	1.0149	275	265	430-580	410-560
S275J2H	1.0138				
S355J0H ^a	1.0547	355	345	510-680	470-630
S355J2H	1.0576				
S355K2H	1.0512				

Los valores de cálculo de las propiedades del material para los aceros estructurales contemplados en el Eurocódigo 3 son los siguientes:

- Módulo de elasticidad (E): 210.000 N/mm²
- Módulo de elasticidad transversal (G): 81.000 N/mm²
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica lineal (α): 12×10^{-6} K⁻¹ (para $T^a \leq 100$ °C)

Se han considerado los siguientes coeficientes de seguridad de acuerdo al Eurocódigo 3 y confirmados por la Instrucción de Acero Estructural española (EAE):

- Resistencia de soldaduras:

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

- Resistencia de uniones de celosías de perfiles huecos:

$$\gamma_{M5} = 1,00$$

En el cálculo de las uniones se puede utilizar el análisis elástico lineal o el análisis elástico-plástico.

Las uniones deben diseñarse en base a una hipótesis realista de la distribución de fuerzas y momentos internos. Las reglas de aplicación dadas en la norma EN 1993-1-8, satisfacen las siguientes hipótesis para determinar la distribución de las fuerzas:

- las fuerzas y momentos internos que se suponen en el análisis están en equilibrio con las fuerzas y los momentos aplicados en las uniones,
- cada elemento de la unión es capaz de resistir las fuerzas y momentos internos,
- las deformaciones que se deriven de esta distribución no superan la capacidad de deformación de los elementos de fijación o soldaduras de los elementos unidos,
- la distribución supuesta de fuerzas internas debe ser realista respecto a la rigidez relativa de la unión,
- las deformaciones supuestas en cualquier modelo de cálculo basado en el análisis elástico-plástico se basan en rotaciones de sólido rígido y/o en deformaciones en el plano que sean físicamente posibles, y
- cualquier modelo que se utilice es conforme con la evaluación de los resultados de los ensayos (véase la Norma EN 1990).

2.2.2 Bases de cálculo específicas para el análisis global de vigas en celosía

La norma EN 1993-1-8, en el apartado 5.1 correspondiente al análisis global de las uniones en estructuras de acero, indica que: “Los efectos del comportamiento de las uniones en la distribución de los esfuerzos internos y los momentos en una estructura, y en las deformaciones generales de la estructura, deberían generalmente tenerse en cuenta, aunque cuando estos efectos sean suficientemente pequeños pueden despreciarse.”

Para identificar si es necesario tener en cuenta en el análisis los efectos del comportamiento de la unión, se puede establecer según dicha norma, una distinción entre tres tipos de modelos de uniones simplificados:

- Simple, en el cual se puede considerar que la unión no transmite momentos flectores
- Continuo, en el que se puede asumir que el comportamiento de la unión no tiene ningún efecto en el análisis
- Semi-continuo, en el que es necesario tener en cuenta el comportamiento de la unión en el análisis.

De acuerdo al apartado 5.1.5 de la norma EN 1993-1-8, la distribución de esfuerzos axiales en una viga en celosía de perfiles huecos puede determinarse considerando que los elementos están unidos mediante uniones articuladas.

Los momentos secundarios en las uniones, causados por su rigidez rotacional, pueden despreciarse en el cálculo, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- la geometría de la unión se encuentra dentro del rango de validez correcto de acuerdo al apartado 2.3.3.
- La relación entre la longitud y el canto del elemento en el plano de la viga en celosía, no es inferior al valor mínimo correspondiente, según apartado 2.3.2.
- La excentricidad está dentro de unos límites especificados, según apartado 2.3.2.

Los momentos resultantes de las cargas transversales (tanto en el plano como fuera del mismo) que se apliquen directamente en los nudos, deberían tenerse en cuenta en el cálculo de los elementos en los que se aplican, siempre y cuando se cumplan las condiciones del punto anterior, teniendo en cuenta que:

- las diagonales pueden considerarse como articuladas a los cordones, por lo que los momentos resultantes de las cargas transversales aplicadas a los cordones no necesitan distribuirse a las diagonales, y viceversa;
- los cordones pueden considerarse como vigas continuas, con apoyos simples en los nudos.

Los momentos resultantes de las excentricidades de las uniones pueden despreciarse en el cálculo de los cordones a tracción y diagonales.

Cuando las excentricidades estén dentro de los límites dados en el apartado 2.3.2, los momentos debidos a las excentricidades deberían tenerse en cuenta en el cálculo de los cordones sometidos a compresión. En este caso, los momentos producidos por la excentricidad deberían distribuirse entre los elementos del cordón en compresión a cada lado de la unión, en función de sus coeficientes de rigidez relativa I/L , donde L es la longitud del elemento, medida entre los nudos.

Cuando las excentricidades estén fuera de los límites dados en el apartado 2.3.2, los momentos resultantes de las excentricidades deberían tenerse en cuenta en el cálculo de las uniones y de los elementos. En este caso, los momentos producidos por la excentricidad deberían distribuirse entre todos los elementos de la unión, en función de sus coeficientes de rigidez relativa I/L .

Las tensiones resultantes de los momentos considerados en el cálculo del cordón, también se tendrán en cuenta para determinar los coeficientes k_m , k_n y k_p utilizados en el cálculo de las uniones.

2.2.3 Tipología de las uniones de vigas en celosía con perfil hueco

Los tipos de nudos y de sollicitación (carga) tratados en la guía de diseño del ICT, así como en la norma EN 1993-1-8, se encuentran resumidos en la siguiente tabla. Un “sí” en la tabla significa que la guía proporciona reglas de cálculo para estos tipos de nudos, mientras que un “no” indica que no están disponibles o no son necesarias reglas de cálculo.

Tabla 2.3 - Tipos de nudos y de carga

Tipo de nudo: u = plano m = multiplanar Tipo de perfil: CHS = perfiles tubulares circulares RHS = perfiles tubulares rectangulares		Sollicitación en la barra de relleno			Sollicitación en el cordón	
		Esfuerzo axial	Flexión en el plano	Flexión fuera del plano	Esfuerzo axial	Flexión en el plano
CHS	T/Y u	sí	sí	sí	no	no
	X u	sí	sí	sí	no	no
	K(espaciamiento) u	sí	no	no	sí	sí
	XX m	sí	sí	sí	sí	no
	KK(espaciamiento)m	sí	no	no	sí	sí
RHS	T/X u	sí	sí	no	sí	sí
	K(espaciamiento) u	sí	no	no	sí	sí
	K(recubrimiento) u	sí	no	no	sí	sí
	KK(espaciamiento)m	sí	no	no	sí	sí

Las figuras adjuntas, muestran de manera esquemática los tipos de nudos, y los tipos de cargas.

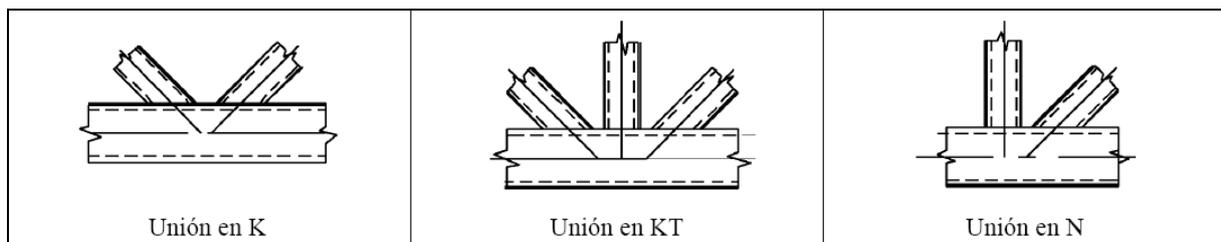


Figura 2-1 - Tipos de nudos 1

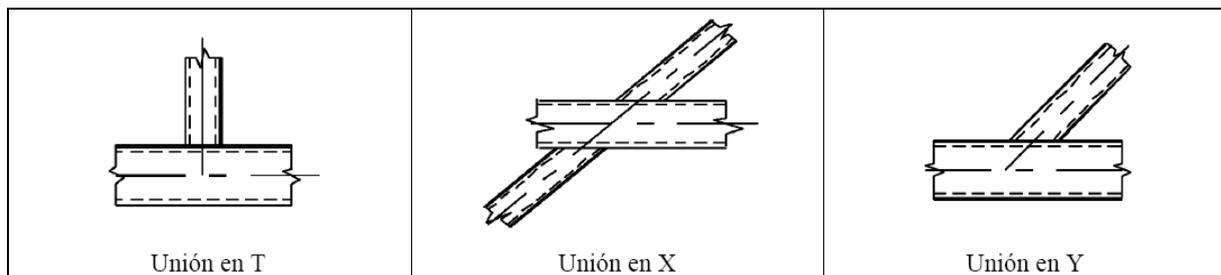


Figura 2-2 - Tipos de nudos 2

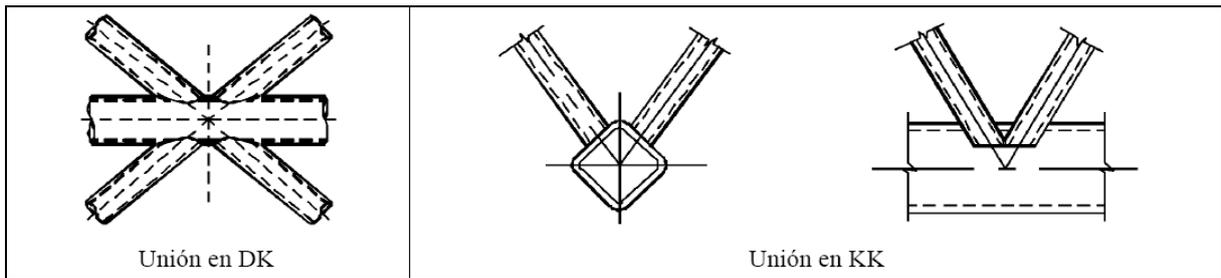


Figura 2-3 - Tipos de nudos 3

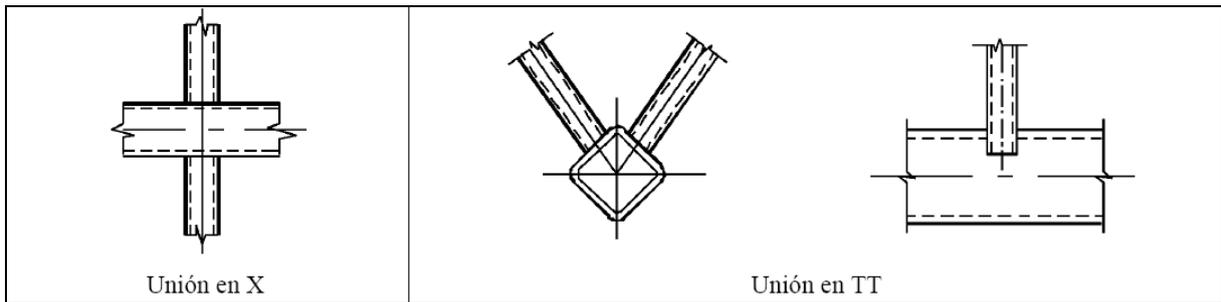


Figura 2-4 - Tipos de nudos 4

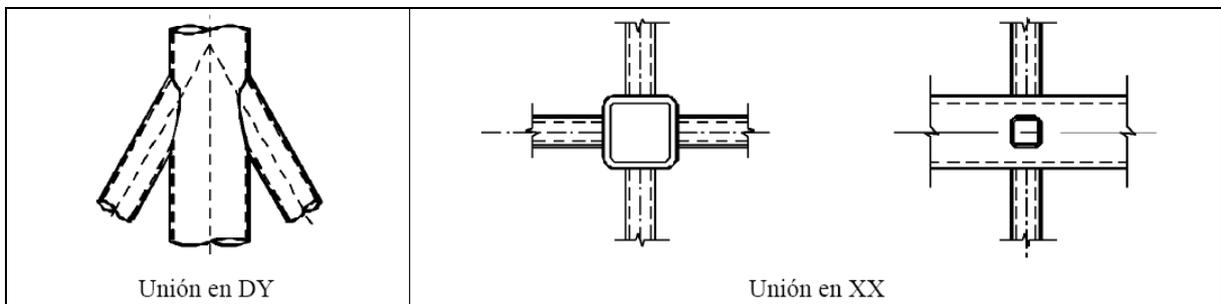


Figura 2-5 - Tipos de nudos 5

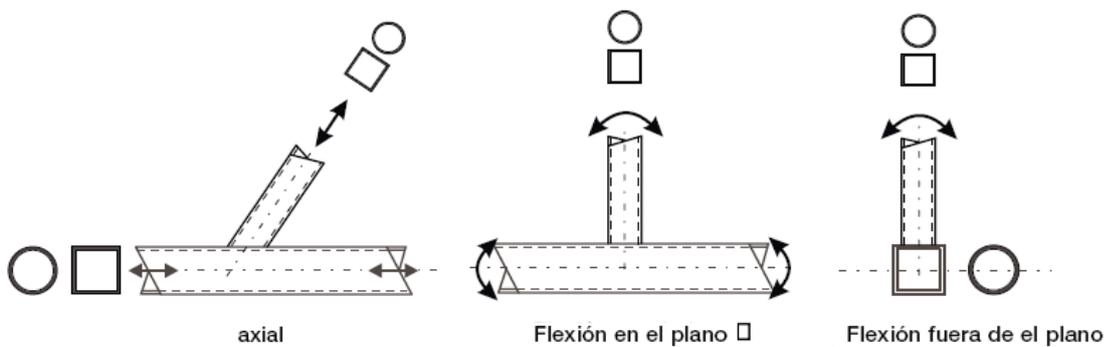


Figura 2-6 - Tipos de solicitaciones (cargas)

2.2.4 Bases de cálculo específicas en el cálculo de uniones de perfiles huecos

Además de las comprobaciones realizadas para el análisis global de las vigas en celosía, para poder aplicar las reglas de cálculo en los nudos, es preciso que se cumplan las siguientes condiciones de validez generales, de acuerdo al apartado 7.1.2 de la norma EN 1993-1-8:

1. Estas reglas de aplicación son válidas tanto para los perfiles huecos acabados en caliente conformes con la Norma EN 10210, como para los perfiles huecos conformados en frío según la Norma EN 10219.
2. Para los perfiles huecos acabados en caliente y para los perfiles huecos conformados en frío el límite elástico nominal del producto final no debería superar los 460 N/mm². Para productos finales con un límite elástico nominal superior a 355 N/mm², las resistencias de cálculo estático deberían reducirse mediante un coeficiente de 0,9.
3. El espesor nominal de los perfiles huecos no debería ser inferior a 2,5 mm.
4. El espesor nominal de los perfiles huecos, cuando constituyan el cordón de una celosía, no debería ser superior a 25 mm a menos que se hayan adoptado medidas especiales para asegurar la resistencia transversal del material.
5. Las secciones de elementos comprimidos deberían cumplir los requisitos para secciones de Clase 1 o Clase 2 ante esfuerzos de compresión pura según la Norma EN 1993-1-1 (se comprueba en 2.3.3)
6. Los ángulos θ_i entre los cordones y las diagonales, y entre diagonales adyacentes, deberían cumplir: $\theta_i \geq 30^\circ$.
7. Los extremos de los elementos que confluyen en una unión deberían estar preparados de modo que no se modifique la forma de su sección transversal. Las uniones de extremo aplastado y aplastado-cizallado no se incluyen aquí.
8. En uniones con espaciamiento, y con el fin de asegurar una separación suficiente para poder ejecutar correctamente la soldadura, éste no debería ser inferior a $(t_1 + t_2)$.
9. En uniones con solape, éste debería ser lo suficientemente amplio para asegurar que la transferencia del esfuerzo cortante de una diagonal a la otra es adecuada. En cualquier caso, el solape debería ser de al menos un 25%. Si el solape supera $\lambda_{ov,lim} = 60\%$ en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada no esté soldada, o $\lambda_{ov,lim} = 80\%$ en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada esté soldada, o si las diagonales son secciones rectangulares con $h_i < b_i$ y/o $h_j < b_j$, la conexión entre las diagonales y la cara del cordón debería comprobarse a cortante.
10. En aquellas uniones cuyas diagonales superpuestas tengan diferentes espesores y/o diferentes límites elásticos (aquí se considera un único límite elástico para todas las diagonales), el elemento con menor valor $t_i \cdot f_{yi}$ debería recubrir al otro elemento.
11. En aquellas uniones cuyas diagonales superpuestas tengan diferentes anchuras, el elemento más estrecho debería recubrir al más ancho.

Para que la formulación propuesta por la norma EN 1993-1-8 para el cálculo de la resistencia del nudo sea válida (descrita en el apartado 2.3.4), es preciso que la geometría del nudo este dentro de unos rangos de validez establecidos por la misma norma. La verificación de dichos rangos de validez queda completamente descrita en la formulación desarrollada en el apartado 2.3.3 de este proyecto.

2.2.5 Cálculo de uniones de perfiles huecos

Para el cálculo de las uniones de perfiles huecos, se tendrán en cuenta las siguientes condiciones:

- El esfuerzo axial interno que actúa tanto en las diagonales como en los cordones en el estado límite último no debe ser superior a las resistencias de cálculo de los elementos, determinadas conforme a la Norma EN 1993-1-1. (este cálculo no va a ser objeto de este proyecto, y se supondrá que los perfiles empleados para el cálculo de las uniones son los que cumplen este punto).
- El esfuerzo axial interno que actúa en las diagonales en el estado límite último tampoco debe exceder la resistencia de cálculo de las uniones. Este punto se encuentra desarrollado en el apartado 2.3.4 de este proyecto.

2.2.6 Soldaduras

Las uniones soldadas habituales, para este tipo de perfiles, pueden clasificarse en tres grupos:

- Soldaduras a tope
- Soldaduras en ángulo
- Soldaduras en bordes curvos.

En todos estos tipos de soldadura, el material de aportación tendrá un límite elástico y una resistencia última a tracción para el material depositado, al menos igual a la del acero a soldar y por lo tanto, se empleará como tensión de referencia la correspondiente a la tensión de trabajo del acero del material a soldar. Así, siempre se estará del lado de la seguridad.

Además de su resistencia a la tracción, todo material depositado debe garantizar un alargamiento en rotura superior al 22% y una resiliencia en concordancia con la calidad del acero y el tipo de estructura no menor que 5 kg·m/cm².

Además, las soldaduras que unen las diagonales a los cordones deben tener suficiente resistencia como para poder tener en cuenta distribuciones no uniformes de tensiones y suficiente capacidad de deformación para tener en cuenta redistribuciones de momentos flectores.

En las soldaduras a tope, debe comprobarse la ausencia de discontinuidades y defectos que debiliten la sección resistente, no debiendo aceptarse sobreespesores en el lado de la cara y raíz superior al 10% del espesor del tubo más delgado a unir.

Al soldar diferentes espesores o anchos de chapas deben ajustarse mediante suaves transiciones inclinadas con pendientes no mayores del 25%.

Verificadas que las uniones a tope cumplen con las indicaciones anteriores, se establece que las uniones a tope no requieren cálculo.

En las soldaduras en ángulo, el cálculo de su resistencia está basado en la determinación de su garganta a y su longitud eficaz l .

Excepto en el caso de ciertos nudos en K y N con barras de relleno parcialmente solapadas, la soldadura en la unión debe ejecutarse alrededor del perímetro completo de la barra de relleno mediante una soldadura a tope, una soldadura en ángulo o una combinación de ambas. Por lo tanto, el término de longitud eficaz corresponderá a todo el perímetro del tubo soldado.

El espesor de garganta efectivo, a , de una soldadura en ángulo debería tomarse como la altura del mayor triángulo (con lados iguales o diferentes) que se pueda inscribir entre las superficies de fusión y la superficie de la soldadura, medido en dirección perpendicular al lado exterior del triángulo.

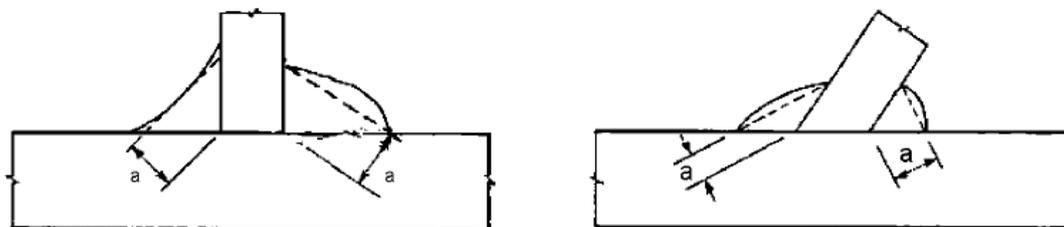


Figura 2-7 - Detalle de la garganta de una soldadura

Definiendo soldaduras capaces de reproducir una resistencia igual o mayor a la de la propia barra de relleno que unen, el diseñador puede olvidarse del cálculo de la misma. La guía de diseño del ICT, plantea, de acuerdo a las indicaciones del Eurocódigo 3 (CEN, 2005b), los siguientes espesores mínimos de garganta ‘ a ’ para soldaduras en ángulo alrededor de las barras de relleno cumplen con estos requisitos, considerando que se utilizan electrodos adecuados y clases de acero según ISO (IIW, 2008):

$$a = \sqrt{2} \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot \beta_w \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot t \quad (2.1)$$

$$a \geq 0,92 t, \text{ para S235 } (f_y/f_u = 235/360 \text{ N/mm}^2)$$

$$a \geq 0,96 t, \text{ para S275 } (f_y/f_u = 275/430 \text{ N/mm}^2)$$

$$a \geq 1,10 t, \text{ para S355 } (f_y/f_u = 355/510 \text{ N/mm}^2)$$

siendo t el espesor de la barra de relleno, β_w el coeficiente de correlación definido en la tabla 4.1 de la norma EN 1993-1-8 y teniendo en cuenta que el espesor de garganta efectivo ‘ a ’ de una soldadura en ángulo no debería ser inferior a 3 mm.

En el caso de nudos en K y N con recubrimiento, la soldadura de la puntera de la barra solapada sobre el cordón es especialmente importante en situaciones de recubrimientos del 100%. Para recubrimientos parciales, la puntera de la barra solapada no necesita soldarse, siempre que las componentes normales al cordón de los esfuerzos de las barras de relleno no difieran en más de un 20%. La barra de relleno de mayor anchura debe ser el ‘elemento pasante’. Si ambas riostras tienen la misma anchura, la riostra de mayor espesor debe ser la riostra solapada (pasante) y debe pasar ininterrumpidamente hasta el cordón. Si ambas riostras tienen el mismo tamaño (dimensión exterior y espesor), la barra de relleno más fuertemente cargada debe ser el ‘elemento pasante’. Si las componentes normales al cordón del esfuerzo en las barras de relleno difieren en más del 20%, debe soldarse todo el perímetro de la riostra pasante en contacto con el cordón.

En general, el elemento más débil (definido por el espesor de la pared multiplicado por el límite elástico) es el que debe acoplarse al elemento más fuerte,

independientemente del tipo de carga; por otro lado, los elementos más pequeños deben asentarse sobre los elementos más grandes.

Resulta más económico usar soldaduras en ángulo que soldaduras a tope. Sin embargo, el límite superior para el tamaño de la garganta o del cateto de las soldaduras en ángulo dependerá del fabricante de la estructura. La mayoría de las normativas de soldadura sólo permiten la soldadura en ángulo en la puntera de una barra de relleno si $\theta_i \geq 60^\circ$. Debido a la dificultad existente para ejecutar la soldadura en el talón de las barras de relleno con valores bajos de θ , se ha establecido un límite inferior de $\theta_i = 30^\circ$ para la aplicabilidad de las reglas de diseño descritas. En la siguiente figura, se ilustran algunos detalles de soldadura recomendados (IIW, 2008).

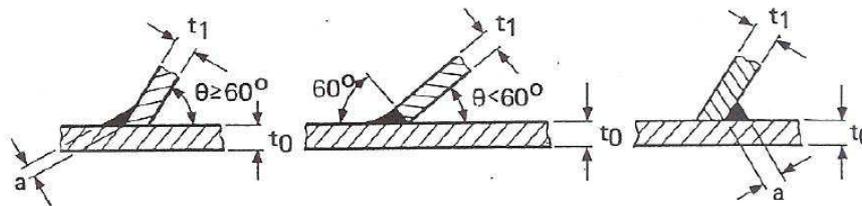


Figura 2-8 - Detalle de soldaduras

Para perfiles huecos rectangulares, el espesor de la garganta de soldadura efectuada entre bordes curvos, se define según la siguiente figura:

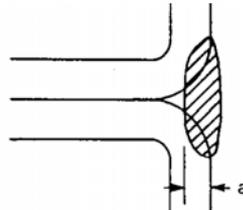


Figura 2-9 - Medida del espesor de la garganta de soldadura entre bordes curvos

Para soldaduras en zonas conformadas en frío, la soldadura se puede llevar a cabo en una longitud $5 \cdot t$, a ambos lados de la zona conformada en frío, siempre y cuando se cumpla una de las siguientes condiciones:

- Las zonas conformadas en frío se normalizan después del conformado en frío, pero antes de soldar.
- La relación r/t cumple con el valor correspondiente obtenido de la tabla 2.4.

Además, puede considerarse que los perfiles huecos conformados en frío de acuerdo con la norma EN 10219, que no satisfagan los límites dados en la anterior tabla, satisfacen estos límites si las secciones tienen un espesor no superior a 12,5 mm y son calmados con aluminio de una calidad J2H, K2H, MH, MLH, NH o NLH y además cumplen que $C \leq 0,18\%$, $P \leq 0,020\%$ y $S \leq 0,012\%$.

Tabla 2.4 - Condiciones para soldar en zonas conformadas en frío

r/t	Deformación debida al conformado en frío (%)	Espesor máximo (mm)		
		Generalmente		Acero totalmente calmado Acero calmado con aluminio (Al ≥ 0,02%)
		Carga predominantemente estática	Predomina la fatiga	
≥ 25	≤ 2	cualquiera	cualquiera	cualquiera
≥ 10	≤ 5	cualquiera	16	cualquiera
≥ 3,0	≤ 14	24	12	24
≥ 2,0	≤ 20	12	10	12
≥ 1,5	≤ 25	8	8	10
≥ 1,0	≤ 33	4	4	6

2.2.7 Tipos de rotura de la uniones de perfiles huecos

Las resistencias de cálculo de las uniones entre perfiles huecos deberían basarse, en general, en los siguientes tipos de rotura:

- Rotura de la cara del cordón** (agotamiento plástico de la cara del cordón) o plastificación del cordón (agotamiento plástico de la sección transversal del cordón).

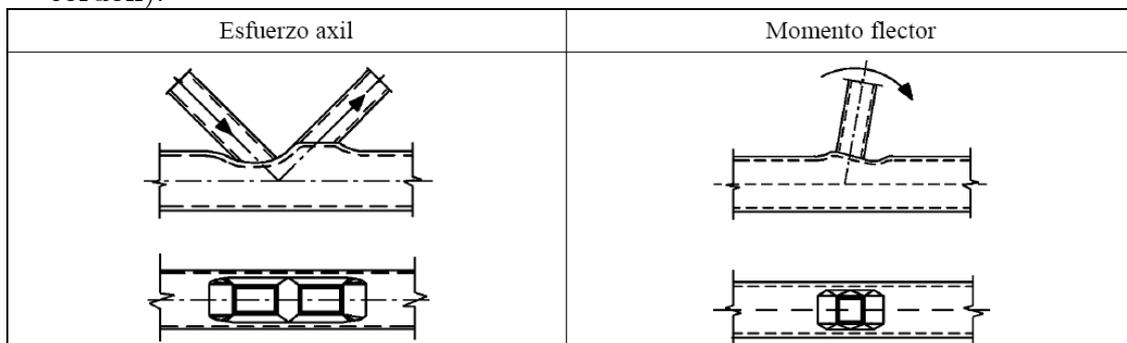


Figura 2-10 - Rotura de la cara del cordón

- Rotura de la cara lateral del cordón** (o agotamiento del alma del cordón) por plastificación, aplastamiento o inestabilidad (rotura o pandeo de la cara lateral del cordón o del alma del cordón) bajo la diagonal comprimida.

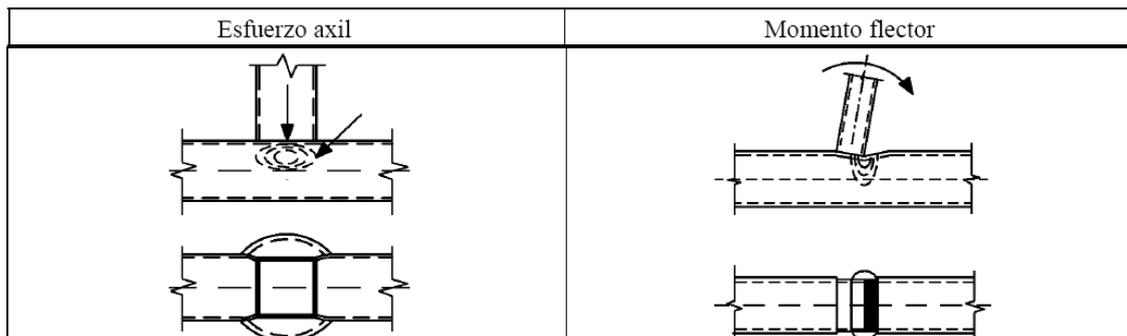


Figura 2-11 - Rotura de la cara lateral del cordón

c. **Rotura del cordón por esfuerzo cortante.**

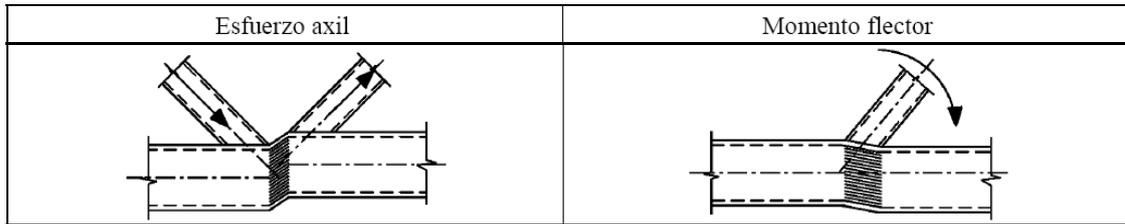


Figura 2-12 - Rotura del cordón por esfuerzo cortante

d. **Rotura por punzonamiento** de la pared del cordón de perfil hueco (inicio de grieta que lleva a la rotura de las diagonales desde el cordón).

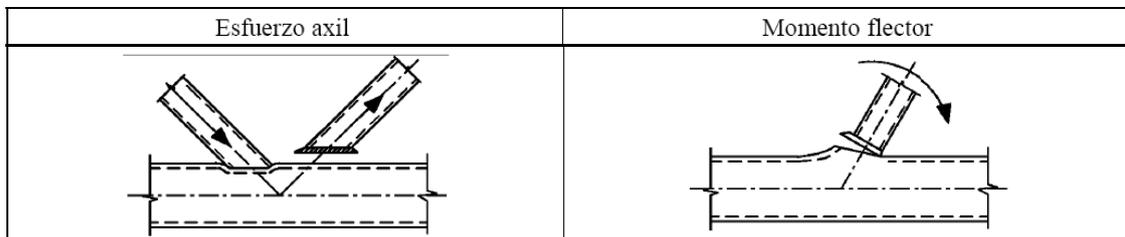


Figura 2-13 - Rotura por punzonamiento

e. **Rotura de la diagonal** con anchura eficaz reducida (fisuración en la soldadura o en la diagonal).

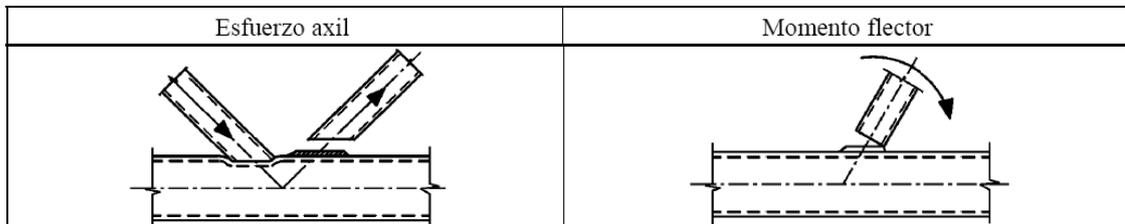


Figura 2-14 - Rotura de la diagonal

f. **Rotura por pandeo local** de la diagonal o del cordón de perfil hueco en el punto de la unión.

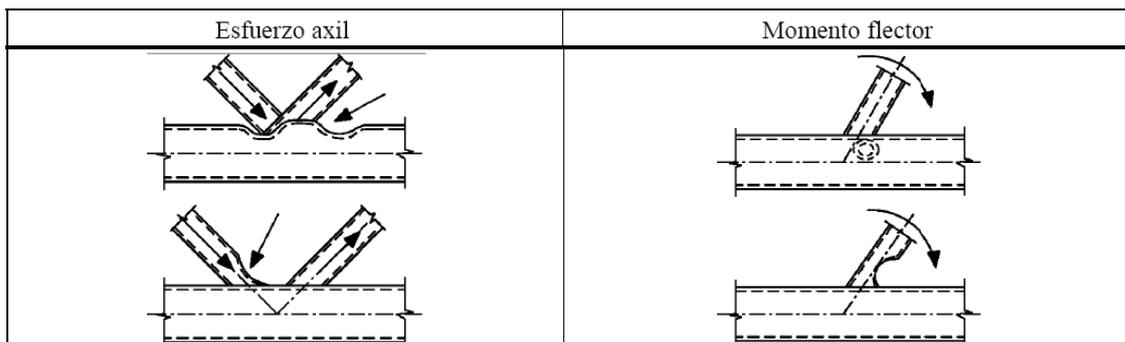


Figura 2-15 - Rotura por pandeo local

NOTA: Las expresiones en **negrita** de esta lista se usan para describir los diversos modos de fallo en las tablas de resistencias de cálculo dadas en la norma EN 1993-1-8.

La resistencia de una unión con las soldaduras correctamente ejecutadas es generalmente mayor bajo solicitaciones de tracción que bajo solicitaciones de compresión, por lo que la resistencia de cálculo de la unión generalmente se basa en la resistencia de la diagonal comprimida para evitar posibles deformaciones locales excesivas o reducidas capacidades de rotación o capacidades de deformación, que podrían producirse en caso contrario.

2.3 FORMULACIÓN PARA LA VERIFICACIÓN DE LOS NUDOS EN ESTRUCTURAS CON PERFILES TUBULARES

2.3.1 Generalidades

2.3.1.1 *Símbolos y variables utilizados*

En primer lugar se van a definir los parámetros de la geometría del nudo, tomando como ejemplo las figuras mostradas a continuación:

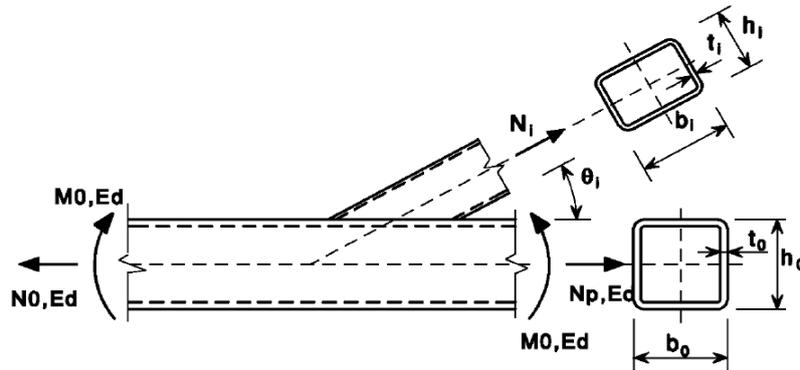


Figura 2-16 - Parámetros geométricos del nudo con una única diagonal

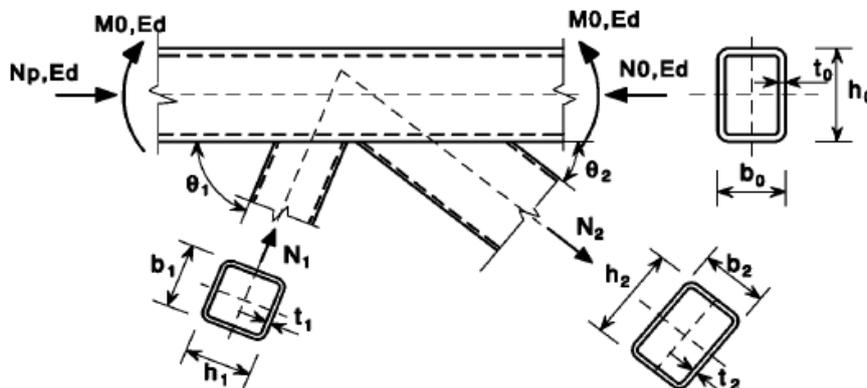


Figura 2-17 - Parámetros geométricos del nudo con 2 diagonales y espaciamiento

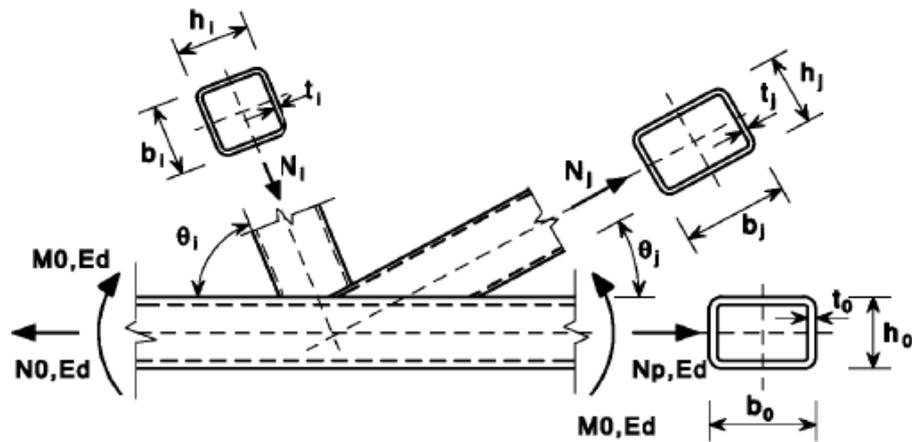


Figura 2-18 - Parámetros de la geometría del nudo con 2 diagonales y solape

Los subíndices utilizados se definen a continuación:

i es un subíndice que se utiliza para designar un elemento de una unión, $i = 0$ denota un cordón e $i = 1$, o 2 las diagonales. En uniones con dos diagonales, $i = 1$ denota normalmente la diagonal comprimida e $i = 2$ la diagonal traccionada.

i y j son subíndices que se utilizan en uniones solapadas, i para designar la diagonal que recubre y j para designar la diagonal recubierta.

Los símbolos de las variables se han tomado de acuerdo a lo indicado en la norma EN 1993-1-8:

b_i es la anchura fuera del plano del perfil hueco de sección rectangular (RHS) del elemento i ($i=0,1$ ó 2);

e es la excentricidad de la unión de acuerdo a las siguientes figuras (es positiva: cuando se mide hacia el exterior de la celosía y negativa hacia el interior).

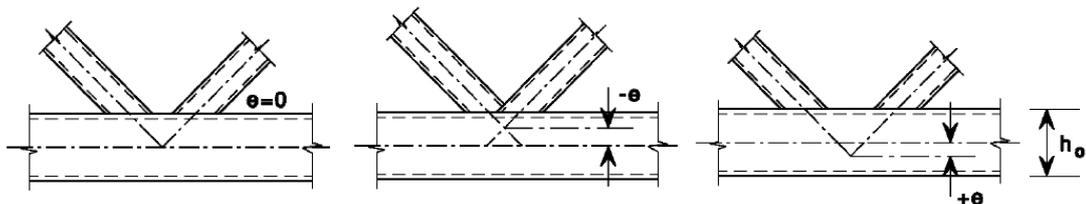


Figura 2-19 - Excentricidad de la unión

g y λ_{ov} es el espaciamiento entre las diagonales de una unión en K o N (valores negativos de g representan un solape q);

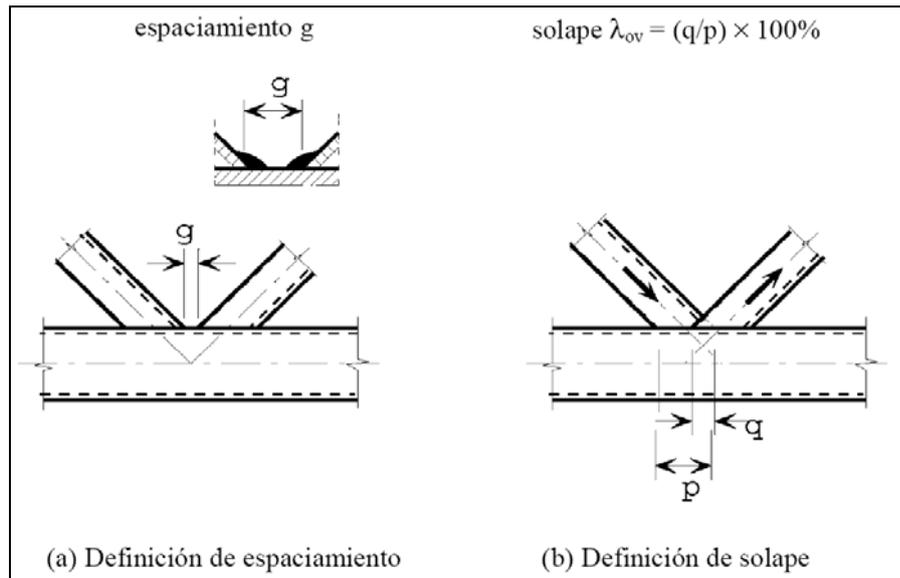


Figura 2-20 - Espaciado y solape entre diagonales

La excentricidad y el espaciado se relacionan con las siguientes fórmulas:

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\text{sen}\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2} - \frac{h_1}{2 \cdot \text{sen}\theta_1} - \frac{h_2}{2 \cdot \text{sen}\theta_2} \quad (2.2)$$

$$e = \left(\frac{h_1}{2 \cdot \text{sen}\theta_1} + \frac{h_2}{2 \cdot \text{sen}\theta_2} + g \right) \frac{\text{sen}\theta_1 \cdot \text{sen}\theta_2}{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (2.3)$$

en los nudos en X, se considerará un espaciado ficticio para el cálculo de rotura por cortante, correspondiente a suponer que las 2 diagonales está por el mismo lado del cordón y por lo tanto se comportaría como un nudo en K con espaciado.

- $\lambda_{ov,lim}$ es el solape o recubrimiento para el que el cortante entre la diagonal y la cara del cordón puede ser crítico.
- h_i es el canto total de la sección del elemento i ($i = 0, 1, \text{ o } 2$) en el plano de la unión
- L_i es la longitud del elemento i
- p es la longitud de la proyección del área de contacto de la diagonal que solapa sobre la cara de conexión del cordón, en ausencia de la diagonal recubierta;
- q es la longitud de solape, medida en la cara de conexión del cordón, entre las diagonales de una unión en K o N;
- t_i es el espesor de pared del elemento i ($i=0,1 \text{ ó } 2$);

Los ratios entre tensiones utilizados se definen de la forma siguiente:

- n es el siguiente cociente utilizado para cordones RHS:

$$n = \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}} / \gamma_{M5} \quad (2.4)$$

$\sigma_{0,Ed}$ es la máxima tensión de compresión en el cordón en una unión y vale:

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} \quad (2.5)$$

$\sigma_{p,Ed}$ es el valor de $\sigma_{0,Ed}$ excluyendo la tensión debida a las componentes paralelas al eje del cordón de los esfuerzos axiales que actúan en las diagonales de esa unión y vale:

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} \quad (2.6)$$

donde,

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed} \cdot \cos \theta_i \quad (2.7)$$

Los ratios geométricos utilizados se definen a continuación:

β es el cociente entre la anchura media de las diagonales y la anchura del cordón.

Para uniones en T, Y y X:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (2.8)$$

Para uniones en K y N:

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 \cdot b_0} \quad (2.9)$$

Para uniones en KT:

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6 \cdot b_0} \quad (2.10)$$

γ es el cociente entre la anchura del cordón y el doble de su espesor de pared:

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} \quad (2.11)$$

η es el cociente entre el canto de la diagonal y la anchura del cordón:

$$\eta = \frac{h_i}{b_0} \quad (2.12)$$

2.3.1.2 *Proceso de formulación*

Según se vayan especificando las condiciones en las que se ha de basar el cálculo y verificación de las uniones, es necesario establecer las fórmulas que van a definir cada una de las funciones, con el fin de poder obtener unos valores de referencia que comparados con las restricciones de la norma, nos permitan identificar la validez o no del diseño realizado. El valor de salida de cada una de las funciones se mostrará como parte del resultado que ofrece el software desarrollado en este proyecto. Dichas funciones vendrán identificadas con la letra g , con la siguiente clasificación:

- $g_a(x)$ para las condiciones de validez generales para el análisis global de vigas en celosía.
- $g_b(x)$ para las condiciones de validez geométricas para uniones soldadas entre diagonales y cordones RHS. Estas se dividirán a su vez en:
 - $g_{bT}(x)$ para las condiciones de los nudos en T, Y o X
 - $g_{bKe}(x)$ para las condiciones de los nudos en K o N con espaciamiento
 - $g_{bKs}(x)$ para las condiciones de los nudos en K o N con solape
- $g_r(x)$ para las restricciones de resistencia del nudo.

2.3.2 **Condiciones de validez generales para el análisis global de vigas en celosía**

Para despreciar los momentos secundarios en las uniones deben verificarse las siguientes condiciones:

1. La relación entre la longitud y el canto del elemento en el plano de la viga en celosía no es inferior al valor mínimo correspondiente. Para estructuras de edificación el valor mínimo apropiado puede tomarse como 6 (según la norma EN 1993-1-8, en el apartado 5.1.5). Así, la condición puede quedar expresada como:

$$g_{a1}(x) = \frac{L_i}{h_i} \geq 6 \quad (2.13)$$

2. Se van a despreciar los momentos resultantes de las excentricidades para el cálculo de las uniones, por lo que dicha excentricidad debe cumplir:

$$-0,55 \cdot h_0 \leq e \leq 0,25 \cdot h_0 \quad (2.14)$$

las restricciones correspondientes son

$$g_{a21}(x) = \frac{e}{h_0} \geq -0,55 \quad (2.15)$$

$$g_{a22}(x) = \frac{e}{h_0} \leq 0,25 \quad (2.16)$$

De acuerdo a las bases de cálculo específicas del apartado 2.2.4, se ha de asegurar que el ángulo entre diagonales y diagonales y cordón es mayor de 30°. Esta condición se puede expresar según el caso de la siguiente manera:

1. En el caso de cualquier nudo excepto el “T”:

$$g_{a31}(x) = \theta_i \geq 30^\circ \quad (2.17)$$

2. En el caso de nudos en “N” o en “KT”:

$$g_{a32}(x) = \theta_1 \leq 60^\circ \quad (2.18)$$

3. En el caso de nudos en “KT”:

$$g_{a33}(x) = \theta_2 \leq 60^\circ \quad (2.19)$$

4. En el caso de nudos en “K”:

$$g_{a34}(x) = \theta_1 + \theta_2 \leq 150^\circ \quad (2.20)$$

Una comprobación inicial, no incluida en la normativa por evidente, es la verificación de que ninguna diagonal tiene una anchura mayor que el cordón. Esta condición se formula de la siguiente manera:

$$g_{a4}(x) = \frac{b_i}{b_0} \leq 1 \quad (2.21)$$

Por último, como parte de las verificaciones iniciales, se han incluido aquellas que tienen que ver con el espaciamiento y el solape.

En el caso de nudos con espaciamiento, con el fin de asegurar que la soldadura de las diagonales con el cordón se realizan con espacio suficiente para los cordones de soldadura, debe cumplirse como mínimo que:

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (2.22)$$

la restricción correspondiente es

$$g_{a51}(x) = g - (t_1 + t_2) \geq 0 \quad (2.23)$$

Además debe cumplirse de acuerdo a la tabla 7.8 de la norma, que:

$$0,5 \cdot (1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1,5 \cdot (1 - \beta) \quad (2.24)$$

las restricciones en este caso son:

$$g_{a52}(x) = \frac{g}{b_0} - 0,5 \cdot (1 - \beta) \geq 0 \quad (2.25)$$

$$g_{a53}(x) = 1,5 \cdot (1 - \beta) - \frac{g}{b_0} \geq 0 \quad (2.26)$$

Por último, en caso de que se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{g}{b_0} \geq 1,5 \cdot (1 - \beta) \text{ y } g \geq t_1 + t_2$$

se tratará la unión como dos uniones T o Y independientes.

En uniones con solape, cuando las diagonales tengan diferentes anchuras, el elemento más estrecho debería recubrir al más ancho, y en concreto, la tabla 7.8 de la norma EN 1993-1-8, establece que la diagonal que recubre debe ser un 75% más estrecho como mínimo que la diagonal recubierta:

$$\frac{b_i}{b_j} \leq 0,75 \quad (2.27)$$

siendo la correspondiente restricción:

$$g_{a61}(x) = \frac{b_i}{b_j} \leq 0,75 \quad (2.28)$$

Por otro lado, el solape debería ser lo suficientemente amplio para asegurar que la transferencia del esfuerzo cortante de una diagonal a la otra es adecuada. Así, se deberá cumplir que:

$$25\% \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,lim} \quad (2.29)$$

siendo

- $\lambda_{ov,lim} = 60\%$ en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada no esté soldada,
- $\lambda_{ov,lim} = 80\%$ en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada esté soldada

las restricciones correspondientes son:

$$g_{a62}(x) = \lambda_{ov} \geq 25 \quad (2.30)$$

$$g_{a63}(x) = \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,lim} \quad (2.31)$$

Cuando los espesores o límites elásticos son diferentes en las diagonales solapadas, debe verificarse, según las bases de cálculo del apartado 2.2.4:

$$t_i \cdot f_{yi} \leq t_j \cdot f_{yj} \quad (2.32)$$

las restricciones correspondientes son:

$$g_{a64}(x) = \frac{t_i \cdot f_{yi}}{t_j \cdot f_{yj}} \leq 1 \quad (2.33)$$

Siendo, i la diagonal que recubre y j la diagonal recubierta.

La diagonal i o la diagonal j pueden estar bien en tracción o bien en compresión, pero deben ser distintas entre ellas, por lo que debe verificarse:

$$\text{signo}(N_{i,Ed}) \neq \text{signo}(N_{j,Ed}) \tag{2.34}$$

las restricciones correspondientes son:

$$g_{a65}(x) = \text{signo}(N_{i,Ed}) \cdot \text{signo}(N_{j,Ed}) \leq 0 \tag{2.35}$$

2.3.3 Condiciones de validez geométricas para uniones soldadas entre diagonales y cordones RHS

De acuerdo a lo indicado en la norma EN 1993-1-8, para determinar las resistencias de cálculo de las uniones soldadas entre diagonales de perfil hueco y cordones de perfil hueco rectangulares o cuadrados, es preciso que la geometría de las uniones esté dentro del rango de validez dado en la tabla 7.8 de dicha norma, que se adjunta a continuación, en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 - Rango de validez para uniones soldadas entre diagonales CHS o RHS y cordones RHS

Tipo de unión	Parámetros de la unión [$i = 1$ o 2 , $j =$ diagonal solapada]					
	b_i/b_0 o d_i/b_0	b_i/t_i y h_i/t_i o d_i/t_i		h_0/b_0 y h_i/b_i	b_0/t_0 y h_0/t_0	Espaciamiento o solape b_i/b_j
		Compresión	Tracción			
T, Y o X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ y			≤ 35 y Clases 1 o 2	–
K con espaciamiento N con espaciamiento	$b_i/b_0 \geq 0,35$ y $\geq 0,1 + 0,01 b_0/t_0$	$h_i/t_i \leq 35$ y Clases 1 o 2	$b_i/t_i \leq 35$ y $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$ pero $\leq 2,0$	≤ 35 y Clases 1 o 2	$g/b_0 \geq 0,5(1 - \beta)$ pero $\leq 1,5(1 - \beta)$ ¹⁾ y como mínimo $g \geq t_1 + t_2$
K con solape N con solape	$b_i/b_0 \geq 0,25$	Clase 1			Clases 1 o 2	$25\% \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,lim}$ ²⁾ y $b_i/b_j \leq 0,75$
Diagonal circular	$d_i/b_0 \geq 0,4$ pero $\leq 0,8$	Clase 1	$d_i/t_i \leq 50$	Como las anteriores, pero con d_i sustituyendo a b_i y d_j sustituyendo a b_j		

1) Si $g/b_0 > 1,5(1 - \beta)$ y $g > t_1 + t_2$ se tratará la unión como dos uniones T o Y independientes.
 2) $\lambda_{ov,lim} = 60\%$ en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada no esté soldada y el 80% en el caso de que la zona oculta de la diagonal solapada esté soldada. Si el solape supera $\lambda_{ov,lim}$ o si las diagonales son secciones rectangulares con $h_i < b_1$ y/o $h_j < b_j$, la conexión entre las diagonales y la cara del cordón debe comprobarse a cortante.

En este proyecto no se va a considerar el tipo de unión entre diagonales circulares CHS y cordones RHS.

A continuación se va a realizar la formulación de estos rangos de validez, agrupándolos por el tipo de nudo, con el fin de facilitar la posterior programación.

La columna correspondiente a espaciamiento o solape ya ha sido objeto de comprobación en las condiciones generales, por lo que no se volverá a considerar aquí.

2.3.3.1 *Rango de validez de los nudos en T, Y o X*

El rango de validez de la relación entre la anchura de las diagonales y el cordón, corresponde a la relación b_i/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bT1}(x) = \frac{b_i}{b_0} \geq 0,25 \quad (2.36)$$

El rango de validez de la relación entre la anchura y canto de las diagonales y su espesor, corresponde a las relaciones b_i/t_i y h_i/t_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bT21}(x) = \frac{b_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.37)$$

$$g_{bT22}(x) = \frac{h_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.38)$$

Además, para las diagonales comprimidas, deben cumplirse los requisitos para secciones de clase 1 o 2 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que de acuerdo a dicha norma, en el apartado 5.5, para clase 2 (la menos restrictiva) y chapa comprimida, debe cumplirse que:

$$\frac{c_i}{t_i} \leq 38 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_{y,i}}} \quad (2.39)$$

siendo,

c_i la anchura interna de la pared del tubo, según las figuras adjuntas:

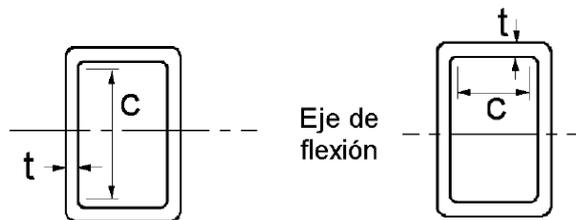


Figura 2-21 - Sección perfil rectangular hueco

su valor, se determinará, de forma conservadora como la anchura exterior menos dos veces el espesor:

$$c_{b,i} = b_i - 2 \cdot t_i \quad (2.40)$$

$$c_{h,i} = h_i - 2 \cdot t_i \quad (2.41)$$

por lo tanto, las restricciones correspondientes serán, para la diagonal comprimida, las siguientes:

$$g_{bT31}(x) = \left(\frac{b_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 38 \quad (2.42)$$

$$g_{bT32}(x) = \left(\frac{h_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 38 \quad (2.43)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de las diagonales corresponde a la relación h_i/b_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bT41}(x) = \frac{h_i}{b_i} \geq 0,5 \quad (2.44)$$

$$g_{bT42}(x) = \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (2.45)$$

El rango de validez de la relación entre la anchura y canto de los cordones y su espesor, corresponde a las relaciones b_0/t_0 y h_0/t_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bT51}(x) = \frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.46)$$

$$g_{bT52}(x) = \frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.47)$$

Al igual que con las diagonales, con los cordones debe cumplirse los requisitos para secciones de clase 1 o 2 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que de acuerdo a la formulación anterior, las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bT61}(x) = \left(\frac{b_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.48)$$

$$g_{bT62}(x) = \left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.49)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de los cordones corresponde a la relación h_0/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bT71}(x) = \frac{h_0}{b_0} \geq 0,5 \quad (2.50)$$

$$g_{bT72}(x) = \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (2.51)$$

2.3.3.2 Rango de validez de los nudos en K o N con espaciamiento

El rango de validez de la relación entre la anchura de las diagonales y el cordón, corresponde a la relación b_i/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKe11}(x) = \frac{b_i}{b_0} \geq 0,35 \quad (2.52)$$

Además, en este tipo de nudos se tiene que cumplir que:

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0} \quad (2.53)$$

siendo la restricción correspondiente:

$$g_{bKe12}(x) = \frac{b_i}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0} \right) \geq 0 \quad (2.54)$$

El rango de validez de la relación entre la anchura y canto de las diagonales y su espesor, corresponde a las relaciones b_i/t_i y h_i/t_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKe21}(x) = \frac{b_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.55)$$

$$g_{bKe22}(x) = \frac{h_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.56)$$

Además, para las diagonales comprimidas, al igual que en el apartado anterior, debe cumplirse los requisitos para secciones de clase 1 o 2 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que de acuerdo a la formulación anterior, las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bKe31}(x) = \left(\frac{b_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 38 \quad (2.57)$$

$$g_{bKe32}(x) = \left(\frac{h_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 38 \quad (2.58)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de las diagonales corresponde a la relación h_i/b_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKe41}(x) = \frac{h_i}{b_i} \geq 0,5 \quad (2.59)$$

$$g_{bKe42}(x) = \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (2.60)$$

El rango de validez de la relación entre la anchura y canto de los cordones y su espesor, corresponde a las relaciones b_0/t_0 y h_0/t_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKe51}(x) = \frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.61)$$

$$g_{bKe52}(x) = \frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.62)$$

Al igual que con las diagonales, con los cordones debe cumplirse los requisitos para secciones de clase 1 o 2 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que de acuerdo a la formulación anterior, las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bKe61}(x) = \left(\frac{b_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.63)$$

$$g_{bKe62}(x) = \left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.64)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de los cordones corresponde a la relación h_0/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKe71}(x) = \frac{h_0}{b_0} \geq 0,5 \quad (2.65)$$

$$g_{bKe72}(x) = \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (2.66)$$

2.3.3.3 *Rango de validez de los nudos en K o N con solape*

El rango de validez de la relación entre la anchura de las diagonales y el cordón, corresponde a la relación b_i/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKs1}(x) = \frac{b_i}{b_0} \geq 0,25 \quad (2.67)$$

Exclusivamente para las diagonales traccionadas, el rango de validez de la relación entre la anchura y canto de las diagonales y su espesor, corresponde a las relaciones b_i/t_i y h_i/t_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKs21}(x) = \frac{b_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.68)$$

$$g_{bKs22}(x) = \frac{h_i}{t_i} \leq 35 \quad (2.69)$$

Por otro lado, para las diagonales comprimidas, a diferencia del apartado anterior, los requisitos que deben cumplir exclusivamente, son que las secciones sean de clase 1 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que

de acuerdo a dicha norma, en el apartado 5.5, para clase 1 y chapa comprimida, debe cumplirse que:

$$\frac{c_i}{t_i} \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_{y,i}}} \quad (2.70)$$

por lo que las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bKs31}(x) = \left(\frac{b_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 33 \quad (2.71)$$

$$g_{bKs32}(x) = \left(\frac{h_i}{t_i} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,i}}{235}} \leq 33 \quad (2.72)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de las diagonales corresponde a la relación h_i/b_i , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKs41}(x) = \frac{h_i}{b_i} \geq 0,5 \quad (2.73)$$

$$g_{bKs42}(x) = \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (2.74)$$

Al diferencia que con el resto de tipos de nudos, con los cordones es suficiente con que se cumplan de forma exclusiva los requisitos para secciones de clase 1 o 2 ante esfuerzos de compresión pura según la norma EN 1993-1-1, por lo que de acuerdo a la formulación anterior, las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bKs61}(x) = \left(\frac{b_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.75)$$

$$g_{bKs62}(x) = \left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_{y,0}}{235}} \leq 38 \quad (2.76)$$

El rango de validez de la relación entre el canto y la anchura de los cordones corresponde a la relación h_0/b_0 , y tiene las siguientes restricciones:

$$g_{bKs71}(x) = \frac{h_0}{b_0} \geq 0,5 \quad (2.77)$$

$$g_{bKs72}(x) = \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (2.78)$$

2.3.4 Resistencia de cálculo

2.3.4.1 Generalidades

Para uniones dentro del rango de validez dado en la tabla 7.8 de la norma EN 1993-1-8, sólo es necesario considerar los criterios de cálculo recogidos en el apartado 7.5.2 de dicha norma. La resistencia de cálculo de la conexión debería tomarse como el valor mínimo entre todos los criterios aplicables. De dicho apartado, en este proyecto únicamente se considerará el apartado 7.5.2.1, correspondiente a uniones no reforzadas.

La norma ofrece de forma adicional, una simplificación en el cálculo para uniones soldadas entre diagonales de perfil hueco cuadrado o circular y cordones de perfil cuadrado, estableciendo unas condiciones adicionales de validez. No obstante, en este proyecto hemos seguido el criterio general para todos los tipos de nudos.

La resistencia de cálculo de cualquier unión soldada no reforzada entre diagonales CHS o RHS, y cordones RHS, dentro del rango de validez de la tabla 7.8, puede determinarse utilizando las expresiones dadas en las tablas 7.10 (sólo para uniones soldadas K y N con solape), 7.11 o 7.12 según corresponda de la norma EN 1993-1-8. Dichas tablas diferencian el tipo de unión a considerar:

- Uniones soldadas en T, en X y en Y
- Uniones soldadas en K y en N con espaciamento
- Uniones soldadas en K y en N con solape

En uniones de barras de arriostamiento solicitadas únicamente por esfuerzos axiales, el esfuerzo axial interno de cálculo $N_{i,Ed}$ no debe superar la resistencia axial de cálculo del nudo soldado $N_{i,Rd}$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} \quad (2.79)$$

El valor de $N_{i,Rd}$ será el menor de los calculados según las fórmulas desarrolladas en los subapartados siguientes según el tipo de nudo.

Los valores del subíndice i corresponden a las diagonales, por lo que habrá que calcular las resistencias para cada una de ellas, tomando el menor de todos ellos.

Las uniones en las que las diagonales se encuentren sometidas a combinaciones de flexión y esfuerzo axial deberían cumplir:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.80)$$

donde

$M_{ip,i,Rd}$	Valor de cálculo del momento resistente a flexión en el plano
$M_{ip,i,Ed}$	Valor de cálculo del momento flector interno actuante en el plano
$M_{op,i,Rd}$	Valor de cálculo del momento resistente a flexión fuera del plano
$M_{op,i,Ed}$	Valor de cálculo del momento flector interno actuante fuera del plano

El momento interno que actúa en el elemento i , $M_{i,Ed}$, puede tomarse como el valor en el punto de intersección entre el eje de la diagonal y la cara del cordón.

Las resistencias de cálculo a flexión en el plano y fuera del plano $M_{i,Rd}$ de cualquier unión no reforzada deberían determinarse utilizando las expresiones dadas en la tabla 7.14 de la norma EN 1993-1-8.

Dichos momentos deberían tenerse en cuenta si se realizara un cálculo no simplificado de la estructura, en el que se considerase que la unión de las diagonales con los cordones no se realiza a través de una articulación, sino a través de una unión rígida o semi-rígida. También pueden aparecer momentos, considerando el efecto de las excentricidades de los esfuerzos aplicados en el nudo, si dicha excentricidad supera los límites establecidos en las restricciones de geometría.

Por último, en las tablas 7.15 y 7.16 de la norma EN 1993-1-8, se han incluido varios criterios de cálculo adicionales para uniones acodadas y en otras condiciones especiales, que también se tendrán en cuenta en este proyecto.

Los parámetros utilizados para todos los tipos de nudos, en las fórmulas que se van a incluir a continuación son:

$$A_o = \text{área de la sección del cordón} \quad (2.81)$$

$$A_v = \left(2 \cdot h_0 + b_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot g^2}{3 \cdot t_0^2}}} \right) \cdot t_0 \quad (2.82)$$

$$V_{Ed} = \max(N_i \cdot \text{sen} \theta_i) \quad \text{se toma el mayor de todos.} \quad (2.83)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3}} \quad (2.84)$$

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \quad \text{siempre que } b_{eff} \leq b_i \quad (2.85)$$

$$b_{e,ov} = \frac{10}{b_j / t_j} \frac{f_{yj} \cdot t_j}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \quad \text{siempre que } b_{e,ov} \leq b_i \quad (2.86)$$

$$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} \cdot b_i \quad \text{siempre que } b_{e,p} \leq b_i \quad (2.87)$$

Para compresión ($n > 0$):

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4 \cdot n}{\beta} \quad \text{pero como máximo } k_n \leq 1,0 \quad (2.88)$$

Para tracción ($n \leq 0$):

$$k_n = 1,0 \quad (2.89)$$

siendo, para la máxima tensión de compresión en el cordón en la unión,

$$n = \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}} / \gamma_{M5} \quad (2.90)$$

Nota: en la norma EN 1993-1-8, se ha considerado que el esfuerzo axial es de compresión si tiene un valor positivo y de tracción si es negativo. A diferencia de cómo se considera en la norma EN 1993-1-1, donde los esfuerzos axiales de compresión son negativos y los de tracción positivos. Por ser coherentes con la norma que sirve de referencia a este proyecto, se ha empleado el criterio de signos de la norma EN 1993-1-8.

2.3.4.2 Resistencia de cálculo de uniones soldadas en T, en X y en Y

En las uniones soldadas en T e Y, la componente de carga normal al cordón es resistida por el esfuerzo cortante y flexión en el cordón. La unión en T se puede considerar un caso particular de la unión en Y.

Las ecuaciones de resistencia que se van a dar a continuación, para $\beta \leq 0,85$, se basan en un mecanismo de líneas de rotura en la cara del cordón de RHS. Limitando el cálculo de la capacidad de la unión bajo cargas mayoradas a la carga de fluencia de la unión, se asegura que las deformaciones serán aceptables a niveles de carga especificados (de servicio).

Para uniones en T, Y y X de RHS de anchura total ($\beta = 1,00$), la flexibilidad ya no es un problema, y la resistencia se basa o en la capacidad a tracción o en la inestabilidad a compresión de las paredes laterales del cordón, para barras de relleno a tracción y compresión respectivamente.

Las uniones en X de anchura total y solicitadas a compresión para RHS se diferencian de las uniones en T o en Y en que sus paredes laterales muestran una mayor deformación que las uniones en T. De igual manera, el valor de f_k en la ecuación de resistencia se reduce a $0,8 \cdot \sin\theta_l$ del valor utilizado para situaciones en T o en Y. En ambos casos, se sigue para las resistencias una relación lineal desde valores $\beta = 0,85$ (donde gobierna la flexión de la cara del cordón) hasta valores $\beta = 1,00$ (donde es crítica la rotura de la pared lateral del cordón).

En todas las uniones en T, Y y X de RHS con altas relaciones ($\beta \geq 0,85$), entre la anchura de la barra de relleno y la anchura del cordón, se comprueban los tipos de rotura de “anchura eficaz” y el punzonamiento de la cara del cordón. Para esta escala de relaciones de anchura, las cargas de las barras de relleno son en gran medida soportadas por sus paredes laterales paralelas al cordón, mientras que las paredes transversales a los cordones sostienen relativamente poca. El límite superior de $\beta = (1 - 1/\gamma)$ para comprobar el punzonamiento viene determinado por la posibilidad física de una rotura de este tipo, cuando se considera que el corte tiene que estar entre los límites exteriores de la anchura de la barra de relleno y la cara interna de la pared del cordón.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el valor de $N_{i,Rd}$ será el menor de los calculados según las siguientes fórmulas:

- Se comprobará la rotura de la cara del cordón si se cumple que:

$$\beta \leq 0,85 \quad (2.91)$$

la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia es:

$$N_{i,Rd} = g_{rT1}(x) = \frac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1-\beta) \cdot \text{sen}\theta_i} \left(\frac{2 \cdot \eta}{\text{sen}\theta_i} + 4 \cdot \sqrt{1-\beta} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.92)$$

- El pandeo de la cara lateral del cordón, se calcula cuando se cumple que:

$$\beta = 1,00 \quad (2.93)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$N_{i,Rd} = g_{rT21}(x) = \frac{k_n \cdot f_b \cdot t_0}{\text{sen}\theta_i} \left(\frac{2 \cdot h_i}{\text{sen}\theta_i} + 10 \cdot t_0 \right) / \gamma_{M5} \quad (2.94)$$

siendo para tracción,

$$f_b = f_{y0} \quad (2.95)$$

y para compresión, en uniones en T e Y:

$$f_b = \chi \cdot f_{y0} \quad (2.96)$$

y en uniones en X:

$$f_b = 0,8 \cdot \chi \cdot f_{y0} \cdot \text{sen}\theta_i \quad (2.97)$$

donde χ es el coeficiente de reducción utilizado en el cálculo a pandeo por flexión obtenido a partir de la Norma EN 1993-1-1 usando la correspondiente curva de pandeo con un valor de la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ modificada:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (2.98)$$

donde:

$$\bar{\lambda} = 3,46 \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{\text{sen}\theta_1}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}} \quad (2.99)$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (2.100)$$

el coeficiente de imperfección α tendrá los siguientes valores para perfiles con secciones huecas, en función del acabado y material:

Tabla 2.6 - Coeficiente de imperfección para las curvas de pandeo en perfiles huecos

Acabado	S235,S275,S355,S420	S460
En caliente	0,21	0,13
Conformado en frío	0,49	0,49

- Además, para uniones en X, donde se cumpla que:

$$\cos \theta_i > \frac{h_1}{h_0} \quad (2.101)$$

Nota: en la norma se indica h_2 en lugar de h_0 por error.

se tomará como resistencia a esfuerzo cortante el menor valor entre el pandeo de la cara lateral del cordón visto anteriormente y la resistencia de cálculo a esfuerzo cortante de las caras laterales del cordón dada para uniones con espaciamiento en K y en N, que se muestra a continuación:

$$N_{i,Rd} = g_{rT22}(x) = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta_i} / \gamma_{M5} \quad (2.102)$$

$$N_{0,Rd} = g_{rT23}(x) = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] / \gamma_{M5} \quad (2.103)$$

- Cuando:

$$0,85 \leq \beta \leq 1,00 \quad (2.104)$$

se interpola linealmente entre el valor de la resistencia de cálculo para el fallo de la cara del cordón con $\beta = 0,85$ y el valor del criterio dominante para el fallo de la cara lateral del cordón con $\beta = 1,00$ (pandeo de la cara lateral o esfuerzo cortante del cordón).

- Además se comprobará la rotura de la diagonal cuando se cumpla que:

$$\beta \geq 0,85 \quad (2.105)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$N_{i,Rd} = g_{rT3}(x) = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i + 2 \cdot b_{eff}) / \gamma_{M5} \quad (2.106)$$

- Por punzonamiento se realizará la comprobación, si se cumple que:

$$0,85 \leq \beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.107)$$

la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia es:

$$N_{i,Rd} = g_{rT4}(x) = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta_i} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_i}{\text{sen} \theta_i} + 2 \cdot b_{e,p} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.108)$$

2.3.4.3 Resistencia de cálculo de uniones soldadas en K y en N con espaciamento

La mayoría de las uniones de celosía de RHS tienen una barra de relleno a compresión y una barra de relleno a tracción soldadas al cordón. En la celosía tipo Warren se la denomina habitualmente unión en K y en la Pratt se la conoce como unión en N. Esta segunda es básicamente un caso particular de la primera. Ambas pueden ser uniones con espaciamento o con recubrimiento. En este apartado vamos a desarrollar las uniones soldadas en K y en N con espaciamento.

En las uniones soldadas en K e N, la componente de carga normal de una barra de relleno se equilibra principalmente por la componente correspondiente en el otro elemento.

La rotura plástica de la cara del cordón es el tipo de rotura más habitual para uniones con espaciamento que tengan relaciones pequeñas a medias entre las anchuras de barras de relleno y la anchura del cordón β . Para relaciones de anchura media ($0,6 \leq \beta \leq 0,8$), este tipo generalmente se produce junto con desgarro en el cordón o en barra de relleno a tracción, aunque esta última solamente sucede en uniones con barras de relleno de paredes relativamente delgadas. La rotura por esfuerzo cortante de la sección entera del cordón se observa en uniones con espaciamento donde la anchura de las barras de relleno es cercana a las del cordón ($\beta = 0,8$), o donde $h_0 < b_0$. La rotura por pandeo local sucede ocasionalmente en uniones de RHS con relaciones altas (b_0/t_0 o h_0/t_0) entre la anchura (o altura) y espesor del cordón. No obstante, la rotura por pandeo local se excluye en las expresiones de cálculo de la unión, por las restricciones impuestas en el campo de validez de los parámetros geométricos. De hecho, se ha descubierto que, en algunos casos, pueden utilizarse uno o dos tipos de rotura para predecir la resistencia de la unión.

Como se podrá comprobar en las fórmulas que se muestran a continuación, la resistencia de la unión es, en la mayoría de los casos, independiente del tamaño del espaciamento (no hay parámetro del tamaño de la separación).

La comprobación de la rotura por esfuerzo cortante del cordón en el espaciamento de uniones en K y en N implica dividir la sección transversal del cordón en dos porciones. La primera es un área de esfuerzo cortante A_v que comprende las paredes de los lados más parte del ala superior, que puede soportar interactivamente cargas axiales y esfuerzo cortante. La segunda es el área restante, $A_0 - A_v$, que es eficaz en resistir fuerzas axiales pero no esfuerzos cortantes.

El valor de $N_{i,Rd}$ será el menor de los calculados según las siguientes fórmulas:

- Por rotura de la cara del cordón:

$$N_{i,Rd} = g_{rKe1}(x) = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_i} \beta / \gamma_{M5} \quad (2.109)$$

- Por esfuerzo cortante del cordón:

$$N_{i,Rd} = g_{rKe21}(x) = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_i} / \gamma_{M5} \quad (2.110)$$

$$N_{0,Rd} = g_{rKe22}(x) = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] / \gamma_{M5} \quad (2.111)$$

- Por rotura de la diagonal:

$$N_{i,Rd} = g_{rKe3}(x) = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5} \quad (2.112)$$

- Por punzonamiento, si se cumple que:

$$\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.113)$$

la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia es:

$$N_{i,Rd} = g_{rKe4}(x) = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \text{sen} \theta_i} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_i}{\text{sen} \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.114)$$

2.3.4.4 *Resistencia de cálculo de uniones soldadas en K y en N con solape*

El tipo de rotura por pandeo local de la barra de relleno a compresión, es el tipo de rotura más habitual para uniones con recubrimiento. La norma EN 1993-1-8, presenta una escala de resistencias basadas en el concepto de anchura eficaz para uniones con recubrimiento de RHS, que incluye la rotura del elemento a tracción o de su soldadura y el Pandeo local de la barra de relleno a compresión. La resistencia de unión en ambos casos se determina por la sección transversal eficaz de la barra de relleno crítica, siendo algunas paredes de barras de relleno, posiblemente, sólo parcialmente eficaces.

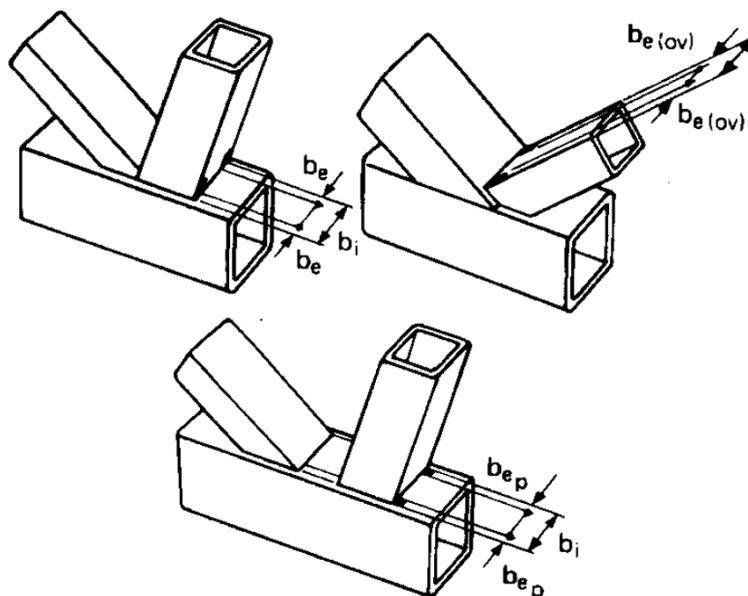


Figura 2-22 - Interpretación física de los términos de anchura eficaz

La comprobación comienza por un valor del 25% de recubrimiento, que es el mínimo para asegurar el comportamiento del recubrimiento. La resistencia aumenta linealmente con recubrimientos del 25% al 50%, es constante desde el 50% al 80% y después es constante por encima del 80% a un nivel más alto. En la figura 2-22 se ilustra la interpretación física de las expresiones para anchura eficaz que se dan en las siguientes fórmulas.

Para el cálculo de la resistencia de cálculo de las uniones soldadas en K y en N con solape, sólo es necesario comprobar la rotura de la diagonal que recubre i . La eficiencia (es decir, la resistencia de cálculo de la unión dividida entre la resistencia plástica de cálculo de la diagonal) de la diagonal solapada j , debería considerarse igual a la de la diagonal que recubre.

Según se indicaba en la tabla de los rangos de validez, si se produce alguna de las siguientes situaciones, la conexión entre las diagonales y la cara del cordón debe comprobarse a cortante:

- $\lambda_{ov} > \lambda_{ov,lim}$
- $h_i < b_i$
- $h_j < b_j$

siendo la fórmula a emplear la siguiente:

$$N_{i,Rd} = g_{rKs21}(x) = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_i} / \gamma_{M5} \quad (2.115)$$

$$N_{0,Rd} = g_{rKs22}(x) = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] / \gamma_{M5} \quad (2.116)$$

La fórmula a emplear para el cálculo de la resistencia a la rotura de la diagonal depende del grado de solape de la unión, habiéndose definido los siguientes intervalos:

- $25\% \leq \lambda_{ov} < 50\%$:

$$N_{i,Rd} = g_{rKs3}(x) = f_{yi} \cdot t_i \cdot \left(b_{eff} + b_{e,ov} + 2 \cdot h_i \frac{\lambda_{ov}}{50} - 4 \cdot t_i \right) / \gamma_{M5} \quad (2.117)$$

- $50\% \leq \lambda_{ov} < 80\%$:

$$N_{i,Rd} = g_{rKs3}(x) = f_{yi} \cdot t_i \cdot (b_{eff} + b_{e,ov} + 2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i) / \gamma_{M5} \quad (2.118)$$

- $\lambda_{ov} \geq 80\%$:

$$N_{i,Rd} = g_{rKs3}(x) = f_{yi} \cdot t_i \cdot (b_i + b_{e,ov} + 2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i) / \gamma_{M5} \quad (2.119)$$

2.3.4.5 Momento de cálculo resistente de uniones soldadas en T y en X a 90°.

La norma EN 1993-1-8 indica, en el apartado 7.5.2.1 (7), que existen 2 tablas para el cálculo de la resistencia a flexión de cualquier unión no reforzada, pero en la norma únicamente se incluye una, la tabla 7.14, que establece los criterios para el cálculo del momento resistente para uniones soldadas en T y en X, cuando el ángulo entre la diagonal y el cordón es de 90°. Revisando la documentación del ICT, se indica que la comprobación de los momentos en la unión de los montantes con el cordón se realiza para celosías Vierendeel, donde dicho montante se encuentra generalmente a 90° con respecto a los cordones, y a diferencia de las celosías Warren o Pratt trianguladas, las uniones Vierendeel tienen montantes sometidos a momentos flectores importantes, así como a esfuerzos axiales y esfuerzos cortantes.

El valor de $M_{ip,Rd}$, correspondiente a los momentos en el plano, siempre y cuando se cumpla que el ángulo entre el cordón y la diagonal es de 90°, será el menor de los calculados según las siguientes fórmulas:

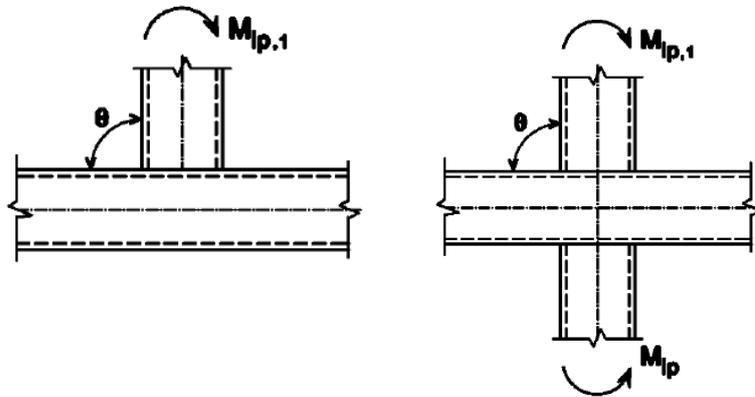


Figura 2-23 - Representación del momento en el plano en nudos en T y X

- Por rotura de la cara del cordón, si se cumple que:

$$\beta \leq 0,85 \quad (2.120)$$

la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia es:

$$M_{ip,Rd} = g_{rMiT1}(x) = k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot h_i \left(\frac{1}{2 \cdot \eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.121)$$

- La rotura de la cara lateral del cordón, se calcula cuando se cumple que:

$$0,85 < \beta \leq 1,00 \quad (2.122)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$M_{ip,Rd} = g_{rMiT2}(x) = 0,5 \cdot f_{yk} \cdot t_0 \cdot (h_i + 5 \cdot t_0)^2 / \gamma_{M5} \quad (2.123)$$

el valor de f_{yk} depende del tipo de nudo:

- Para uniones en T $f_{yk} = f_{y0}$
- Para uniones en X $f_{yk} = 0,8 \cdot f_{y0}$

- La rotura de la diagonal, se calcula cuando se cumple que:

$$0,85 < \beta \leq 1,00 \quad (2.124)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$M_{ip,Rd} = g_{rMiT3}(x) = f_{yi} \cdot \left(W_{pl,i} - \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_i} \right) \cdot b_i \cdot (h_i - t_i) \cdot t_i \right) / \gamma_{M5} \quad (2.125)$$

El valor de $M_{op,Rd}$, correspondiente a los momentos fuera del plano, siempre y cuando se cumpla que el ángulo entre el cordón y la diagonal es de 90° , será el menor de los calculados según las siguientes fórmulas:

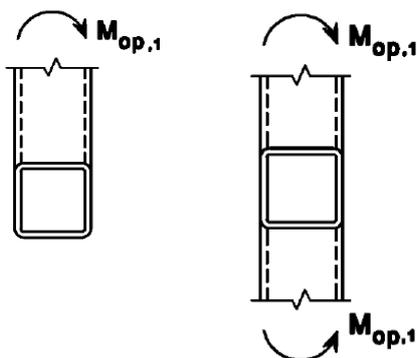


Figura 2-24 - Representación del momento fuera del plano en nudos en T y X

- Por rotura de la cara del cordón, si se cumple que:

$$\beta \leq 0,85 \quad (2.126)$$

la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia es:

$$M_{op,Rd} = g_{rMoT1}(x) = k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \left(\frac{h_i \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot (1 - \beta)} + \sqrt{\frac{2 \cdot b_0 \cdot b_1 \cdot (1 + \beta)}{1 - \beta}} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.127)$$

- La rotura de la cara lateral del cordón, se calcula cuando se cumple que:

$$0,85 < \beta \leq 1,00 \quad (2.128)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$M_{op,Rd} = g_{rMoT2}(x) = f_{yk} \cdot t_0 \cdot (b_0 - t_0) \cdot (h_i + 5 \cdot t_0) / \gamma_{M5} \quad (2.129)$$

el valor de f_{yk} depende del tipo de nudo:

- Para uniones en T $f_{yk} = f_{y0}$
- Para uniones en X $f_{yk} = 0,8 \cdot f_{y0}$

- La rotura de la diagonal, se calcula cuando se cumple que:

$$0,85 < \beta \leq 1,00 \quad (2.130)$$

siendo la fórmula correspondiente para el cálculo de la resistencia:

$$M_{op,Rd} = g_{rMoT3}(x) = f_{yi} \cdot \left(W_{pl,i} - 0,5 \cdot \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_i} \right)^2 \cdot b_i^2 \cdot t_i \right) / \gamma_{M5} \quad (2.131)$$

- Además, sólo cuando la unión es en T, se puede producir la rotura del cordón por distorsión, teniendo la resistencia el valor de:

$$M_{op,Rd} = g_{rMoT4}(x) = 2 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot (h_i \cdot t_0 + \sqrt{b_0 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot (b_0 + h_0)}) / \gamma_{M5} \quad (2.132)$$

2.3.4.6 Criterios de cálculo para tipos especiales de uniones soldadas y uniones acodadas

De forma adicional, con el fin de cubrir determinadas configuraciones especiales, la norma EN 1993-1-8, incluye las tablas 7.15 y 7.16, estableciendo los siguientes criterios de cálculo específicos para ellas:

- Para uniones en doble Y (DY)

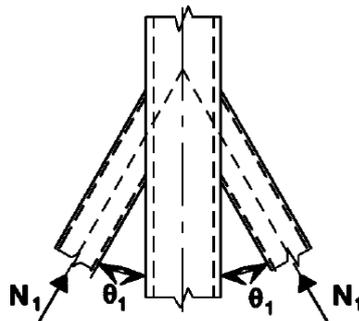


Figura 2-25 - Representación nudo doble Y (DY)

donde los esfuerzos pueden ser de tracción o de compresión actuando en la misma dirección en ambos elementos, la resistencia de cálculo de la unión se calculará como si fuera una unión en X, de acuerdo a las fórmulas mostradas en apartados anteriores:

$$N_{1,Ed} \leq N_{1,Rd} \quad (2.133)$$

- Para uniones en KT, donde la diagonal 1 está siempre en compresión y la diagonal 2 está siempre en tracción,

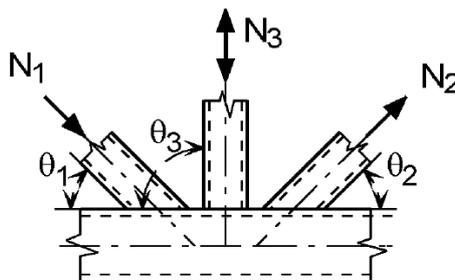


Figura 2-26 - Representación nudo KT

la validez del nudo se verificará si se cumple que:

$$N_{1,Ed} \cdot \text{sen}\theta_1 + N_{3,Ed} \cdot \text{sen}\theta_3 \leq N_{1,Rd} \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (2.134)$$

$$N_{2,Ed} \cdot \text{sen}\theta_2 \leq N_{1,Rd} \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (2.135)$$

donde $N_{1,Rd}$ es el valor de $N_{1,Rd}$ para una unión en K conforme a lo indicado en apartados anteriores, tomando el valor de β definido para uniones KT.

- Para uniones en doble K (DK), donde todas las diagonales están o bien en compresión o bien en tracción,

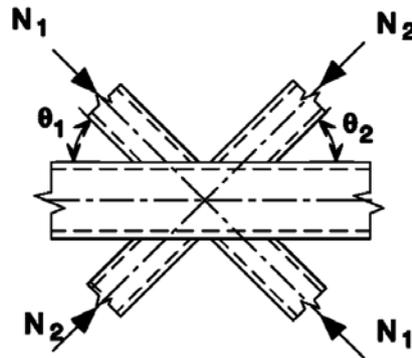


Figura 2-27 - Representación nudo doble K (DK) - Caso 1

la validez del nudo se verificará si se cumple que:

$$N_{1,Ed} \cdot \text{sen}\theta_1 + N_{2,Ed} \cdot \text{sen}\theta_2 \leq N_{x,Rd} \cdot \text{sen}\theta_x \quad (2.136)$$

donde $N_{x,Rd}$ es el valor de $N_{x,Rd}$ para una unión en X conforme a lo indicado en apartados anteriores, siendo:

$$N_{x,Rd} \cdot \text{sen}\theta_x \quad \text{el mayor de} \quad \begin{cases} |N_{1,Rd} \cdot \text{sen}\theta_1| \\ |N_{2,Rd} \cdot \text{sen}\theta_2| \end{cases} \quad (2.137)$$

- Por otro lado, para uniones en doble K (DK), donde la diagonal 1 está siempre en compresión y la diagonal 2 está siempre en tracción,

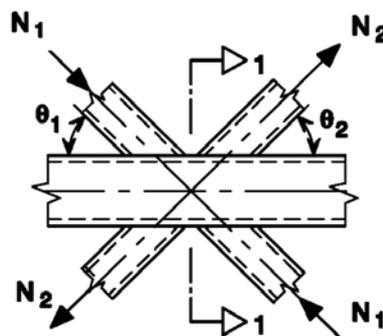


Figura 2-28 - Representación nudo doble K (DK) - Caso 2

la validez del nudo se verificará si se cumple que:

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} \quad (2.138)$$

donde $N_{i,Rd}$ es el valor de $N_{i,Rd}$ para una unión en K conforme a lo indicado en apartados anteriores, siempre que, en uniones con espaciamiento, en la sección 1-1, según la figura anterior, del cordón, se cumpla:

$$\left[\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl.0,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,Ed}}{V_{pl.0,Rd}} \right]^2 \leq 1,0 \quad (2.139)$$

- Para uniones soldadas acodadas,

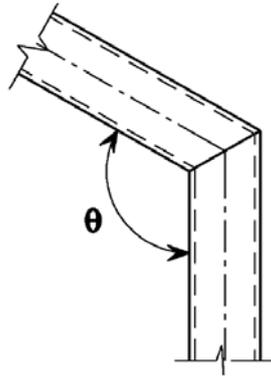


Figura 2-29 - Representación unión soldada acodada

la sección transversal debería ser de Clase 1 para flexión pura, según la norma EN 1993-1-1. Por lo que de acuerdo a dicha norma, en el apartado 5.5, para clase 1 y chapa flexionada, debe cumplirse que:

$$\frac{c}{t} \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_{y,i}}} \quad (2.140)$$

por lo que las restricciones correspondientes serán:

$$g_{bA11}(x) = \left(\frac{b}{t} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_y}{235}} \leq 72 \quad (2.141)$$

$$g_{bA12}(x) = \left(\frac{h}{t} - 2 \right) \sqrt{\frac{f_y}{235}} \leq 72 \quad (2.142)$$

La resistencia del codo se verificará si se cumple que:

$$N_{Ed} \leq 0,2 \cdot N_{pl,Rd} \quad (2.143)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq \kappa \quad (2.144)$$

el valor de κ depende del ángulo del codo, por lo que si:

$$\theta \leq 90^\circ \quad (2.145)$$

$$\kappa = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{b_0}{h_0}}}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)^{0,8}} + \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot b_0}{h_0}} \quad (2.146)$$

y si:

$$90^\circ < \theta \leq 180^\circ \quad (2.147)$$

$$\kappa = 1 - \left(\sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \cdot (1 - \kappa_{90}) \quad (2.148)$$

donde κ_{90} es el valor de κ para $\theta = 90^\circ$.

- Por último, para cordones acodados,

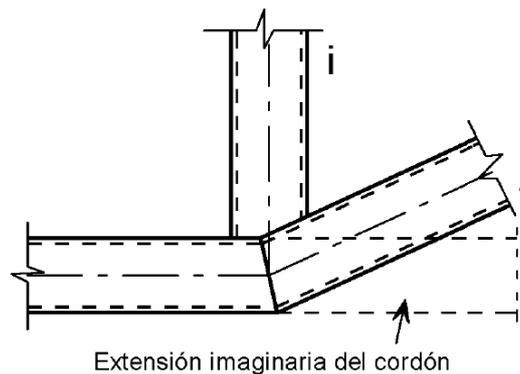


Figura 2-30 - Representación cordón acodado

la validez del nudo se verificará si se cumple que:

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} \quad (2.149)$$

donde $N_{i,Rd}$ es el valor de $N_{i,Rd}$ para una unión en K o en N con solape, conforme a lo indicado en apartados anteriores.

2.3.4.7 Resistencia de cálculo de las soldaduras en ángulo

En las soldaduras en ángulo, el cálculo de su resistencia está basado en la determinación de su garganta a y su longitud eficaz l .

De acuerdo a lo establecido en el Eurocódigo 3, el valor de cálculo de una soldadura en ángulo debe determinarse utilizando alguno de los siguientes métodos:

- Método direccional
- Método simplificado

En este proyecto se va a emplear el método direccional, ya que realiza un estudio más exhaustivo del comportamiento de la soldadura, al descomponer las fuerzas en sus componentes.

En concreto, en este método, las fuerzas transmitidas por unidad de longitud de cordón de soldadura, se descomponen en componentes paralela y transversal al eje longitudinal del cordón de soldadura y perpendicular y transversal al plano de su espesor de garganta.

Para este cálculo, se asume que la localización del valor de cálculo del área de garganta está concentrado en la raíz.

Se asume una distribución uniforme de tensión en la sección de la garganta de la soldadura, resultando en las tensiones normales y tensiones tangenciales que se muestran en la figura 2-31.

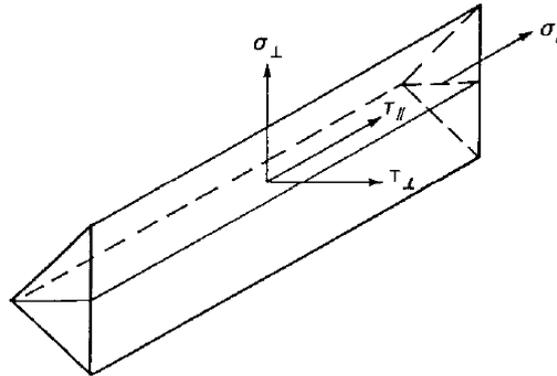


Figura 2-31 - Tensiones en la sección de la garganta de una soldadura en ángulo

Siendo,

- σ_{\perp} (σ_1) la tensión normal perpendicular a la garganta de la soldadura
- σ_{\parallel} (σ_2) la tensión normal paralela al eje de la soldadura (no se considera)
- τ_{\perp} (τ_1) la tensión tangencial (en el plano de la garganta) perpendicular al eje de la soldadura
- τ_{\parallel} (τ_2) la tensión tangencial (en el plano de la garganta) paralela al eje de la soldadura

El valor de cálculo de la resistencia de la soldadura será suficiente si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\sigma_{co} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \tag{2.150}$$

$$\sigma_1 \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \tag{2.151}$$

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 2.7.

Tabla 2.7 - Coeficiente de correlación para soldaduras en ángulo (Tabla 4.1 EN 1993-1-8:2005)

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

Las soldaduras entre partes con materiales de distinto límite elástico se diseñarán utilizando las propiedades del material con menor límite elástico.

Las restricciones correspondientes para determinar la validez de la soldadura serán:

$$N_{i,Rd} = g_{rS1}(x) = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (2.152)$$

$$N_{i,Rd} = g_{rS2}(x) = \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2.153)$$

Para el cálculo de las tensiones de la garganta de las soldaduras de cada perfil, se han seguido los siguientes pasos.

1. Se parte de los valores de esfuerzo axial y momento flector correspondientes al perfil en cuestión: $N_{i,Ed}$ y $M_{ip,i,Ed}$
2. Se abaten los planos de garganta de los cordones de soldadura sobre el plano de la cara superior del cordón, con el fin de utilizar el mismo plano para todas las soldaduras.
3. Se obtienen las características geométricas del conjunto:
 - a. Área de cordones de soldadura:

$$A = \sum a_i \cdot l_i \quad (2.154)$$

donde,

a_i es la garganta de soldadura empleado con el perfil.

l_i es la longitud de cada cordón de soldadura, correspondiente a cada cara, teniendo en cuenta que:

- Los cordones transversales tienen la misma longitud que el ancho del perfil:

$$l_i = b_i \quad (2.155)$$

- Los cordones longitudinales tienen la siguiente longitud, teniendo en cuenta la inclinación del perfil:

$$l_i = \frac{h_i}{\text{sen}(\theta_i)} \quad (2.156)$$

donde,

θ_i es el menor ángulo entre el perfil y el cordón.

b. Momento de inercia I_y del conjunto de los cordones de soldadura:

$$I_y = \left[2 \cdot \frac{b_i \cdot a_i^3}{12} + 2 \cdot a_i \cdot b_i \cdot \left(\frac{\frac{h_i}{\text{sen}(\theta_i)} + a_i}{2} \right)^2 \right] + 2 \cdot a_i \cdot \frac{\left(\frac{h_i}{\text{sen}(\theta_i)} \right)^3}{12} \quad (2.157)$$

donde,

\bar{z} es la distancia desde el centro de los cordones transversales hasta el centro de gravedad de las soldaduras (eje y):

$$\bar{z} = \frac{\frac{h_i}{\text{sen}(\theta_i)} + a_i}{2} \quad (2.158)$$

4. Se obtienen los esfuerzos referidos a la sección resistente correspondiente a los cordones abatidos:

$$V_z = N_{i,Ed} \cdot \cos(\theta_i) \quad (2.159)$$

$$N_x = N_{i,Ed} \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (2.160)$$

$$M_y = M_{ip,i,Ed} \quad (2.161)$$

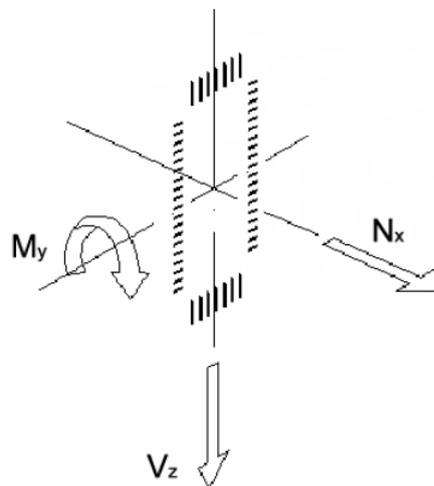


Figura 2-32 - Detalle de esfuerzos en soldaduras

5. A partir de estos esfuerzos se pueden obtener las tensiones tangenciales t_n y t_a , producidas por el cortante V_z y las tensiones normales n_i generadas por el axil N_x y el momento flector M_y :

$$t_a = t_n = \frac{V_z}{A} \quad (2.162)$$

$$n_1 = \frac{N_x}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot \bar{z} \quad (2.163)$$

$$n_2 = \frac{N_x}{A} - \frac{M_y}{I_y} \cdot \bar{z} \quad (2.164)$$

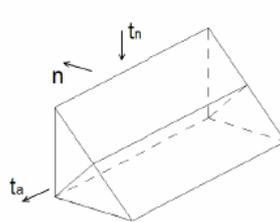


Figura 2-33 - Tensiones abatidas del cordón de soldadura

6. A continuación se pasan estas tensiones al plano de garganta en cada punto:
 a. Para el cordón transversal 1 ($t_a=0$):

$$\sigma_{1,1} = t_n \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) - n_1 \cdot \text{cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.165)$$

$$\tau_{1,1} = -t_n \cdot \text{cos}\left(\frac{\theta}{2}\right) - n_1 \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.166)$$

$$\tau_{2,1} = 0 \quad (\text{no hay tensión tangencial transversal}) \quad (2.167)$$

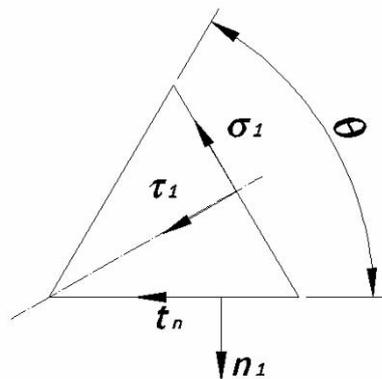


Figura 2-34 - Tensiones en cordón transversal 1

b. Para el cordón transversal 2 ($t_a=0$):

$$\sigma_{1,2} = -t_n \cdot \text{sen}\left(\frac{180-\theta}{2}\right) - n_2 \cdot \cos\left(\frac{180-\theta}{2}\right) \quad (2.168)$$

$$\tau_{1,2} = t_n \cdot \cos\left(\frac{180-\theta}{2}\right) - n_2 \cdot \text{sen}\left(\frac{180-\theta}{2}\right) \quad (2.169)$$

$$\tau_{2,2} = 0 \text{ (no hay tensión tangencial transversal)} \quad (2.170)$$

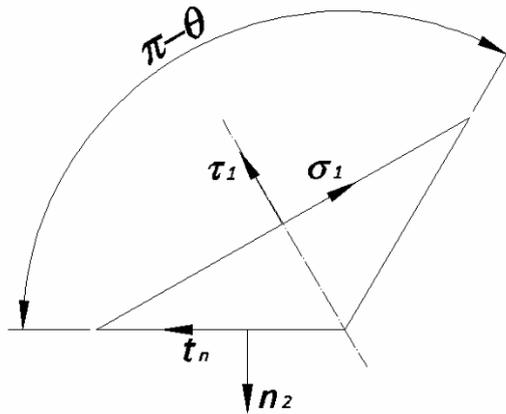


Figura 2-35 - Tensiones en cordón transversal 2

c. Para los cordones longitudinales ($t_n = 0$, ángulo $\theta = 90^\circ$) se calcularán las tensiones en los extremos, ya que es donde mayor tensión habrá por efecto del momento. De este cordón saldrán 2 tensiones de comparación, siendo la mayor la más desfavorable que se utilizará para el cálculo:

$$\sigma_{1,3} = -n_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.171)$$

$$\sigma_{1,4} = -n_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.172)$$

$$\tau_{1,3} = n_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.173)$$

$$\tau_{1,4} = n_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.174)$$

$$\tau_{2,3} = \tau_{2,4} = t_n \quad (2.175)$$

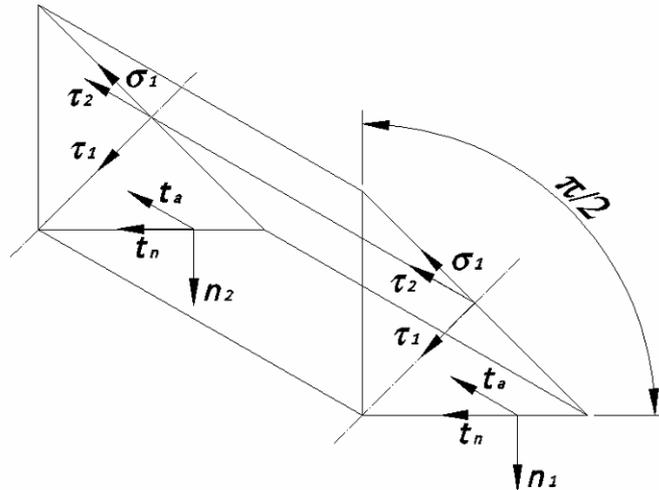


Figura 2-36 - Tensiones en cordón longitudinal

7. Por último se obtienen las tensiones de comparación para cada punto analizado según la fórmula:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot (\tau_1^2 + \tau_2^2)} \quad (2.176)$$

Capítulo 3

Estructura ejemplo de verificación de nudos

3.1 INTRODUCCIÓN

Una vez revisada la normativa correspondiente a las uniones de perfiles tubulares y formuladas las restricciones que las afectan, se va a proceder a la implementación de dichas restricciones en un programa de MATLAB, con el fin de automatizar la verificación de los nudos, que permita realizar posteriormente la optimización propuesta en este proyecto.

Para validar la implementación se hace necesario el empleo de una estructura modelo, verificada, que pueda ser introducida en el programa. Se ha decidido emplear como estructura modelo, una de las estructuras que el ICT (Instituto para la Construcción Tubular) ha propuesto, como caso resuelto, en el documento técnico: “Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero”.

En este capítulo, se va a realizar una descripción de la solución tal cual la expone el ICT en su guía, empleando sus criterios de cálculo, con el fin de dejarla completamente definida y poder cotejar los resultados con los obtenidos mediante la herramienta creada en MATLAB.

3.2 NORMATIVA EMPLEADA Y PROGRAMAS DE CÁLCULO

En dicha guía del ICT, se indica como referencias los siguientes documentos y normas:

- NBE/AE-88 Norma Básica de la Edificación/Acciones en la Edificación
- NBE/EA-95 Norma Básica de la Edificación/Estructuras de Acero en Edificación
- EUROCÓDIGO 1 Bases de proyecto y acciones en estructuras
- EUROCÓDIGO 3 Proyecto de Estructuras de Acero
- Guías de Diseño del CIDECT (Comité Internacional para el Desarrollo y Estudio de la Construcción Tubular):
 - Guía de Diseño n°2: “Estabilidad estructural de perfiles tubulares”
 - Guía de Diseño n°3: “ Para nudos de perfiles tubulares rectangulares (RHS) bajo cargas predominantemente estáticas”
- Manual de Estructuras Metálicas de edificios urbanos. Ministerio de Fomento.

- El proyectista de estructuras metálicas. Robert Nonnast.
- Design of Structural Steelwork Lattice Framed Industrial Building. The Steel Construction Institute.
- Estructuras de acero. R. Argüelles Álvarez, R. Argüelles Bustillo, F. Arriaga Martitegui, J. R. Atienza Reales, J. J. Martínez Calleja.
- Estructuras especiales en edificación. Análisis y cálculo – 1ª parte. Valentín Quintas Ripoll.

Igualmente, a continuación se relacionan los programas informáticos empleados como ayuda al cálculo:

- Metal 3D – 2002.i: Programa de cálculo de estructuras metálicas desarrollado por CYPE Ingenieros
- CIDJOINT: Programa de cálculo y verificación de uniones entre Perfiles Tubulares de acero desarrollado por el CIDECT

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA MODELO

El modelo escogido por la guía del ICT, es el pórtico central de una nave con cubierta a dos aguas con una pendiente del 7%. El diseño de la nave es rectangular, de 30 m de largo, con una luz entre pilares de 40 m. La altura de pilares a partir de la superficie de cimentación es de 9 m y la altura de coronación de la nave es de 10,40 m. No se ha previsto la instalación de puente grúa.

En concreto, la nave consta de 4 pórticos centrales iguales dispuestos paralelamente, más un entramado frontal a cada lado. La distancia entre ejes de los pórticos (modulación) es de 6m. Los arriostramientos se han dispuesto entre los entramados frontales y los pórticos centrales, mediante cruces de San Andrés. Se han previsto cruces cada 2 correas en la cubierta y los laterales se ha resuelto con una única cruz cubriendo toda la altura.

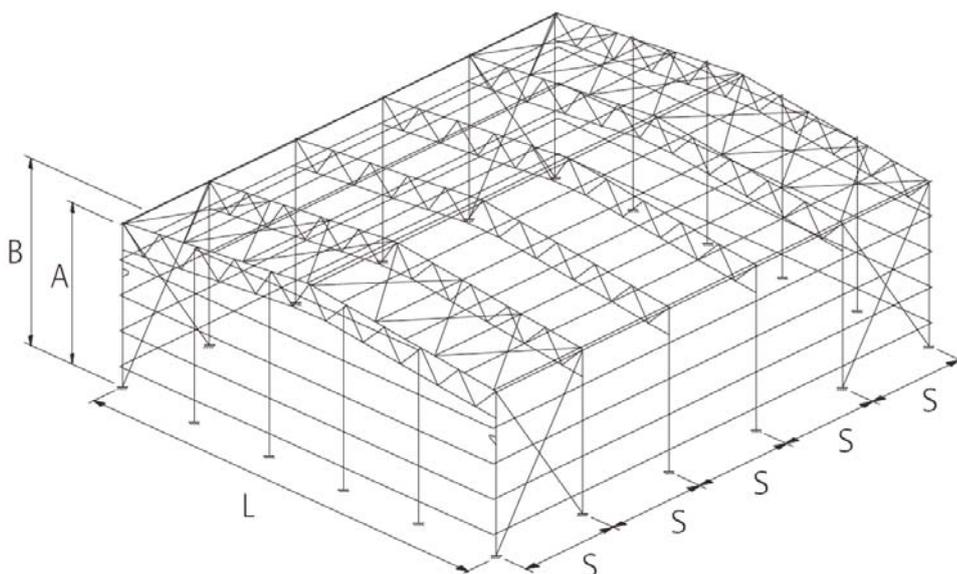


Figura 3-1 - Estructura metálica de la nave

Resumen de las principales dimensiones:

- Modulación (S): 6 m

- Luz (L): 40 m
- Altura de Alero (A): 9 m
- Altura de coronación (B): 10,4 m
- Pendiente: 7% (4°)

3.4 SISTEMA ESTRUCTURAL ADOPTADO

Los pórticos centrales de la nave están formados por dinteles en celosía (cerchas), empotradas en pilares de perfiles tubulares.



Figura 3-2 - Topología de la celosía

La geometría de la celosía ha sido seleccionada por el ICT de acuerdo a los siguientes criterios:

- Tipología recomendada: WARREN con la primera diagonal traccionada
- Canto (h) (luz = L):

$$\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{10}$$

- Ángulo de encuentro de las diagonales (θ):
 - Se recomienda: $\theta \geq 30^\circ$. Ángulos $\theta < 30^\circ$ dificultan la ejecución de la soldadura en el talón de la unión por falta de accesibilidad de la antorcha

Así, la celosía del dintel se propone de canto constante, con cordones paralelos y barras de relleno de igual longitud y ángulo de corte en sus extremos.

Por otro lado, con el fin de simplificar los cálculos se han tomado como barras para el cálculo los ejes de los perfiles, despreciando las excentricidades en los nudos y simplificando las uniones de los cordones superior e inferior de cada lado, en la clave de la cercha.

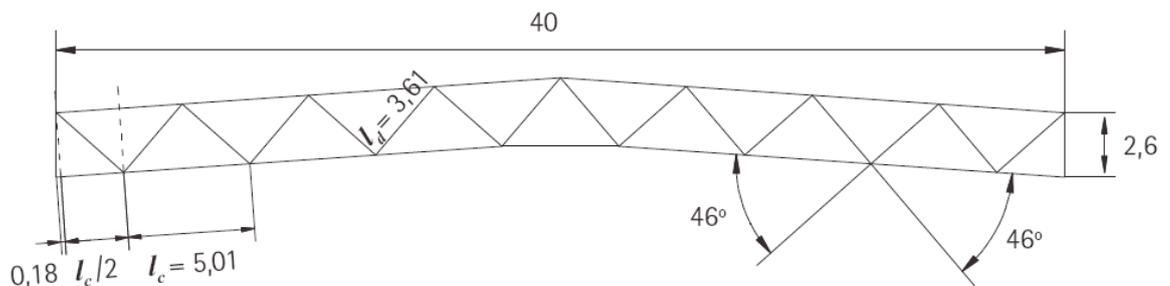


Figura 3-3 - Dimensiones principales de la celosía

Las cerchas están formadas por perfiles tubulares de diferentes tipos:

54 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

- El cordón superior está formado por un perfil tubular rectangular RHS 200x150x8 mm
- El cordón inferior está formado por un perfil tubular cuadrado SHS 120x8 mm
- Las diagonales están formadas por perfiles tubulares cuadrados SHS, de 2 tipos: las más solicitadas se han resuelto con perfiles SHS 100x4 mm, y las menos solicitadas se han resuelto con perfiles SHS 70x4 mm.

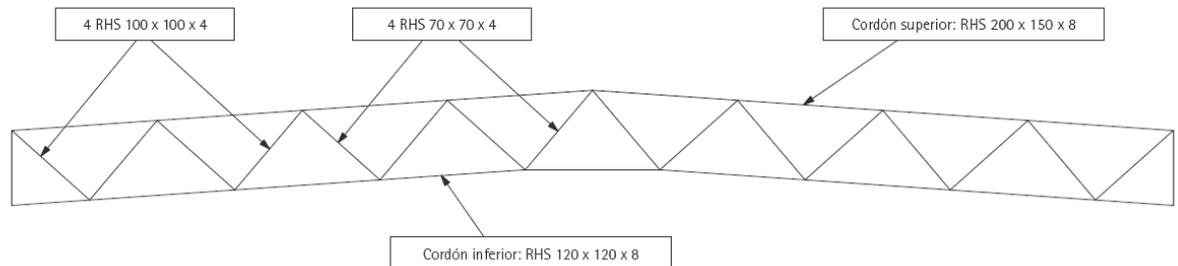


Figura 3-4 - Relación de perfiles seleccionados

Los pilares están formados por el mismo perfil tubular que el cordón superior RHS 200x150x8 mm.

La unión de los pilares con la cimentación se ha considerado que es un empotramiento, con el diseño de la figura 3-5.

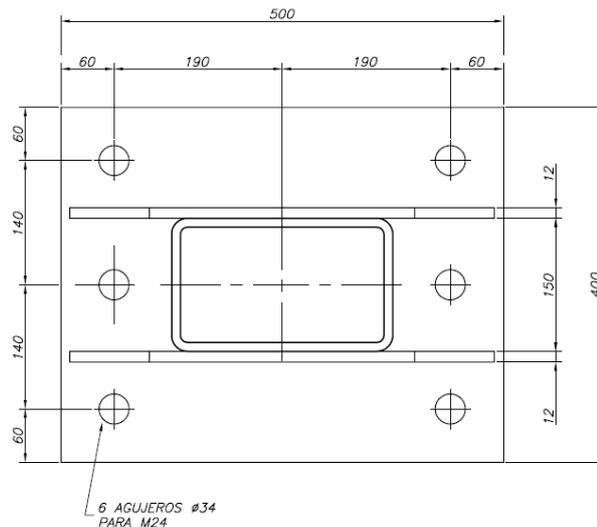


Figura 3-5 - Detalle en planta unión pilar a zapata

Con el fin de comprobar la fiabilidad de los cálculos existentes en la guía, se ha hecho una primera aproximación al problema, calculando la estructura mediante el programa Disseny desarrollado por el Dpto. de Estructuras y Construcción de la UPCT.

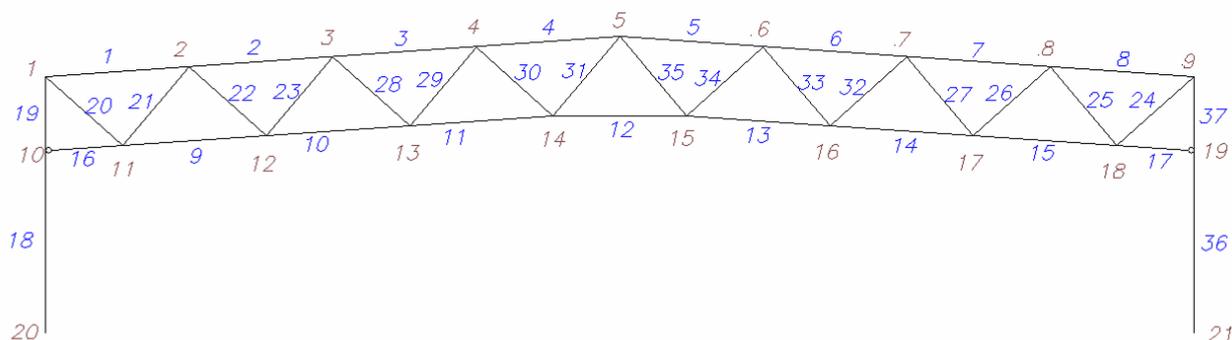


Figura 3-6 - Asignación de números a nudos y barras

Las coordenadas de los nudos son las siguientes:

Tabla 3.1 - Coordenadas de los nudos

Número de nudo	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
2	5.000000E+00	3.500000E-01	0.000000E+00
3	1.000000E+01	7.000000E-01	0.000000E+00
4	1.500000E+01	1.050000E+00	0.000000E+00
5	2.000000E+01	1.400000E+00	0.000000E+00
6	2.500000E+01	1.050000E+00	0.000000E+00
7	3.000000E+01	7.000000E-01	0.000000E+00
8	3.500000E+01	3.500000E-01	0.000000E+00
9	4.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00
10	0.000000E+00	-2.600000E+00	0.000000E+00
11	2.681113E+00	-2.412322E+00	0.000000E+00
12	7.681113E+00	-2.062322E+00	0.000000E+00
13	1.268111E+01	-1.712322E+00	0.000000E+00
14	1.768111E+01	-1.362322E+00	0.000000E+00
15	2.231889E+01	-1.362322E+00	0.000000E+00
16	2.731889E+01	-1.712322E+00	0.000000E+00
17	3.231889E+01	-2.062322E+00	0.000000E+00
18	3.731889E+01	-2.412322E+00	0.000000E+00
19	4.000000E+01	-2.600000E+00	0.000000E+00
20	0.000000E+00	-9.000000E+00	0.000000E+00
21	4.000000E+01	-9.000000E+00	0.000000E+00

3.5 DISEÑO DE LAS UNIONES

De acuerdo a lo especificado por la guía del ICT, Se debe buscar el mayor grado de prefabricación posible, para sacar el máximo partido de los medios y condiciones de trabajo disponibles en taller. De esta manera, se reducirán al máximo el número de operaciones a realizar en obra, minimizando el desplazamiento de medios y personal cualificado a la misma.

Con esta filosofía, las uniones se ejecutarán:

- Soldadas para fabricación en taller:
 - nudos de la celosía
 - uniones en prolongación de cordones (hasta la longitud total de celosía impuesta por las limitaciones del espacio disponible en taller y en obra, el transporte, etc.)
 - resto de detalles constructivos.

- Atornilladas para montaje en obra:
 - Uniones celosía – pilar
 - unión de subconjuntos,

La tipología recomendada para la celosía son los nudos en “K” con espaciamiento. Se comprobará que la geometría del nudo y las dimensiones de los elementos que concurren en él, satisfagan el campo de validez de las ecuaciones de comprobación de su eficiencia, poniendo especial atención a los límites de excentricidad.

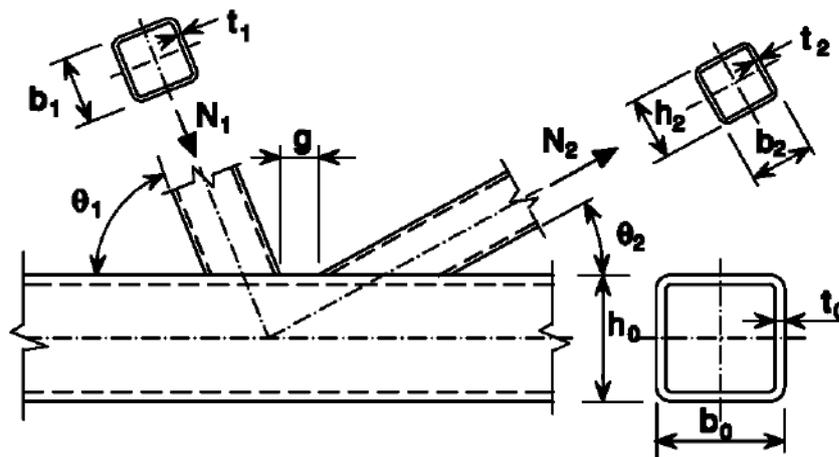
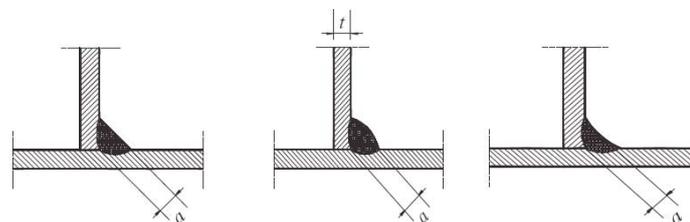


Figura 3-7 - Uniones en K con espaciamiento

Con respecto a las soldaduras, en la guía del ICT, se ha previsto una unión soldada organizada alrededor del perímetro completo de la barra de relleno mediante una soldadura a tope, una soldadura en ángulo, o una combinación de ambas, que debe proporcionar una resistencia no inferior a la resistencia de cálculo del nudo. Esto lo garantizan los siguientes espesores de garganta mínima (a) para las soldaduras, asumiendo los electrodos y tipos de acero adecuados:



$$a \geq 1,00 t, \text{ para S 275}$$

$$a \geq 1,07 t, \text{ para S 355}$$

Figura 3-8 - Garganta mínima en soldaduras en ángulo

A continuación se adjuntan unas figuras donde quedan establecidos los detalles de las soldaduras, así como las condiciones básicas para aplicarlos.

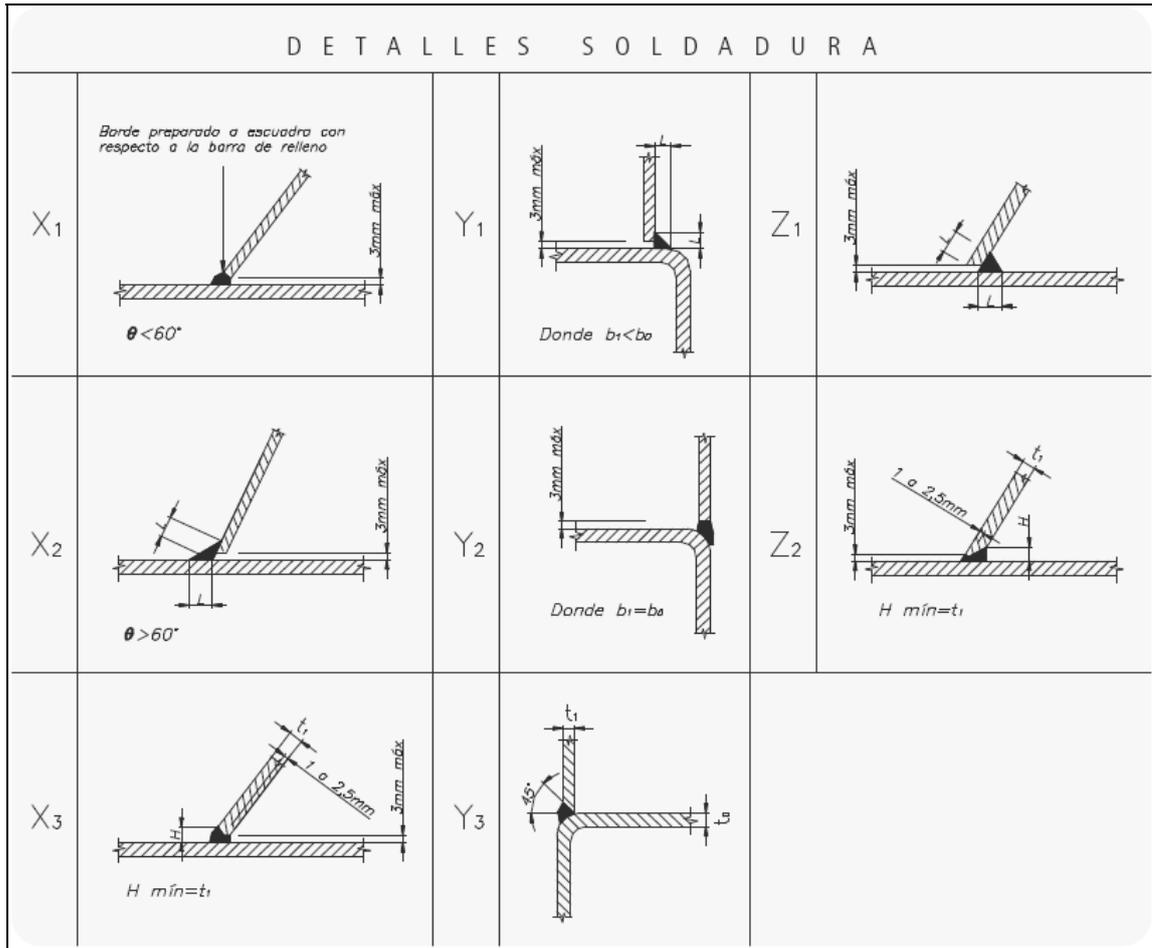


Figura 3-9 - Detalles de soldaduras

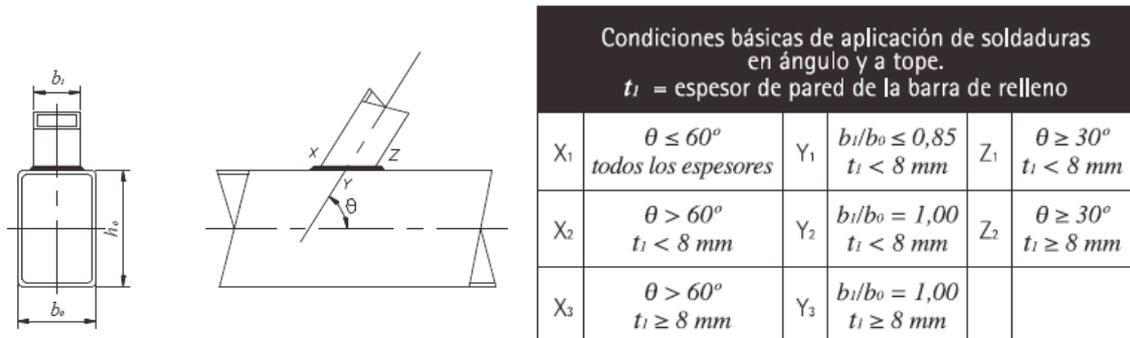


Figura 3-10 - Condiciones básicas de aplicación de soldaduras

3.6 MATERIALES EMPLEADOS

El criterio de selección del material de la estructura es el siguiente:

- Perfiles tubulares de espesor de pared < 8 mm: S275 J0H
- Perfiles tubulares de espesor de pared \geq 8 mm: S355 J2H
- Tornillos y tuercas: A10t
- Chapas y Redondos de arriostamiento: S275 JR

Así, se han seleccionado los siguientes materiales para cada uno de los elementos del pórtico:

- Cordón Superior (espesor 8 mm): S355 J2H
- Cordón Inferior (espesor 8 mm): S355 J2H
- Pilares (espesor 8 mm): S355 J2H
- Diagonales (espesor 4 mm): S275 J0H

3.7 HIPÓTESIS DE CÁLCULO

En el capítulo 4 de la guía, se indican las hipótesis de cálculo, con nomenclatura de acuerdo a los Eurocódigos. Hay que advertir que aquí se han tomado literalmente las hipótesis establecidas por la guía, con el fin de poder utilizar sus resultados como referencia para la validación de nuestro modelo. Por lo que se emplearán los criterios establecidos por ellos sin ponerlos en cuestión.

3.7.1 Modelo de cálculo

Se asume que los cordones son elementos continuos y que las diagonales se comportan como barras articuladas en sus extremos, con lo que, en el caso de cargas aplicadas en los nudos de la celosía, todos los elementos que constituyen la estructura estarán sometidos únicamente a esfuerzos axiales (tracción o compresión).

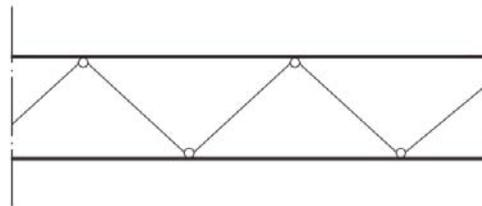


Figura 3-11 - Detalle definición de nudos

Por otro lado, con el fin de no introducir momentos en el cordón inferior, se ha supuesto, aunque no se indica en la guía del ICT, que la unión del cordón inferior a los pilares se realiza mediante una articulación:

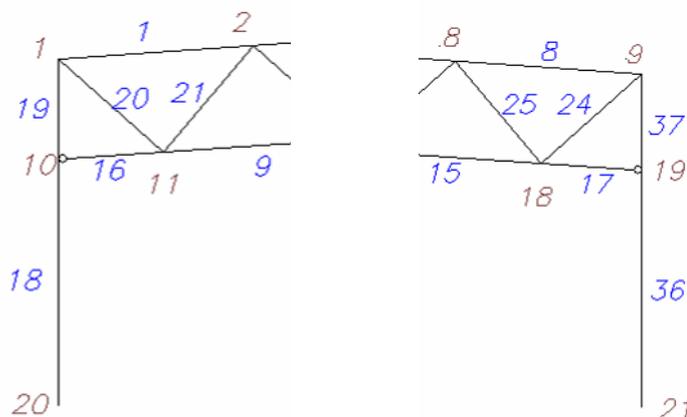


Figura 3-12 - Detalle nudo 10 y 19 del cordón inferior

3.7.2 Acciones adoptadas en el cálculo

Se ha despreciado la ubicación de las correas en el cordón superior, por lo que todas las acciones en cubierta y fachada se aplican de forma uniforme distribuida directamente sobre el cordón superior y pilares, respectivamente.

- Cargas Permanentes:
 - Panel de Cubierta (G_{k1}): $0,20 \text{ kN/m}^2$
 - Teniendo en cuenta la modulación entre cerchas y que dicha carga se considera aplicada directamente sobre el cordón superior, se aplicará una carga lineal en ejes globales de:

$$G_{k1} = 0,20 \cdot 6 = 1,20 \text{ kN/ml}$$

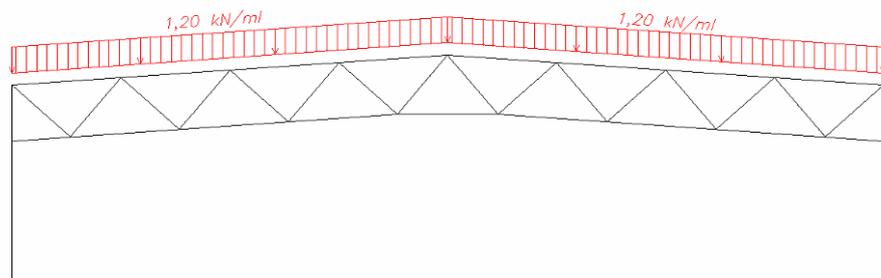


Figura 3-13 - Cargas por Cubierta (G_{k1})

- Peso Propio (G_{k2}): según dimensionado adoptado, se aplicará directamente por el programa de cálculo.
- Correas (G_{k3}): $0,07 \text{ kN/m}^2$
 - Teniendo en cuenta la modulación entre cerchas y que dicha carga se considera aplicada directamente sobre el cordón superior, se aplicará una carga lineal en ejes globales de:

$$G_{k3} = 0,07 \cdot 6 = 0,42 \text{ kN/ml}$$

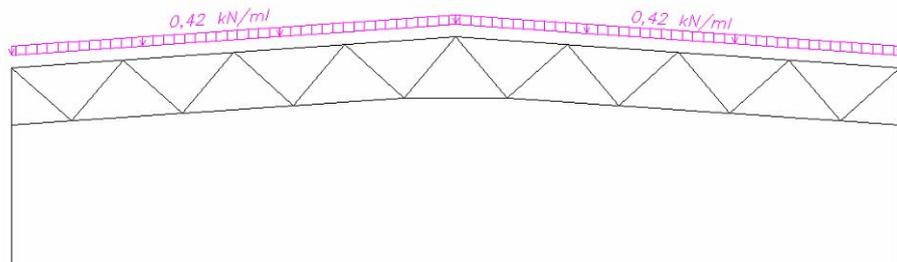


Figura 3-14 - Cargas por correas (G_{k3})

- El equivalente de las cargas a aplicar por cubierta y correas ($G_{k1} + G_{k3}$), aplicadas puntualmente en los nudos del cordón superior tiene los siguientes valores:

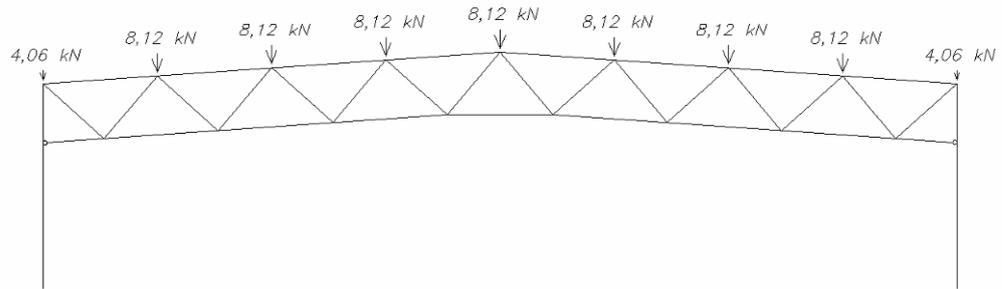


Figura 3-15 - Cargas puntuales por Cubierta y correas ($G_{k1} + G_{k3}$)

- No se considera el peso de los paneles del cerramiento de fachada.
- Sobrecargas:
 - Nieve (Q_{k1}): $0,80 \text{ kN/m}^2$
 - Teniendo en cuenta la modulación entre cerchas y que dicha carga se considera aplicada mediante proyección sobre el cordón superior, se aplicará una carga lineal en ejes globales de:

$$Q_{k1} = 0,80 \cdot 6 \cdot \cos 4^\circ = 4,79 \text{ kN/ml}$$

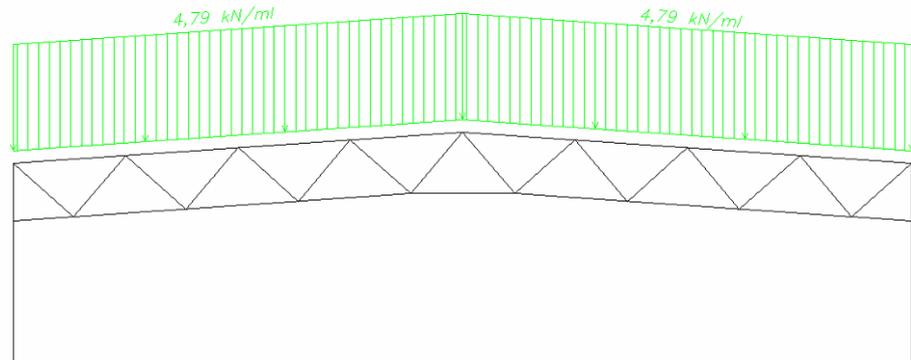


Figura 3-16 - Cargas por nieve

- El equivalente de las cargas a aplicar por nieve, aplicadas puntualmente en los nudos del cordón superior tiene los siguientes valores:

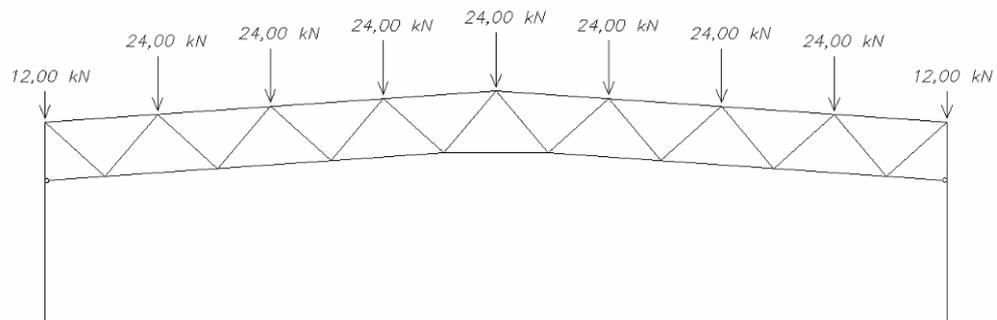


Figura 3-17 - Cargas puntuales por nieve

- Uso (Q_{k2}): 0,75 kN/m² (accesible sólo para mantenimiento)
 - Teniendo en cuenta la modulación entre cerchas y que dicha carga se considera aplicada mediante proyección sobre el cordón superior, se aplicará una carga lineal en ejes globales de:

$$Q_{k2} = 0,75 \cdot 6 \cdot \cos 4^\circ = 4,49 \text{ kN/ml}$$

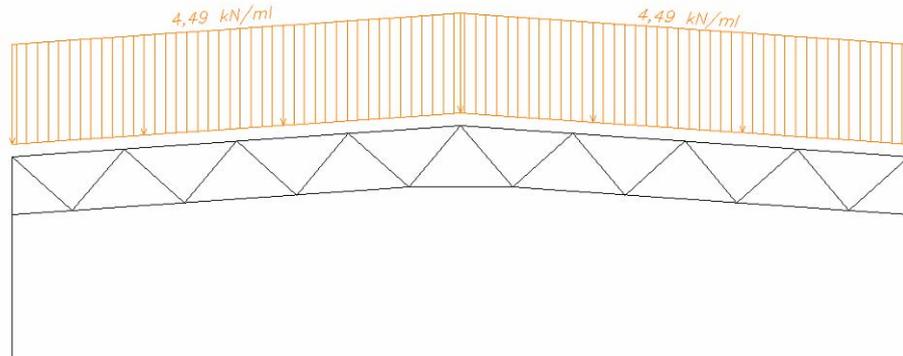


Figura 3-18 - Cargas por Uso

- El equivalente de las cargas a aplicar por sobrecarga de uso, aplicadas puntualmente en los nudos del cordón superior tiene los siguientes valores:

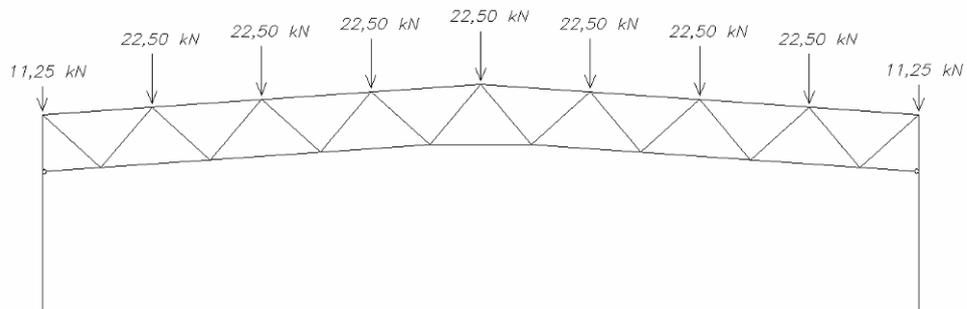


Figura 3-19 - Cargas puntuales por Uso

- No se consideran simultáneamente las acciones precedentes de la nieve y de uso, sólo la más desfavorable.
- Viento (Q_{k3}): Se han supuesto una situación normal y una altura de coronación entre 0 y 10m, por lo que la presión dinámica es 0,50 kN/m².
 - En principio, para una inclinación de cubierta de 4° (7% de pendiente), los esfuerzos eólicos actuantes sobre la celosía se prevén de succión. Sólo se ha considerado una hipótesis en la guía del ICT, por lo que de acuerdo a la NBE/AE-88, se han establecido con los siguientes coeficientes eólicos:

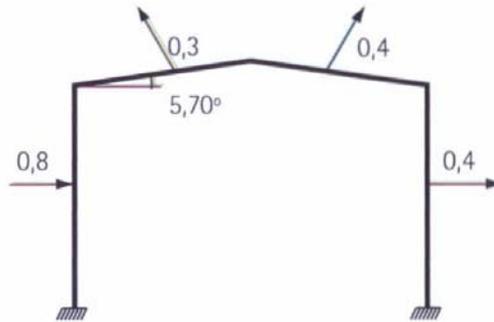


Figura 3-20 - Coeficientes eólicos

- Teniendo en cuenta la modulación entre cerchas y que las cargas de viento se consideran aplicadas directamente sobre el cordón superior y los pilares, se aplicará una carga lineal en los ejes locales de cada uno de los elementos afectados:

$$Q_{k3,1} = 0,50 \cdot 0,4 \cdot 6 = 1,20 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{k3,2} = 0,50 \cdot 0,4 \cdot 6 = 1,20 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{k3,3} = 0,50 \cdot 0,3 \cdot 6 = 0,90 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{k3,4} = 0,50 \cdot 0,8 \cdot 6 = 2,40 \text{ kN/ml}$$

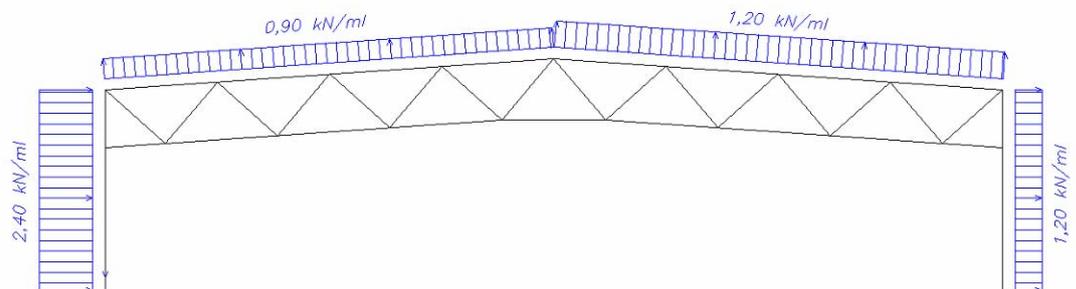


Figura 3-21 - Cargas por viento

- El equivalente de las cargas a aplicar por viento, aplicadas puntualmente en los nudos del cordón superior tiene los siguientes valores:

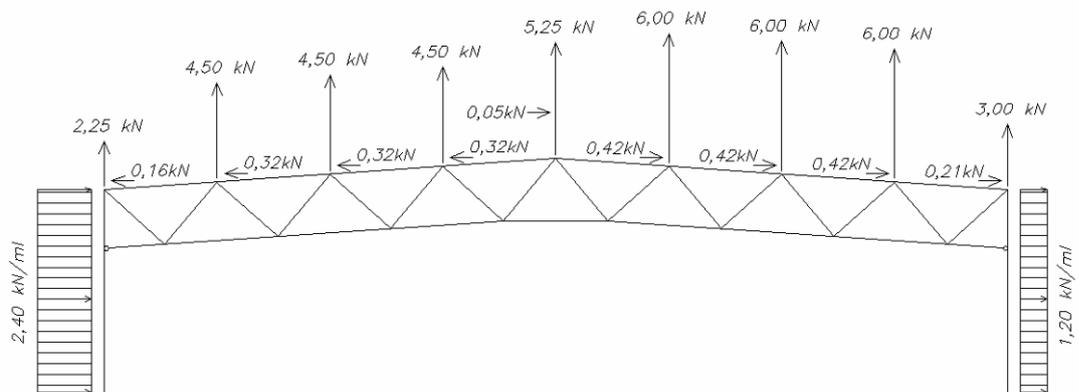


Figura 3-22 - Cargas puntuales por viento

No se han considerado ni acciones térmicas, ni reológicas ni sísmicas.

3.7.3 Coeficientes de ponderación de acciones

Los coeficientes de ponderación de acciones se han obtenido del método simplificado, con el fin de darle un carácter general al ejemplo, ya que no se indica cual es el uso del edificio. Así, los coeficientes adoptados son:

- Coeficientes de Mayoración Estado Límite Último:
 - Carga permanente (γ_G): 1,35
 - Cargas variables (γ_Q): 1,50
- Coeficientes de Mayoración Estado Límite de Servicio:
 - Carga permanente (γ_G): 1,00
 - Cargas variables (γ_Q): 1,00

3.7.4 Combinación de acciones adoptadas

Para determinar los valores de cálculo de las cargas que actúan sobre la estructura en situaciones de cálculo permanentes y transitorias, se utilizará una de las expresiones siguientes, eligiéndose aquella que presente el valor superior:

Considerando sólo la acción variable más desfavorable:

$$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$$

Considerando todas las acciones variables desfavorables:

$$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + 0,9 \cdot \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot Q_{k,i}$$

De acuerdo a estas expresiones y a los coeficientes del apartado anterior, las combinaciones consideradas para el análisis del estado límite último (ELU) del pórtico son las siguientes:

- ESTADO 1: "Hipótesis simple: 1.00*AC":

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3})$$

- ESTADO 2: " Hipótesis simple: 1.00*SN":

$$1,00 \cdot Q_{k1}$$

- ESTADO 3: " Hipótesis simple: 1.00*SU":

$$1,00 \cdot Q_{k2}$$

- ESTADO 4: " Hipótesis simple: 1.00*SV":

$$1,00 \cdot Q_{k3}$$

64 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

- ESTADO 5: "Caso Ia: 1.35*AC":

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3})$$

- ESTADO 6 "Caso Ia: 1.00*AC + 1.5*SU"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k2}$$

- ESTADO 7 "Caso Ia: 1.35*AC + 1.5*SU"

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k2}$$

- ESTADO 8 "Caso Ia: 1.00*AC + 1.5*SV"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 9 "Caso Ia: 1.35*AC + 1.5*SV"

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 10 "Caso Ia: 1.00*AC + 0,9*(1.5*SU + 1.5*SV)"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,35 \cdot Q_{k2} + 1,35 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 11 "Caso Ia: 1.35*AC + 0,9*(1.5*SU + 1.5*SV)"

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,35 \cdot Q_{k2} + 1,35 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 12 "Caso Ib: 1.00*AC + 1.5*SN"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k1}$$

- ESTADO 13 "Caso Ib: 1.35*AC + 1.5*SN"

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,50 \cdot Q_{k1}$$

- ESTADO 14 "Caso Ic: 1.00*AC + 0,9*(1.5*SN + 1.5*SV)"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,35 \cdot Q_{k1} + 1,35 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 15 "Caso Ic: 1.35*AC + 0,9*(1.5*SN + 1.5*SV)"

$$1,35 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,35 \cdot Q_{k1} + 1,35 \cdot Q_{k3}$$

Por otro lado, las combinaciones consideradas para el análisis del estado límite de servicio (ELS) del pórtico son las siguientes:

- ESTADOS ELU: 1,2,3,4 – (Hipótesis Simples)

- ESTADO 16 "Caso Ia: 1.00*AC + 1.0*SU"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,00 \cdot Q_{k2}$$

- ESTADO 17 "Caso Ia: 1.00*AC + 1.0*SV"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,00 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 18 "Caso Ia: 1.00*AC + 0,9*(1.0*SU + 1.0*SV)"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 0,9 \cdot Q_{k2} + 0,9 \cdot Q_{k3}$$

- ESTADO 19 "Caso Ib: 1.00*AC + 1.0*SN"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 1,00 \cdot Q_{k1}$$

- ESTADO 20 "Caso Ic: 1.00*AC + 0,9*(1.0*SN + 1.0*SV)"

$$1,00 \cdot (G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}) + 0,9 \cdot Q_{k1} + 0,9 \cdot Q_{k3}$$

Estos estados quedan resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 - Estados de combinación de cargas para el Cálculo del Estado Límite Último y de Servicio

Caso	Estado	ELU	ELS	G_{k1}	G_{k2}	G_{k3}	Q_{k1}	Q_{k2}	Q_{k3}
HS	1	X	X	1,00	1,00	1,00			
HS	2	X	X				1,00		
HS	3	X	X					1,00	
HS	4	X	X						1,00
Ia	5	X		1,35	1,35	1,35			
Ia	6	X		1,00	1,00	1,00		1,50	
Ia	7	X		1,35	1,35	1,35		1,50	
Ia	8	X		1,00	1,00	1,00			1,50
Ia	9	X		1,35	1,35	1,35			1,50
Ia	10	X		1,00	1,00	1,00		1,35	1,35
Ia	11	X		1,35	1,35	1,35		1,35	1,35
Ib	12	X		1,00	1,00	1,00	1,50		
Ib	13	X		1,35	1,35	1,35	1,50		
Ic	14	X		1,00	1,00	1,00	1,35		1,35
Ic	15	X		1,35	1,35	1,35	1,35		1,35
Ia	16		X	1,00	1,00	1,00		1,00	
Ia	17		X	1,00	1,00	1,00			1,00
Ia	18		X	1,00	1,00	1,00		0,90	0,90
Ib	19		X	1,00	1,00	1,00	1,00		
Ic	20		X	1,00	1,00	1,00	0,90		0,90

3.7.5 Deformaciones admisibles

Como límites de deformación vertical en el dintel, se ha considerado los valores proporcionados por las normas consideradas:

- Según EC-3, en techos en general $L/250$
- Según NBE EA-95, en vigas de cubierta $L/200$

Ante la no coincidencia en los límites de deformación, se ha adoptado el más restrictivo, correspondiente al EC-3:

$$L/250$$

Por otro lado, según la guía del ICT, la flecha obtenida por los métodos de cálculo tradicionales, basados en criterios elásticos, lleva a resultados optimistas respecto de las deformaciones reales obtenidas en celosías ejecutadas empleando nudos con espaciamiento. La experiencia sitúa la diferencia en un 15% aproximadamente.

Así, en la guía del ICT, la deformación (flecha) real de la celosía se obtendrá aplicando un coeficiente de mayoración de 1,15 sobre el resultado conseguido bajo criterios elásticos.

3.7.6 Resistencia de cálculo del acero

En este proyecto se ha considerado que los materiales tienen una calidad mínima que permite suponer un límite elástico mínimo garantizado. Así el coeficiente de minoración del material aplicado es:

- Para aceros con límite elástico mínimo garantizado (γ_M): 1,00

La estructura metálica considerada tiene 2 tipos de acero, con los siguientes límites elástico y resistencias de cálculo de acuerdo a lo indicado en el Eurocódigo 3 para espesores menores de 40mm:

- S275 J0H
 - Límite elástico característico (f_{yk}): 275 N/mm^2
 - Resistencia de cálculo (R_d): 275 N/mm^2
- S355 J2H
 - Límite elástico característico (f_{yk}): 355 N/mm^2
 - Resistencia de cálculo (R_d): 355 N/mm^2

3.7.7 Propiedades del acero

Para los cálculos de las estructuras de acero, se han adoptado los siguientes valores, para las características que se indican, de acuerdo a lo especificado en el Eurocódigo 3:

- Módulo de elasticidad: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Módulo de elasticidad transversal: $G = E/[2(1 + \nu)]$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$

- Coeficiente de dilatación lineal: $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Densidad: $\gamma = 7.850 \text{ Kg/m}^3$

3.7.8 Longitudes de pandeo

La determinación de las longitudes eficaces de pandeo (l_e) se ha realizado de acuerdo a lo indicado en la guía del ICT:

“se parte de uniones soldadas directas entre Perfiles Tubulares de acero, donde toda la sección va a intervenir en la entrega y recepción de los esfuerzos, por lo que en realidad, las barras de relleno de una viga en celosía soldada, están parcialmente empotradas en los cordones. Sin embargo, el modelo adoptado para el cálculo estático, supone las uniones de las barras de relleno articuladas a los cordones. Como consecuencia, en el dimensionado de barras se reduce la longitud teórica del elemento, para obtener la longitud eficaz de pandeo:

- Cordones:
 - En el plano: $l_{e.c} = 0,9 \times$ longitud teórica entre nudos
 - Fuera del plano: $l_{e.c} = 0,9 \times$ longitud teórica entre puntos arriostrados
- Barras de relleno:
 - En y fuera del plano: $l_{e.d} = 0,75 \times$ longitud teórica entre nudos

De forma general, se ha escogido la Curva Europea “b” de pandeo para el cálculo del factor de reducción (χ), bajo la suposición por parte de la guía del ICT de que son elementos conformados en frío. No obstante, quisiera resaltar que de acuerdo a la tabla 6.2 de la Norma EN 1993-1-1:2005, a los perfiles con sección hueca, conformados en frío, la curva de pandeo es la “c”, para cualquier eje.

3.8 CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS POR MEDIO DE ORDENADOR

3.8.1 Análisis de la estructura

Para el cálculo y comprobación definitivo, la guía del ICT ha seleccionado un software de cálculo global de Estructura Metálica basado en métodos de cálculo matricial. En concreto el software se denomina Metal 3D, la versión utilizada es la 2002.i, desarrollado por CYPE Ingenieros.

Una vez realizado el análisis con el programa, los resultados obtenidos en la guía del ICT, correspondientes a la envolvente de esfuerzos pésimos de cada barra, son los siguientes:

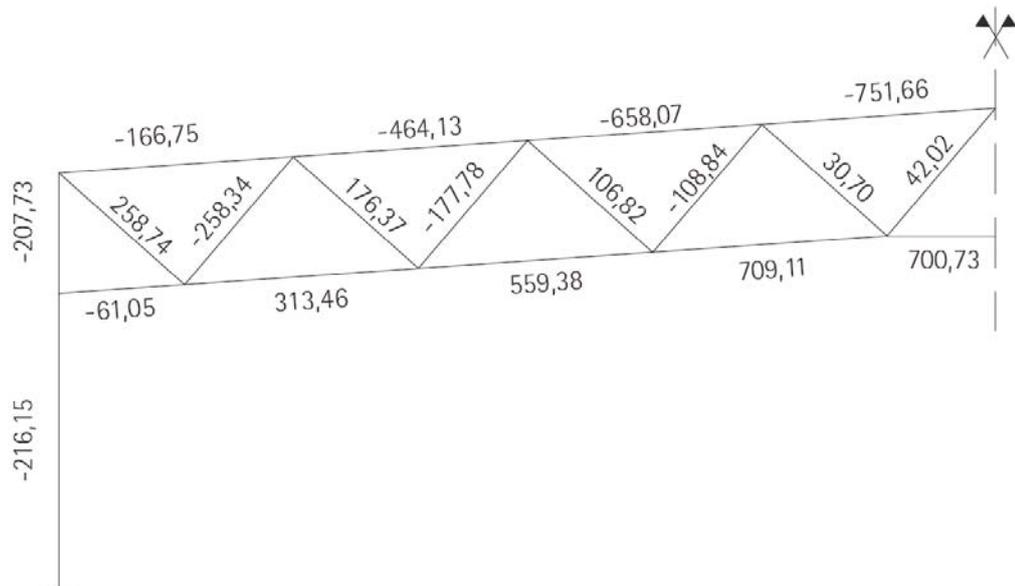


Figura 3-23 - Esfuerzos Axiales en las barras de la celosía

Por otro lado, en el análisis realizado en este proyecto de la estructura mediante Disseny, para verificación de los cálculos realizados por el ICT, los resultados son los indicados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 - Comparativa resultados análisis estructural

Barra	Esfuerzo Axil ICT (kN)	Esfuerzo Axil Disseny (kN)	Diferencias en valor absoluto	
			(kN)	%
1	-166,75	-175,70	8,95	5,37%
2	-464,13	-473,10	8,97	1,93%
3	-658,07	-668,90	10,83	1,65%
4	-751,66	-764,60	12,94	1,72%
9	313,46	328,10	14,64	4,67%
10	559,38	578,70	19,32	3,45%
11	709,11	727,00	17,89	2,52%
12	700,73	730,10	29,37	4,19%
16	-61,05	-41,54	-19,51	-31,96%
18	-216,15	-212,80	-3,35	-1,55%
19	-207,73	-208,30	0,57	0,27%
20	258,74	254,20	-4,54	-1,75%
21	-258,34	-251,20	-7,14	-2,76%
22	176,37	181,70	5,33	3,02%
23	-177,78	-178,60	0,82	0,46%

Barra	Esfuerzo Axil ICT (kN)	Esfuerzo Axil Disseny (kN)	Diferencias en valor absoluto	
			(kN)	%
28	106,82	108,20	1,38	1,29%
29	-108,84	-105,10	-3,74	-3,44%
30	30,70	37,74	7,04	22,93%
31	42,02	36,08	-5,94	-14,14%

Notas sobre la verificación:

- En la guía del ICT únicamente se han considerado los esfuerzos axiales de cada barra, despreciando los cortantes y momentos producidos al considerar los cordones como barras continuas.
- Como el dimensionado en la guía del ICT se ha realizado de forma simétrica con respecto al eje central de la estructura, se han tomado como esfuerzos máximos el mayor en valor absoluto de las 2 barras simétricas correspondientes. Esto afecta sobre todo a la barra 16.

Conclusiones:

- De forma general los porcentajes de variación son inferiores al $\pm 5\%$, excepto en las barras de menor esfuerzo, donde pequeñas variaciones suponen mucho mayor porcentaje de variación.

3.8.2 Verificación del dimensionado de la estructura según ELU

3.8.2.1 *Cordón Superior*

Para su dimensionado, se ha tomado el esfuerzo de cálculo máximo suministrado por el programa: $N_{Sd,c,sup} = -751,66$ kN.

Los valores de cálculo considerados, que dan validez al dimensionado de la barra son:

PERFIL (RHS)	$N_{Rd,t,c}$	$\lambda \leq 200$	$h/t < 37,2$	$15 < b/t < 25$	$\chi \cdot A \geq 21,17 \text{ cm}^2$
200x150x8	1.817,60 kN	75,78	25,0	18,8	30,89

3.8.2.2 *Cordón Inferior*

El esfuerzo de cálculo máximo a tracción suministrado por el programa es de $N_{Sd,c,inf} = 709,11$ kN.

No obstante, el primer tramo del cordón inferior del dintel está sometido a esfuerzo de compresión ($N_{Sd,c,inf} = -61,05$ kN), lo que obliga a arriostrarlo lateralmente para asegurar su correcto funcionamiento. Como alternativa podría realizarse un estudio sobre el Perfil Tubular adoptado en el predimensionado (RHS 120 x 120 x 8 con acero S 355 J2H), con el objeto de comprobar su suficiencia sin arriostramientos laterales, sin embargo, ello exigiría la aplicación de un método relativamente complejo que queda fuera del ámbito de la Guía del ICT.

A continuación se desarrolla el cálculo de la longitud máxima admisible entre puntos arriostrados para que el perfil RHS 120 x 120 x 8 pueda soportar el esfuerzo

de compresión señalado. Esto permitirá establecer los puntos necesarios de arriostramiento lateral del citado perfil.

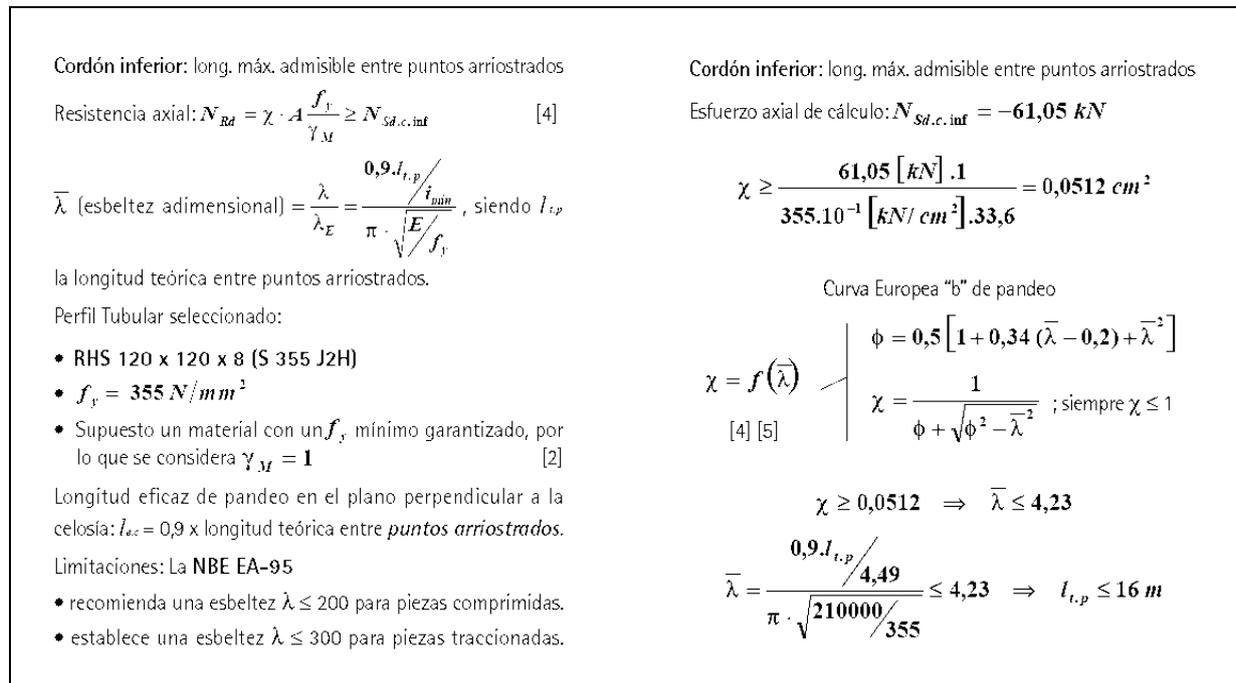


Figura 3-24 - Comprobación pandeo cordón superior guía ICT

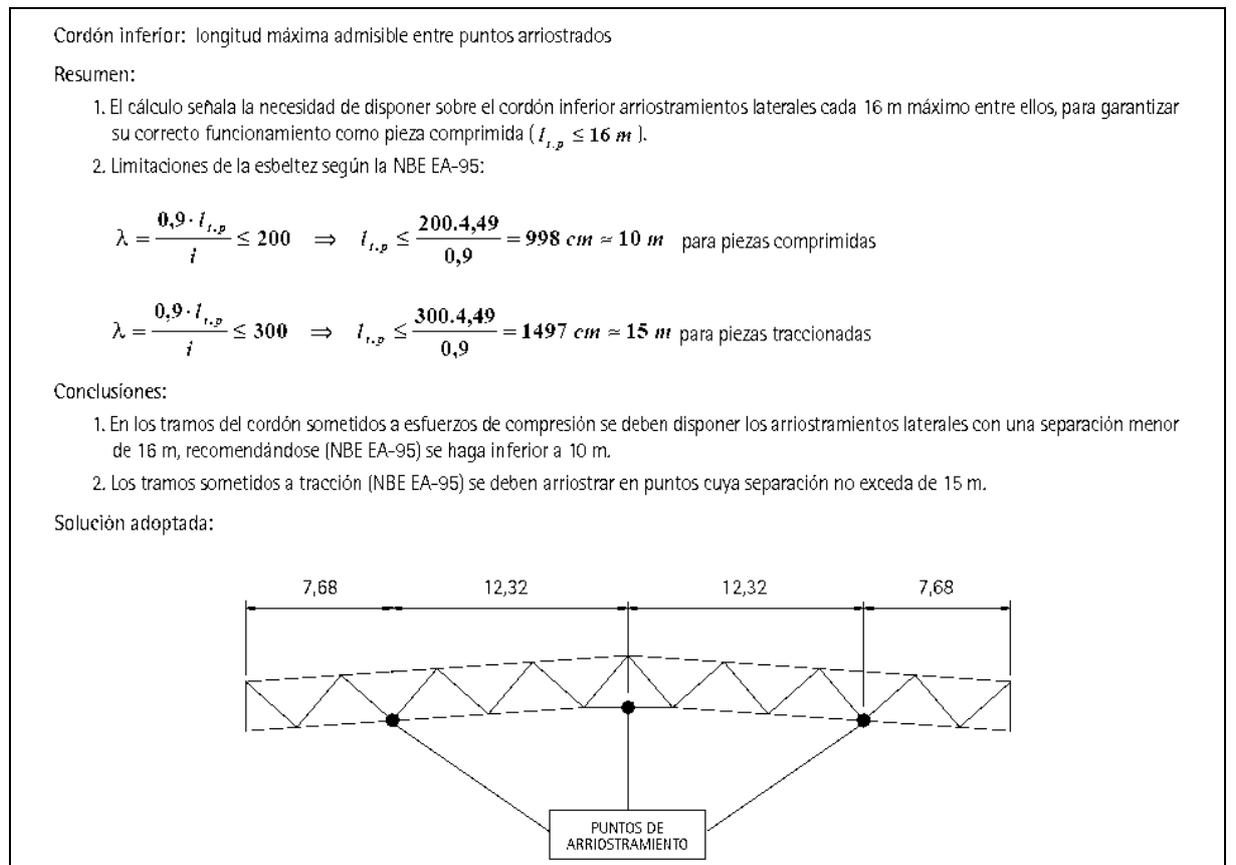


Figura 3-25 - Comprobación pandeo cordón superior guía ICT (continuación)

Los valores de cálculo considerados, que dan validez al dimensionado de la barra son:

PERFIL (RHS)	$N_{Rd,t,c}$	$h/t < 37,2$	$15 < b/t < 25$
120x120x8	1.192,80 kN	15,0	15,0

No se han incluido los datos de la comprobación de pandeo, ya que con los puntos de arriostramiento indicados, se asegura el cumplimiento de este perfil.

3.8.2.3 Diagonales

Conociendo el esfuerzo de cálculo máximo que ha de soportar cada barra, se tiene la posibilidad de seleccionar y unificar perfiles bajo criterios de grado de sollicitación.

Para el ejemplo que nos ocupa, se definen únicamente dos tipos de Perfiles Tubulares para las diagonales, el más robusto para las externas (las más cargadas) y el más esbelto para las centrales (las menos solicitadas).

- Diagonales Externas: Las cuatro primeras diagonales de ambos extremos del dintel (8 en total) se unifican, seleccionando para todas ellas un mismo Perfil Tubular. Para su dimensionado, se ha tomado el esfuerzo de cálculo máximo suministrado por el programa correspondiente a la diagonal del grupo en situación más desfavorable, y que coincide con el de la diagonal más comprimida del grupo $N_{Sd,d,e} = -258,34$ kN.
 - Los valores de cálculo considerados, que dan validez al dimensionado de la barra son:

PERFIL (SHS)	$N_{Rd,t,c}$	$\lambda \leq 200$	$h/t < 37,2$	$\chi \cdot A \geq 9,39 \text{ cm}^2$
100x100x4	409,75 kN	69,6	25,0	10,80

- Diagonales Centrales: Las diagonales centrales del dintel (8 en total) también se unifican, seleccionando para todas ellas un mismo Perfil Tubular. También en este caso, para el dimensionado, se ha tomado el esfuerzo de cálculo máximo suministrado por el programa correspondiente a la diagonal del grupo en situación más desfavorable, y que coincide también con el de la diagonal más comprimida del grupo $N_{Sd,d,c} = -108,84$ kN
 - Los valores de cálculo considerados, que dan validez al dimensionado de la barra son:

PERFIL (SHS)	$N_{Rd,t,c}$	$\lambda \leq 200$	$h/t < 37,2$	$\chi \cdot A \geq 3,96 \text{ cm}^2$
70x70x4	277,75 kN	104,4	17,5	5,00

3.8.3 Comprobación de las deformaciones según ELS

El valor de la flecha en el centro de la celosía, determinada por el programa en base a criterios elásticos, es de $f = 91,50$ mm. La experiencia sitúa la flecha real obtenida en una celosía ejecutada empleando nudos en K con espaciamiento, en un 15% sobre el valor anterior. Por lo tanto:

$$f_{real} = 91,50 \cdot 1,15 = 105,23 \text{ mm}$$

El valor máximo de la flecha se ha establecido como:

$$f_{\max} = \frac{L}{250} = \frac{40 \cdot 10^3}{250} = 160 \text{ mm}$$

Por lo tanto CUMPLE.

Por otro lado, en el análisis realizado en este proyecto de la estructura mediante Disseny, para verificación de los cálculos realizados por el ICT, la flecha máxima obtenida es:

$$F_{\text{Disseny}} = 91,08 \text{ mm}$$

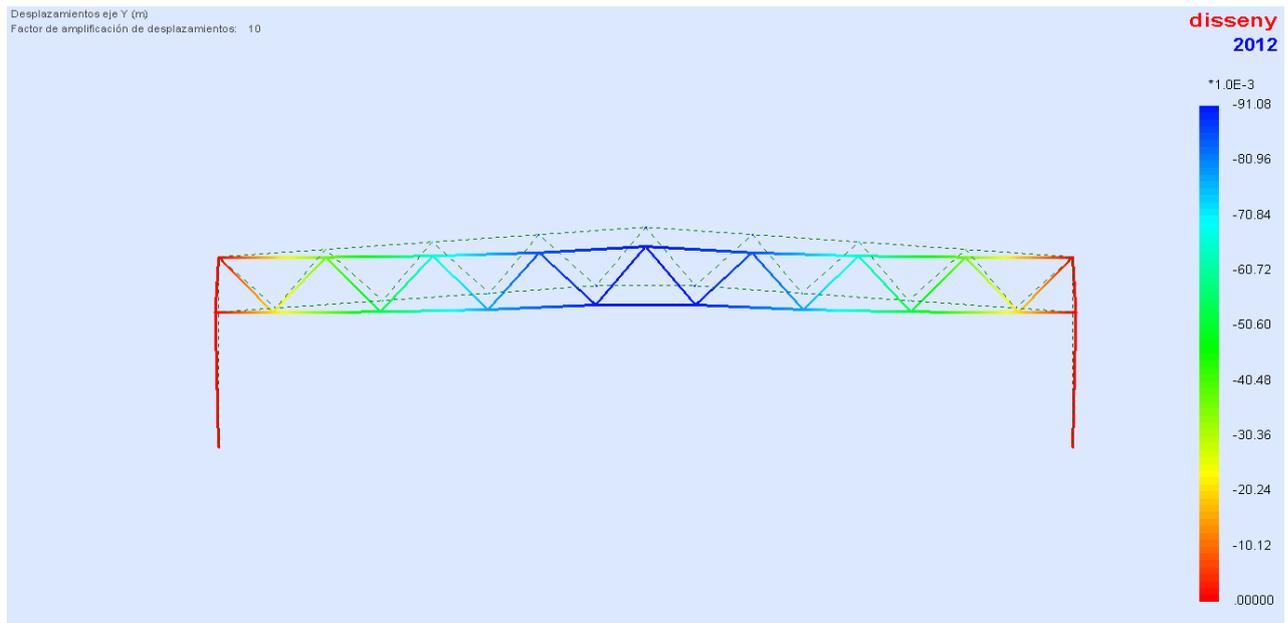


Figura 3-26 - Resultado flecha máxima en Y

Por lo tanto se puede dar por válido, al ser la diferencia inferior al 0.5%, con respecto al valor obtenido por la guía del ICT.

3.9 COMPROBACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS NUDOS DE LA CELOSÍA

3.9.1 Introducción

La verificación del comportamiento de los nudos, se ha realizado siguiendo las recomendaciones recogidas en las Guías de Diseño números 1 y 3 de la colección “Construcción con Perfiles Tubulares de Acero”, editadas por el CIDECT (Comité Internacional para el Desarrollo y Estudio de la Construcción Tubular). Recomendaciones que han sido incluidas en los Eurocódigos (EC-3).

Se ha empleado el programa de comprobación CIDJOINT desarrollado por CIDECT, para la verificación de los nudos.

Para considerar el nudo como eficiente (unión suficiente), los valores de cálculo de los esfuerzos axiales en las diagonales no deben superar las correspondientes resistencias de cálculo del nudo:

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}$$

Si las resistencias de cálculo del nudo (eficiencias) no son adecuadas, se aconseja actuar primero sobre su geometría, antes de proceder a cambios en las barras de relleno y/o cordones, y volver a comprobar la capacidad del nudo.

Caso de excentricidades, comprobar el efecto de los momentos primarios sobre el cordón comprimido, realizando el cálculo de comprobación para la interacción esfuerzo axial y momento flector.

Con objeto de simplificar la exposición de los cálculos y favorecer la comprensión de los mismos, se desarrollará únicamente la formulación correspondiente a dos nudos de la estructura, correspondientes a los más solicitados en cada cordón. Para el cordón superior el nudo número 2 y para el cordón inferior el nudo número 11.

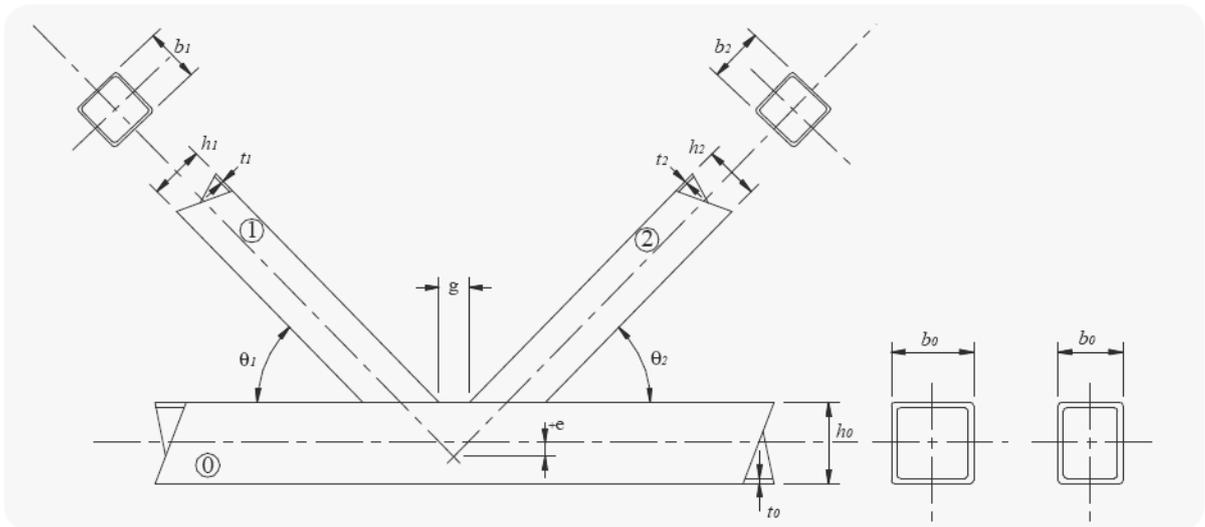


Figura 3-27 - Parámetros de la geometría del nudo en K

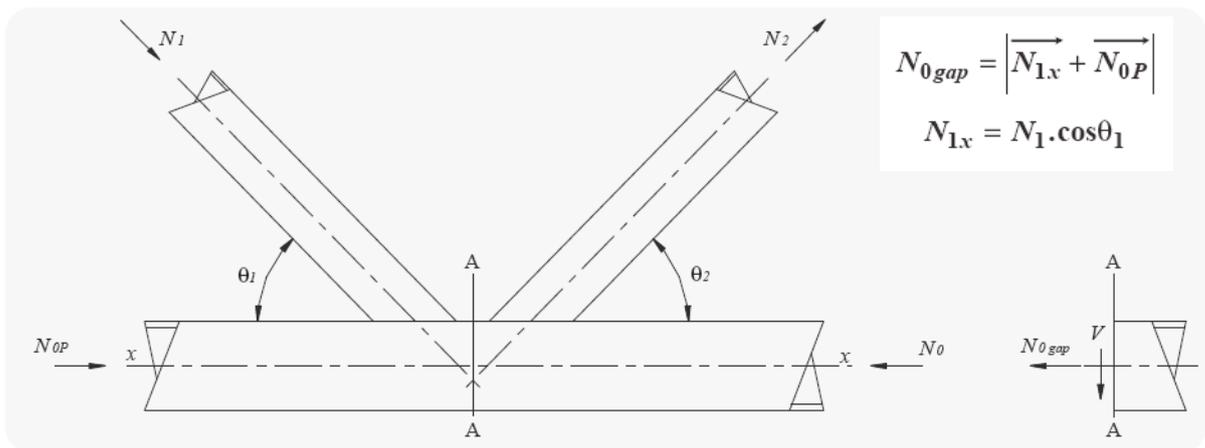


Figura 3-28 - Esfuerzos actuantes en el nudo en K

3.9.2 Modelo de cálculo

De acuerdo a lo indicado en capítulos anteriores, se va a resumir a continuación los parámetros utilizados para la comprobación de la eficiencia de los nudos en la guía del ICT.

Así en primer lugar se ha determinado que los nudos a analizar son exclusivamente del tipo K con espaciamiento, entre cordón RHS (rectangular o cuadrado) y diagonales RHS-cuadradas.

En segundo lugar, para poder despreciar los momentos secundarios en el cálculo de las uniones, causados por la rigidez rotacional de las uniones, se han de cumplir las siguientes condiciones:

- la geometría de la unión se encuentra dentro del rango de validez correcto
- La excentricidad está dentro de unos límites especificados
- En la guía del ICT, no se ha verificado que la relación entre la longitud y el canto del elemento en el plano de la viga en celosía, no es inferior al valor mínimo correspondiente.

Por último se va a obtener la resistencia de cálculo de las uniones. En el caso de perfil cuadrado, se considera exclusivamente:

- la plastificación de la cara del cordón,

y en el caso del perfil rectangular, se consideran además:

- El esfuerzo cortante del cordón
- La Anchura eficaz
- Punzonamiento

3.9.2.1 *Rangos de validez generales para el análisis global de vigas en celosía*

Se van a despreciar los momentos resultantes de las excentricidades para el cálculo de las uniones, por lo que dicha excentricidad debe cumplir:

$$-0,55 \cdot h_0 \leq e \leq 0,25 \cdot h_0 \quad (3.1)$$

donde,

e es la excentricidad

h_0 es el canto del cordón, en el plano de la viga en celosía.

Las restricciones correspondiente son:

$$\bullet \quad e \geq -0,55 \cdot h_0 \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad e \leq 0,25 \cdot h_0 \quad (3.3)$$

3.9.2.2 *Rangos de validez geométricos para uniones soldadas entre diagonales y cordones RHS*

Se toma el valor de $i=0$ para el cordón, $i=1$ para la riostra solicitada a compresión e $i=2$ para la riostra solicitada a tracción. En las siguientes ecuaciones, el subíndice i representa a las riostras. El cordón se representa por el subíndice 0.

Las condiciones de validez y las correspondientes restricciones son:

$$\bullet \quad \frac{b_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0} \Rightarrow \frac{b_i}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0} \right) \geq 0 \quad (3.4)$$

$$\bullet \quad \frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (3.5)$$

• Para diagonales comprimidas exclusivamente:

$$\frac{b_i}{t_i} \leq 1,25 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}} \Rightarrow 1,25 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}} - \frac{b_i}{t_i} \geq 0 \quad (3.6)$$

$$\bullet \quad \frac{b_i}{t_i} \leq 35 \quad (3.7)$$

$$\bullet \quad \frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (3.8)$$

$$\bullet \quad \frac{h_i}{t_i} \leq 35 \quad (3.9)$$

$$\bullet \quad \frac{h_0}{b_0} \geq 0,5 \quad (3.10)$$

$$\bullet \quad \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (3.11)$$

$$\bullet \quad \frac{h_i}{b_i} \geq 0,5 \quad (3.12)$$

$$\bullet \quad \frac{h_i}{b_i} \leq 2,0 \quad (3.13)$$

Con respecto al espaciamiento “g”, si tomamos:

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \quad (3.14)$$

$$\bullet \quad \beta \geq 0,35 \quad (3.15)$$

$$\bullet \quad \frac{g}{b_0} \geq 0,5(1 - \beta) \Rightarrow g \geq b_0 \cdot 0,5(1 - \beta) \quad (3.16)$$

$$\bullet \quad \frac{g}{b_0} \leq 1,5(1-\beta) \Rightarrow g \leq b_0 \cdot 1,5(1-\beta) \quad (3.17)$$

$$\bullet \quad g \geq t_1 + t_2 \quad (3.18)$$

- Y para la verificación por punzonamiento:

$$\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \Rightarrow \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) - \beta \geq 0 \quad (3.19)$$

Para los nudos en K con espaciamiento, soldados entre riostras de perfil hueco cuadrado y cordones de perfil hueco cuadrado, cuando la geometría de los nudos está dentro del intervalo de validez anterior y se cumplen también las condiciones adicionales que se dan a continuación, solamente es necesario considerar los criterios correspondientes al fallo de la cara del cordón:

$$\bullet \quad \frac{b_0}{t_0} \geq 15 \quad (3.20)$$

$$\bullet \quad \frac{b_1 + b_2}{2b_i} \geq 0,6 \quad (3.21)$$

$$\bullet \quad \frac{b_1 + b_2}{2b_i} \leq 1,3 \quad (3.22)$$

$$\bullet \quad \beta \leq 1 \quad (3.23)$$

3.9.2.3 Resistencia de cálculo de las uniones

En uniones de barras de arriostamiento solicitadas únicamente por esfuerzos axiales, el esfuerzo axial interno de cálculo $N_{i,Ed}$ no debe superar la resistencia axial de cálculo del nudo soldado $N_{i,Rd}$

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} \quad (3.24)$$

El valor de $N_{i,Rd}$ será el menor de los calculados según las siguientes fórmulas:

- Por rotura de la cara del cordón:

$$N_{i,Rd,1} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen} \theta_i} \beta / \gamma_{M5} \quad (3.25)$$

- Por esfuerzo cortante del cordón:

$$N_{i,Rd,2} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_i} / \gamma_{M5} \quad (3.26)$$

$$N_{0,Rd,gap} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] / \gamma_{M5} \quad (3.27)$$

- Por rotura de la diagonal:

$$N_{i,Rd,3} = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2 \cdot h_i - 4 \cdot t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5} \quad (3.28)$$

- Por punzonamiento:

$$N_{i,Rd,4} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_i} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_i}{\text{sen}\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5} \quad (3.29)$$

El cálculo de los términos de las fórmulas precedentes son los siguientes:

$$A_v = \left(2 \cdot h_0 + b_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot g^2}{3 \cdot t_0^2}}} \right) \cdot t_0 \quad (3.30)$$

$$V_{Ed} = N_i \cdot \text{sen}\theta_i \quad \text{siendo } N_i \text{ el mayor de } N_1 \text{ y } N_2 \quad (3.31)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3}} \quad (3.32)$$

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \quad \text{siempre que } b_{eff} \leq b_i \quad (3.33)$$

$$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} \cdot b_i \quad \text{siempre que } b_{e,p} \leq b_i \quad (3.34)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} \quad (3.35)$$

Para compresión ($n < 0$):

$$k_n = 1,3 + \frac{0,4 \cdot n}{\beta} \quad \text{pero como máximo} \quad k_n \leq 1,0 \quad (3.36)$$

Para tracción ($n \geq 0$):

$$k_n = 1,0 \quad (3.37)$$

Siendo, para la máxima tensión de compresión en el cordón en la unión,

$$n = \frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}} \bigg/ \gamma_{M5} \quad (3.38)$$

Nota: en la guía del ICT, al contrario que en el Eurocódigo 3, se ha considerado que el esfuerzo axial es de compresión si tiene un valor negativo y de tracción si es positivo.

Se ha tomado en todos los cálculos de la guía del ICT:

$$\gamma_{M5} = 1,00 \quad (3.39)$$

3.9.3 Comprobación de la eficiencia del nudo 2

El nudo número 2 es del tipo K con espaciamento. Está formado por riostras de perfil hueco cuadrado y cordón de perfil hueco rectangular, por lo que hay que aplicar el caso general para su comprobación.

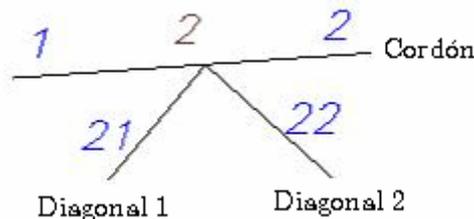


Figura 3-29 - Detalle del Nudo 2

Los valores de referencia para la comprobación del dimensionado del nudo 2, son los siguientes:

- CORDÓN 0: RHS 200x150x8 – S355 J2H
 - $b_0 = 150$ mm
 - $h_0 = 200$ mm
 - $t_0 = 8$ mm
 - $A_0 = 51,2 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y0} = 355$ N/mm²
- DIAGONAL 1: RHS 100x100x4 – S275 J0H
 - $b_1 = 100$ mm
 - $h_1 = 100$ mm
 - $t_1 = 4$ mm
 - $A_1 = 14,9 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y1} = 275$ N/mm²

- DIAGONAL 2: RHS 100x100x4 – S275 J0H
 - $b_2 = 100$ mm
 - $h_2 = 100$ mm
 - $t_2 = 4$ mm
 - $A_2 = 14,9 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y2} = 275$ N/mm²
- $E = 2,1 \cdot 10^4$ N/mm²
- Ángulo diagonales: $\theta_{1,2} = 46^\circ$

Los valores de cálculo son los siguientes:

- $\beta = 0,67$
- $\gamma = 9,38$

En base a estos valores, las fórmulas planteadas en el apartado anterior para los rangos de validez, dan los siguientes resultados:

Restricción	Valor Obtenido	Valor de referencia	Resultado
$\frac{b_1}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}\right)$	0,38	≥ 0	Cumple
$\frac{b_2}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}\right)$	0,38	≥ 0	Cumple
$\frac{b_0}{t_0}$	18,75	≤ 35	Cumple
$1,25 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}} - \frac{b_1}{t_1}$	9,5	≥ 0	Cumple
$\frac{b_1}{t_1} = \frac{b_2}{t_2} = \frac{h_1}{t_1} = \frac{h_2}{t_2}$	25	≤ 35	Cumple
$\frac{h_0}{t_0}$	25	≤ 35	Cumple
$\frac{h_0}{b_0}$	1,33	$\geq 0,5$	Cumple
$\frac{h_0}{b_0}$	1,33	≤ 2	Cumple
$\frac{h_1}{b_1} = \frac{h_2}{b_2}$	1	$\geq 0,5$	Cumple
$\frac{h_1}{b_1} = \frac{h_2}{b_2}$	1	≤ 2	Cumple
β	0,67	$\geq 0,35$	Cumple
$\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) - \beta$	0,22	≥ 0	Cumple

Una vez comprobada la validez geométrica del nudo, se han determinado los intervalos de validez del espaciamiento, y se han elegido unos valores de referencia intermedios, con el fin de compensar los errores en las operaciones de corte y soldadura de las diagonales:

Valor Inferior	Valor superior	Verificación	Valor Adoptado
$\geq b_0 \cdot 0,5(1 - \beta)$	$\leq b_0 \cdot 1,5(1 - \beta)$	$\geq t_1 + t_2$	g
$\geq 25 \text{ mm}$	$\leq 75 \text{ mm}$	$\geq 8 \text{ mm}$	55 mm

Los esfuerzos axiles internos de cálculo de cada barra son los siguientes:

- Esfuerzo en Cordón máximo: $N_{0,Ed} = -464,13 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Cordón mínimo: $N_{0,Ed} = -166,75 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Diagonal 1: $N_{1,Ed} = -258,34 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Diagonal 2: $N_{2,Ed} = 176,37 \text{ kN}$

Los valores de cálculo son los siguientes

- Esfuerzo en Cordon entre diagonales:

$$N_{0,Ed,gap} = 166,75 + 258,34 \cdot \cos 46^\circ = 346,21 \text{ kN}$$

- $$n = \frac{-464,13}{51,2 \cdot 10^2 \cdot 355 \cdot 10^{-3}} = -0,26$$

- Como la tensión es de compresión,

$$k_n = 1,3 + \frac{0,4 \cdot (-0,26)}{0,67} = 1,15 \quad \text{pero como máximo } k_n \leq 1,0 \Rightarrow k_n = 1,0$$

- $$A_v = \left(2 \cdot 200 + 150 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 55^2}{3 \cdot 8^2}}} \right) \cdot 8 = 3349,98 \text{ mm}^2$$

- $V_{Ed} = 258,34 \cdot \text{sen } 46^\circ = 185,83 \text{ kN}$

- $$V_{pl,Rd} = \frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 3349,98}{\sqrt{3}} = 686,61 \text{ kN}$$

- $$b_{eff} = \frac{10}{150/8} \frac{355 \cdot 8}{275 \cdot 4} \cdot 100 = 137,70 \text{ mm}$$

Como se tiene que cumplir que $b_{eff} \leq b_1 = b_2 = 100 \text{ mm}$ se toma: $b_{eff} = 100 \text{ mm}$

- $$b_{e,p} = \frac{10}{150/8} \cdot 100 = 53,33 \text{ mm}$$
 y se cumple que $b_{e,p} \leq b_1 = b_2 = 100 \text{ mm}$

De forma general, de acuerdo al Eurocódigo 3, se realizan las siguientes comprobaciones de Resistencia del nudo en K con espaciamiento:

Verificación	Valor Obtenido	Valor de referencia ($N_{i,Ed}$)	Resultado
$N_{1,Rd,1} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_1} \beta / \gamma_{M5}$	573,95 kN	$\geq -258,34 $ kN	Cumple
$N_{2,Rd,1} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_2} \beta / \gamma_{M5}$	573,95 kN	$\geq 176,37 $ kN	Cumple
$N_{1,Rd,2} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_1} / \gamma_{M5}$	954,50 kN	$\geq -258,34 $ kN	Cumple
$N_{2,Rd,2} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_2} / \gamma_{M5}$	954,50 kN	$\geq 176,37 $ kN	Cumple
$N_{0,Rd,gap} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] / \gamma_{M5}$	1773,22 kN	$\geq 346,21 $ kN	Cumple
$N_{1,Rd,3} = f_{y1} \cdot t_1 \cdot (2 \cdot h_1 - 4 \cdot t_1 + b_1 + b_{eff}) / \gamma_{M5}$	422,4 kN	$\geq -258,34 $ kN	Cumple
$N_{2,Rd,3} = f_{y2} \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + b_2 + b_{eff}) / \gamma_{M5}$	422,4 kN	$\geq 176,37 $ kN	Cumple
$N_{1,Rd,4} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_1} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_1}{\text{sen}\theta_1} + b_1 + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$	983,26 kN	$\geq -258,34 $ kN	Cumple
$N_{2,Rd,4} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \text{sen}\theta_2} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_2}{\text{sen}\theta_2} + b_2 + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$	983,26 kN	$\geq 176,37 $ kN	Cumple

Para dar por terminada la verificación de la eficiencia de los nudos, queda únicamente por comprobar el efecto sobre el cordón comprimido de los momentos flectores causados por las excentricidades obtenidas.

Teniendo en cuenta que el nudo designado con el número 2 es el más solicitado de los que se forman sobre el cordón superior (comprimido), se realiza la comprobación únicamente sobre él.

Los valores límites de la excentricidad, que dan validez a los cálculos realizados con anterioridad para este nudo, son los siguientes:

- Valor mínimo: $e \geq -0,55 \cdot h_0 = -110$ mm
- Valor máximo: $e \leq 0,25 \cdot h_0 = 50$ mm

Al espaciamiento entre diagonales adoptado para este nudo, $g = 55$ mm, le corresponde una excentricidad $e = 0,45$ mm (En la guía de diseño aparece con signo negativo por error) (por lo que está dentro del intervalo de validez). No obstante, se ha llevado a cabo la comprobación sobre la situación más desfavorable, es decir, suponiendo el espaciamiento, dentro de su rango de validez ($25 \text{ mm} \leq g \leq 75 \text{ mm}$), al que corresponde la máxima excentricidad, esto es:

$$g = 25 \text{ mm} \Rightarrow e = -15,1 \text{ mm}$$

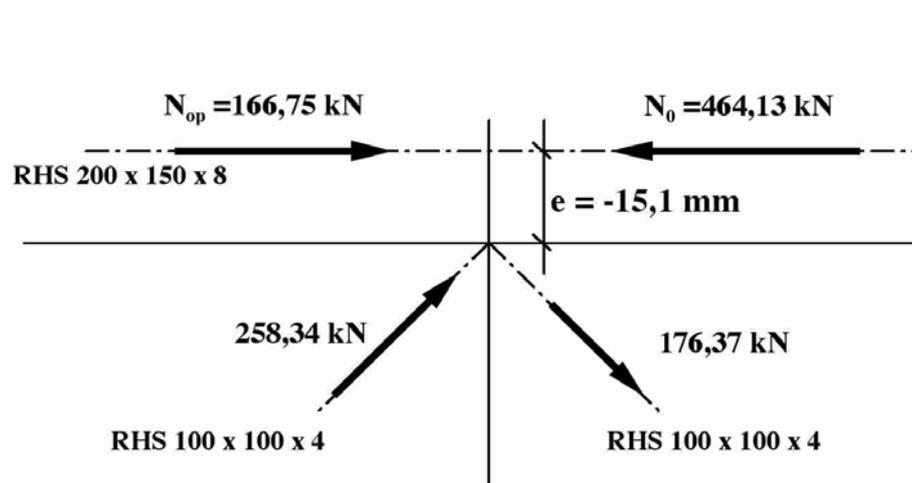


Figura 3-30 - Excentricidad en nudo 2

$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + k \cdot \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$	$N_{Sd} = N_0 = 464,13 \text{ kN}$ $M_{Sd} = \frac{M_e}{2} = 2,25 \text{ kNm}$ $k = \text{Coef. de ponderación} \leq 1,5$ $N_{Rd} = \chi_y \cdot A_0 \cdot \frac{f_{y0}}{\gamma_M} = 1323,4 \text{ kN} \quad \left(\bar{\lambda}_y = \frac{5,90}{7,43} = 0,794 \Rightarrow \chi_y = 0,728 \right)$ <p>(Clase de sección del RHS 200 x 150 x 8 en S355J2 H : 1 $\Rightarrow M_{Rd}$ plástico)</p> $M_{Rd} = W_{pl0} \cdot \frac{f_{y0}}{\gamma_M} = 344000 \text{ [mm}^3] \times \frac{0,355 \text{ [kN/mm}^2]}{1} = 122,12 \text{ kNm}$
----------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 3-31 - Cálculo de Momentos de la guía del ICT

El momento causado por esta excentricidad será:

$$M_e = (N_0 - N_{op}) \cdot e = (464,13 - 166,75) \cdot 0,0151 = 4,49 \text{ kNm}$$

Siendo la longitud y la rigidez $E \cdot I$ de los elementos del cordón superior, iguales a la izquierda y a la derecha del nudo, el momento M_e puede distribuirse por igual sobre ambos elementos, es decir, habrán de calcularse adicionalmente para:

$$M_{Sd} = 2,25 \text{ kNm}$$

Tomando de los dos elementos el más crítico, se comprueba ahora como una viga-columna mediante la ecuación de interacción a flexo-compresión:

$$\frac{464,13}{1323,4} + 1,5 \cdot \frac{2,25}{122,12} = 0,378 \leq 1 \quad \text{teniendo en cuenta que } k \leq 1,5$$

Por lo tanto es imposible que la situación analizada sea crítica, por lo que se dan definitivamente como válidos los resultados obtenidos anteriormente.

3.9.4 Comprobación de la eficiencia del nudo 11

El nudo número 11 es del tipo K con espaciamento. Está formado por riostras de perfil hueco cuadrado y cordón de perfil hueco cuadrado, por lo que se va a aplicar el caso simplificado para su comprobación.

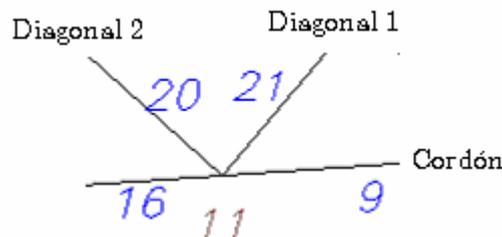


Figura 3-32 - Detalle del Nudo 11

Los valores de referencia para la comprobación del dimensionado del nudo 11, son los siguientes:

- CORDÓN 0: RHS 120x120x8 – S355 J2H
 - $b_0 = 120$ mm
 - $h_0 = 120$ mm
 - $t_0 = 8$ mm
 - $A_0 = 33,6 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y0} = 355$ N/mm²
- DIAGONAL 1: RHS 100x100x4 – S275 J0H
 - $b_1 = 100$ mm
 - $h_1 = 100$ mm
 - $t_1 = 4$ mm
 - $A_1 = 14,9 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y1} = 275$ N/mm²
- DIAGONAL 2: RHS 100x100x4 – S275 J0H
 - $b_2 = 100$ mm
 - $h_2 = 100$ mm
 - $t_2 = 4$ mm
 - $A_2 = 14,9 \cdot 10^2$ mm²
 - $f_{y2} = 275$ N/mm²

84 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

- $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$
- Ángulo diagonales: $\theta_{1,2} = 46^\circ$

Los valores de cálculo son los siguientes:

- $\beta = 0,83$
- $\gamma = 7,50$

En base a estos valores, las fórmulas planteadas en el apartado anterior para los rangos de validez, dan los siguientes resultados:

Restricción	Valor Obtenido	Valor de referencia	Resultado
$\frac{b_1}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}\right)$	0,58	≥ 0	Cumple
$\frac{b_2}{b_0} - \left(0,1 + 0,01 \frac{b_0}{t_0}\right)$	0,58	≥ 0	Cumple
$\frac{b_0}{t_0}$	15,0	≤ 35	Cumple
$1,25 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}} - \frac{b_1}{t_1}$	9,5	≥ 0	Cumple
$\frac{b_1}{t_1} = \frac{b_2}{t_2} = \frac{h_1}{t_1} = \frac{h_2}{t_2}$	25	≤ 35	Cumple
$\frac{h_0}{t_0}$	15	≤ 35	Cumple
$\frac{h_0}{b_0}$	1	$\geq 0,5$	Cumple
$\frac{h_0}{b_0}$	1	≤ 2	Cumple
$\frac{h_1}{b_1} = \frac{h_2}{b_2}$	1	$\geq 0,5$	Cumple
$\frac{h_1}{b_1} = \frac{h_2}{b_2}$	1	≤ 2	Cumple
β	0,83	$\geq 0,35$	Cumple
$\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) - \beta$	0,037	≥ 0	Cumple

Por ser el cordón un perfil hueco cuadrado, se realizan las siguientes verificaciones adicionales con el fin de simplificar los cálculos de las comprobaciones de esfuerzos:

Restricción	Valor Obtenido	Valor de referencia	Resultado
$\frac{b_0}{t_0}$	0,15	≥ 15	Cumple

Restricción	Valor Obtenido	Valor de referencia	Resultado
$\frac{b_1 + b_2}{2b_1} = \frac{b_1 + b_2}{2b_2}$	1	$\geq 0,6$	Cumple
$\frac{b_1 + b_2}{2b_1} = \frac{b_1 + b_2}{2b_2}$	1	$\leq 1,3$	Cumple
β	0,83	≤ 1	Cumple

Una vez comprobada la validez geométrica del nudo, se han determinado los intervalos de validez del espaciamiento, y se han elegido unos valores de referencia intermedios, con el fin de compensar los errores en las operaciones de corte y soldadura de las diagonales:

Valor Inferior	Valor superior	Verificación	Valor Adoptado
$\geq b_0 \cdot 0,5(1 - \beta)$	$\leq b_0 \cdot 1,5(1 - \beta)$	$\geq t_1 + t_2$	g
$\geq 10 \text{ mm}$	$\leq 30 \text{ mm}$	$\geq 8 \text{ mm}$	20 mm

Los esfuerzos axiales internos de cálculo de cada barra son los siguientes:

- Esfuerzo en Cordón máximo: $N_{0,Ed} = 313,46 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Cordón mínimo: $N_{0,Ed} = -61,05 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Diagonal 1: $N_{1,Ed} = -258,34 \text{ kN}$
- Esfuerzo en Diagonal 2: $N_{2,Ed} = 258,74 \text{ kN}$

Los valores de cálculo son los siguientes

$$\bullet \quad n = \frac{-61,05}{33,6 \cdot 10^2 \cdot 355 \cdot 10^{-3}} = -0,05$$

- Como la tensión es de compresión,

$$k_n = 1,3 + \frac{0,4 \cdot (-0,05)}{0,67} = 1,27 \quad \text{pero como máximo } k_n \leq 1,0 \Rightarrow k_n = 1,0$$

De forma simplificada, de acuerdo al Eurocódigo 3, se realizan las siguientes comprobaciones de Resistencia del nudo en K con espaciamiento con cordón formado por perfil hueco cuadrado:

Verificación	Valor Obtenido	Valor de referencia ($N_{i,Ed}$)	Resultado
$N_{1,Rd,1} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_1} \beta / \gamma_{M5}$	641,53 kN	$\geq -258,34 \text{ kN}$	Cumple
$N_{2,Rd,1} = \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_2} \beta / \gamma_{M5}$	641,53 kN	$\geq 258,74 \text{ kN}$	Cumple

Los valores límites de la excentricidad, que dan validez a los cálculos realizados con anterioridad para este nudo, son los siguientes:

- Valor mínimo: $e \geq -0,55 \cdot h_0 = -66 \text{ mm}$
- Valor máximo: $e \leq 0,25 \cdot h_0 = 30 \text{ mm}$

Al espaciamiento entre diagonales adoptado para este nudo, $g = 20 \text{ mm}$, le corresponde una excentricidad $e = 22,4 \text{ mm}$ (En la guía de diseño aparece con signo negativo por error) (por lo que está dentro del intervalo de validez).

3.10 COMPROBACIÓN DE LA EFICIENCIA MEDIANTE ORDENADOR

3.10.1 Introducción

Al igual que se hizo con el cálculo de esfuerzos en la estructura, se ha realizado la verificación del comportamiento de los nudos. Para ello se ha empleado el programa CIDJOINT v1.38, desarrollado por el CIDECT.

El CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire), es una asociación internacional formada por empresas fabricantes para el estudio y el desarrollo de estructuras utilizando perfiles tubulares.

El programa CIDJOINT se ha desarrollado para comprobar la resistencia de uniones de acuerdo con las recomendaciones del CIDECT publicadas en las guías de diseño del CIDECT - Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares rectangulares (RHS) bajo cargas predominantemente estáticas de J. A. Packer, J. Wardenier, Y. Kurobane, D. Dutta, N. Yeomans.

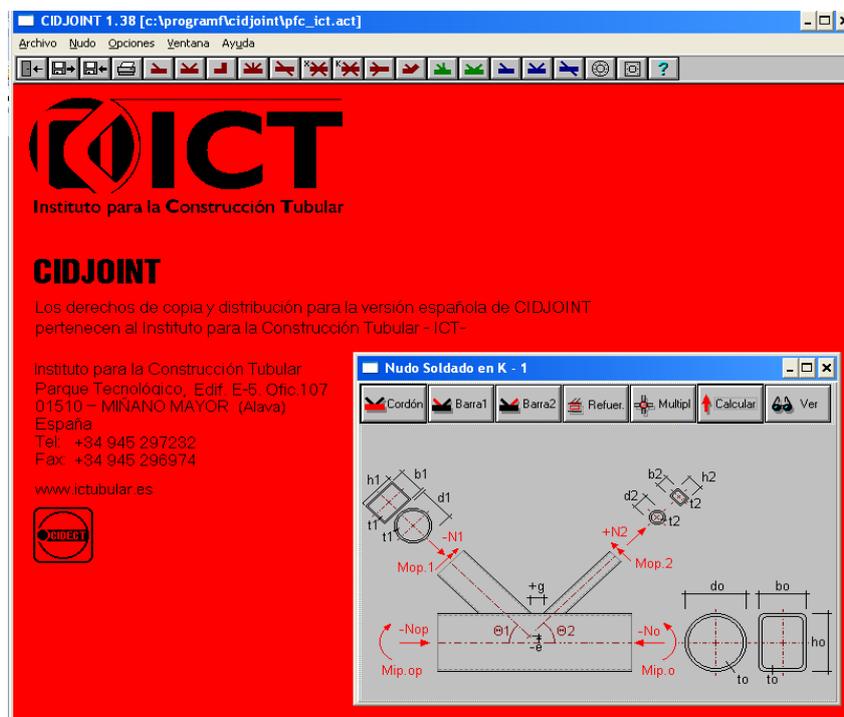


Figura 3-33 - Captura de pantalla programa CIDJOINT

3.10.2 Geometría, símbolos y nomenclatura de CIDJOINT

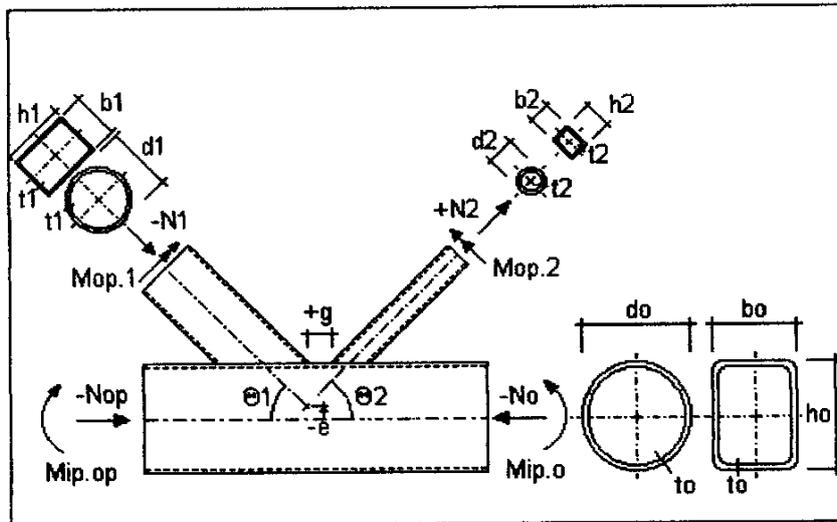


Figura 3-34 - Símbolos de nudo en K soldado en CIDJoint

CHS	Perfil Tubular Circular
RHS	Perfil Tubular Rectangular
SHS	Perfil Tubular Cuadrado
bo	Anchura externa del cordón SHS o RHS
b1	Anchura externa de la barra de relleno SHS o RHS 1
b2	Anchura externa de la barra de relleno SHS o RHS 2
do	Diámetro exterior del cordón CHS
d1	Diámetro exterior de la barra de relleno CHS 1
d2	Diámetro exterior de la barra de relleno CHS 2
e	Excentricidad del nudo para una unión - es positiva hacia el exterior de la celosía
g	Espaciamiento entre barras de relleno
ho	Altura externa del cordón RHS
h1	Altura externa de la barra RHS de relleno 1
h2	Altura externa de la barra RHS de relleno 2
to	Espesor del perfil tubular del cordón
t1	Espesor de la barra de relleno 1
t2	Espesor de la barra de relleno 2
E	Módulo de Elasticidad
Fy	Límite de fluencia del elemento
Mip.o	Momento flector en el plano aplicado al cordón
Mip.op	Momento flector adicional en el plano aplicado al cordón
Mop.1	Momento flector fuera del plano aplicado a la barra 1
Mop.2	Momento flector fuera del plano aplicado a la barra 2
No	Fuerza axial aplicada al cordón
Nop	"Precarga del cordón" (fuerza axial adicional en el cordón en una unión que no es necesaria para resistir a las componentes horizontales de las fuerzas de las barras de relleno)
N1	Fuerza axial aplicada a la barra de relleno 1
N2	Fuerza axial aplicada a la barra de relleno 2
Beta	Relación de anchura o diámetro entre barra de relleno y cordón
Theta1	Angulo entre la barra de relleno 1 y el cordón
Theta2	Angulo entre la barra de relleno 2 y el cordón

3.10.3 Hoja de resultados análisis nudo n°2

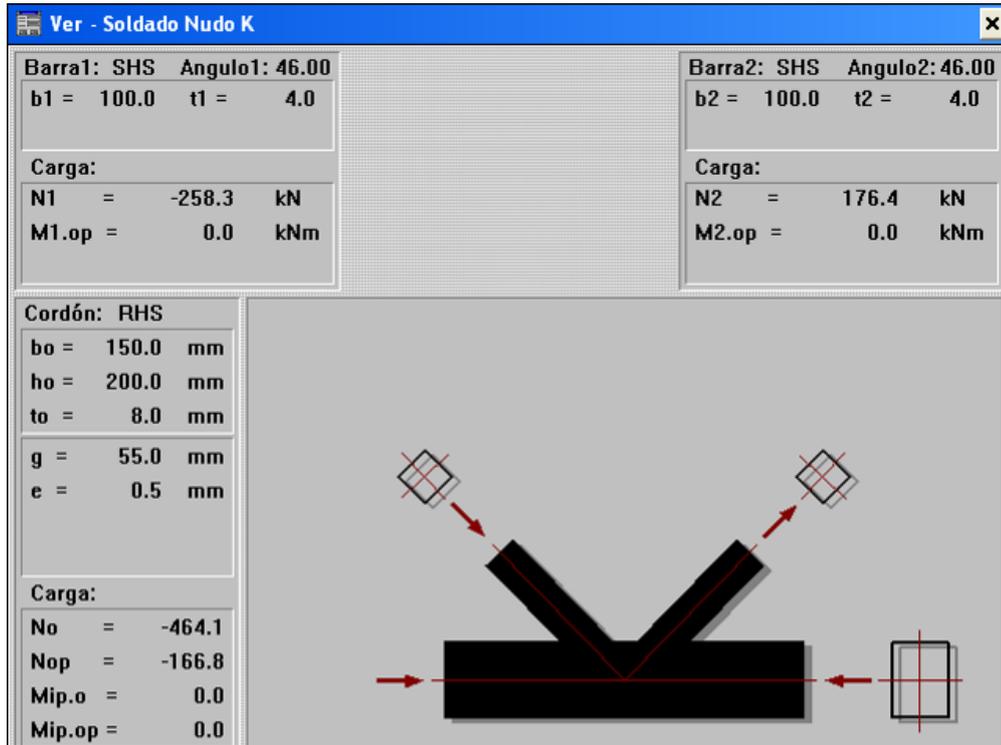


Figura 3-35 - Datos nudo n°2 en CIDJoint

NUDO N°2
 Proyecto Fin de Carrera UPCT - Dpto. Estructuras y Construcción
 DISEÑO OPTIMO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3
 Antonio Ochoa Fraile
 Resultados de nudo en K

Datos Introducidos :

 Dimensiones del cordón :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS RHS
 Anchura exterior del cordón b0 = 150.00 mm
 Altura exterior del cordón h0 = 200.00 mm
 Espesor del cordón t0 = 8.00 mm
 Características del acero:
 Límite de fluencia del cordón fy.0 = 355.00 N/mm2
 Excentricidad del nudo e = 0.45 mm
 Separación entre barras Gap = 55.00 mm
 Carga del cordón :
 Fuerza axial en el cordón No = -464.13 kN
 Fuerza axial en el cordón Nop = -166.75 kN
 Momento en el plano en el cordón Mi p.o = 0.00 kNm
 Momento en el plano en el cordón Mi p.op = 0.00 kNm
 Dimensiones de la barra 1 :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS SHS
 Anchura externa de la barra 1 b1 = 100.00 mm
 Altura exterior de la barra 1 h1 = 100.00 mm
 Espesor de la barra 1 t1 = 4.00 mm
 Angulo entre barra 1 y cordón Theta.1 = 46.00 Gra
 Características del acero:
 Límite elástico fy = 275.00 N/mm2
 Carga de la barra 1 :
 Fuerza axial en la barra 1 N1 = -258.34 kN
 Momento fuera de plano en barra 1 Mop.1 = 0.00 kNm
 Dimensiones de la barra 2 :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS SHS
 Anchura exterior de la barra 2 b2 = 100.00 mm
 Altura exterior de la barra 2 h2 = 100.00 mm
 Espesor de la barra 2 t2 = 4.00 mm
 Angulo entre barra 2 y cordón Theta.2 = 46.00 Gra
 Características del acero:
 Límite de fluencia de la barra 2 fy.2 = 275.00 N/mm2
 Carga de la barra 2 :
 Fuerza axial en la barra 2 N2 = 176.37 kN
 Momento fuera de plano en barra 2 Mop.2 = 0.00 kNm

Informe de resultados:

Ratio de anchura o diámetro Beta	Beta	=	0.67
Area del cordón	A.0	=	5124.25 mm ²
Módulo elástico del cordón	Wel.0	=	282.87 cm ³
n = Sigma.0/fy0 (para cordón RHS)	n	=	-0.26
Función de precarga del cordón	f(n)	=	1.00
Tensión axial en el cordón	Sigma.0	=	-90.58 N/mm ²
Anchura eficaz - barra 1	be.1	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento 1	bep.1	=	53.33 mm
Fact. área a cortante Av (Tabla 3)	Alpha	=	0.12
Anchura eficaz - barra 2	be.2	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento 2	bep.2	=	53.33 mm
Tensión eficaz a cortante cordón	Av	=	3349.98 mm ²
Fuerza cortante vertical	V	=	185.83 kN
Resistencia a cortante del cordón	Vp	=	686.61 kN
Fuerza axial máx. en cordón espac.	NoMax	=	346.21 kN
Fuerza de interacción en espac.	NoRd(gap)	=	1819.11 kN
Para la barra 1 :			
Fuerza axial en la barra 1	N1	=	-258.34 kN
Resistencia a plastificación cordón	N1Rd(Cp)	=	573.80 kN
Resistencia a cortante del cordón	N1Rd(Sh)	=	954.50 kN
Resistencia en anchura eficaz	N1Rd(Wd)	=	422.40 kN
Resistencia a punzonamiento	N1Rd(Pu)	=	983.26 kN
Verificación de la barra 1			0.61 < 1
Para la barra 2 :			
Fuerza axial en la barra 2	N2	=	176.37 kN
Resistencia a plastificación cordón	N2Rd(Cp)	=	573.80 kN
Resistencia a cortante del cordón	N2Rd(Sh)	=	954.50 kN
Resistencia en anchura eficaz	N2Rd(Wd)	=	422.40 kN
Resistencia a punzonamiento	N2Rd(Pu)	=	983.26 kN
Verificación de la barra 2			0.42 < 1

Unión suficiente

Comentarios de la guía del ICT:

La comprobación de la eficiencia del nudo en base al esfuerzo cortante sobre el cordón $N_{0,Rd,gap}$, realizada con el software CIDjoint, da como resultado **1.819,11 kN**, sin embargo en el cálculo manual el valor que se obtiene es de **1.773,22 kN**. La diferencia entre ambos valores reside en que internamente el CIDjoint no considera la interacción de los esfuerzos cortantes en el cálculo cuando estos no superan el 50% de la capacidad plástica a cortante del cordón. En el ejemplo que nos ocupa esto es lo que sucede, con lo que la fracción señalada la considera de valor cero:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0$$

Este modo de actuar del CIDjoint está, al día de hoy, avalado por los expertos internacionales en la materia. No obstante, como en la normativa no se contempla esta simplificación, lo correcto es no considerarla, y así se ha realizado en el proyecto. De hecho, al considerar la interacción de los esfuerzos cortantes, se consigue un cálculo más conservador.

3.10.4 Hoja de resultados análisis nudo n°11

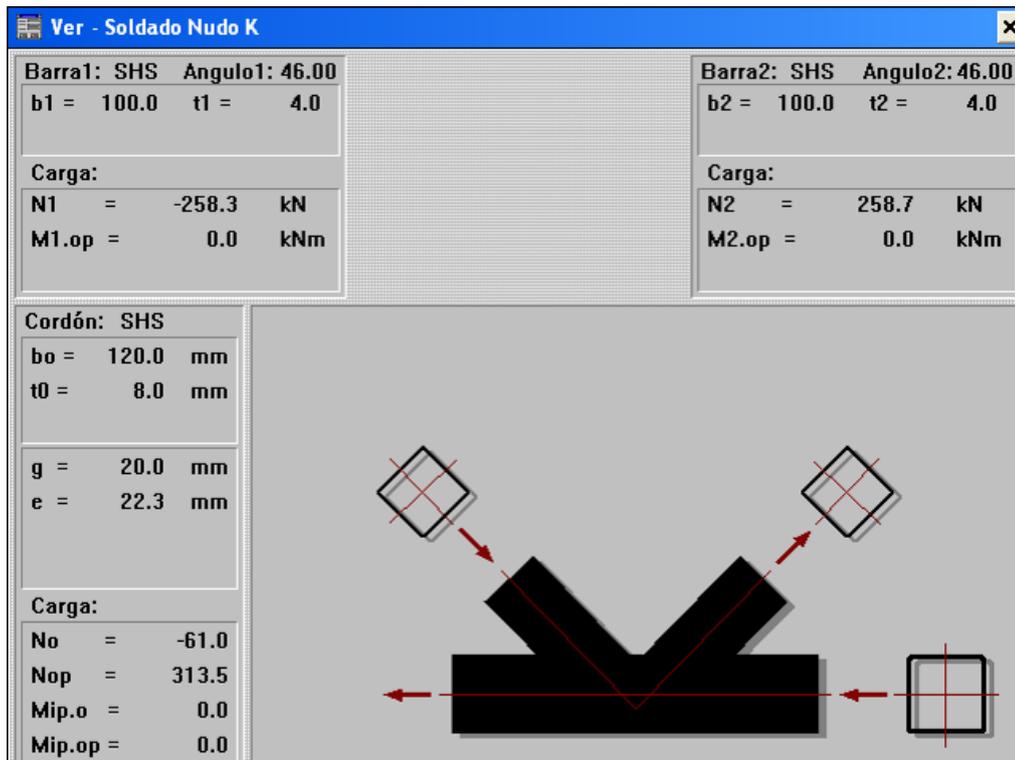


Figura 3-36 - Datos nudo n°11 en CIDJoint

NUDO N°11
 Proyecto Fin de Carrera UPCT - Dpto. Estructuras y Construcción
 DISEÑO OPTIMO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3
 Antonio Ochoa Fraile
 Resultados de nudo en K

Datos Introducidos :

 Dimensiones del cordón :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS SHS
 Anchura exterior del cordón b0 = 120.00 mm
 Altura exterior del cordón h0 = 120.00 mm
 Espesor del cordón t0 = 8.00 mm
 Características del acero:
 Límite de fluencia del cordón fy.0 = 355.00 N/mm2
 Excentricidad del nudo e = 22.33 mm
 Separación entre barras Gap = 20.00 mm
 Carga del cordón :
 Fuerza axial en el cordón No = -61.05 kN
 Fuerza axial en el cordón Nop = 313.46 kN
 Momento en el plano en el cordón Mi p.o = 0.00 kNm
 Momento en el plano en el cordón Mi p.op = 0.00 kNm
 Dimensiones de la barra 1 :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS SHS
 Anchura externa de la barra 1 b1 = 100.00 mm
 Altura exterior de la barra 1 h1 = 100.00 mm
 Espesor de la barra 1 t1 = 4.00 mm
 Angulo entre barra 1 y cordón Theta.1 = 46.00 Gra
 Características del acero:
 Límite elástico fy = 275.00 N/mm2
 Carga de la barra 1 :
 Fuerza axial en la barra 1 N1 = -258.34 kN
 Momento fuera de plano en barra 1 Mop.1 = 0.00 kNm
 Dimensiones de la barra 2 :
 Tipo de perfil: Conformados en frío EUROPEOS SHS
 Anchura exterior de la barra 2 b2 = 100.00 mm
 Altura exterior de la barra 2 h2 = 100.00 mm
 Espesor de la barra 2 t2 = 4.00 mm
 Angulo entre barra 2 y cordón Theta.2 = 46.00 Gra
 Características del acero:
 Límite de fluencia de la barra 2 fy.2 = 275.00 N/mm2
 Carga de la barra 2 :
 Fuerza axial en la barra 2 N2 = 258.74 kN
 Momento fuera de plano en barra 2 Mop.2 = 0.00 kNm

Informe de resultados:

Ratio de anchura o diámetro Beta	Beta	=	0.83
Area del cordón	A.0	=	3360.00 mm ²
Módulo elástico del cordón	Wel.0	=	112.84 cm ³
n = Sigma.0/fy0 (para cordón RHS)	n	=	-0.05
Función de precarga del cordón	f(n)	=	1.00
Tensión axial en el cordón	Sigma.0	=	93.29 N/mm ²
Anchura eficaz - barra 1	be.1	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento 1	bep.1	=	66.67 mm
Fact. área a cortante Av (Tabla 3)	Alpha	=	0.33
Anchura eficaz - barra 2	be.2	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento 2	bep.2	=	66.67 mm
Tensión eficaz a cortante cordón	Av	=	2234.23 mm ²
Fuerza cortante vertical	V	=	186.12 kN
Resistencia a cortante del cordón	Vp	=	457.93 kN
Fuerza axial máx. en cordón espac.	NoMax	=	134.00 kN
Fuerza de interacción en espac.	NoRd(gap)	=	1192.80 kN
Para la barra 1 :			
Fuerza axial en la barra 1	N1	=	-258.34 kN
Resistencia a plastificación cordón	N1Rd(Cp)	=	641.53 kN
Verificación de la barra 1			0.40 < 1
Para la barra 2 :			
Fuerza axial en la barra 2	N2	=	258.74 kN
Resistencia a plastificación cordón	N2Rd(Cp)	=	641.53 kN
Verificación de la barra 2			0.40 < 1

Unión suficiente

3.10.5 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos con el programa CIDJoint, se puede dar por válidos los cálculos realizados de validez en el dimensionado de los nudos, por lo que pueden ser empleados para la verificación de la implementación realizada en MATLAB

Capítulo 4

Implementación del programa DINET

4.1 INTRODUCCIÓN

La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI (del inglés Graphical User Interface) es un término muy amplio que hace referencia a un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso, consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para facilitar la comunicación entre el usuario y el software implementado en un ordenador. Habitualmente las acciones se realizan mediante manipulación directa, para facilitar la interacción del usuario con el ordenador. Surge como evolución de las interfaces de línea de comandos que se usaban para operar los primeros sistemas operativos y es pieza fundamental en un entorno gráfico. Como ejemplos de interfaz gráfica de usuario, cabe citar los entornos de escritorio Windows, el X-Window de GNU/Linux o el de Mac OS X, Aqua.

En el contexto del proceso de interacción persona-ordenador, la interfaz gráfica de usuario es el artefacto tecnológico de un sistema interactivo que posibilita, a través del uso y la representación del lenguaje visual, una interacción amigable con un sistema informático.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Una de las tantas herramientas con la que cuenta MATLAB, es la creación de GUIs. La forma de implementar las GUI con MATLAB es crear los objetos y definir las acciones que cada uno va a realizar. Al usar GUIDE obtendremos dos archivos:

- Un archivo FIG – Contiene la descripción de los componentes que contiene la interfase.
- Un archivo M – Contiene las funciones y los controles del GUI así como el callback

Un callback se define como la acción que llevará a cabo un objeto de la GUI cuando el usuario lo active. Cuando se crea en el archivo FIG un objeto del tipo botón, o ventana, automáticamente se crea en el archivo M asociado, un callback cuyo nombre contiene el TAG del objeto.

Las ventajas de emplear MATLAB y la razón por la que se ha escogido para el desarrollo del programa *DINET*, es que, por una parte su entorno y lenguaje de programación es similar en sus funciones básicas al que se puede obtener con otros entornos, y además, ofrece la posibilidad de utilizar funciones avanzadas, como por ejemplo funciones de optimización, además de facilitar el uso de matrices y por supuesto, la posibilidad de ampliar sus funciones con el empleo de las cajas de herramientas (toolbox). Todo ello facilita, no sólo el desarrollo de la versión actual del programa, sino que abre un amplio abanico de posibilidades de ampliación y mejora de sus prestaciones para futuras versiones.

4.2 PROGRAMACIÓN EN MATLAB

4.2.1 Descripción general del entorno GUIDE de MATLAB

GUIDE es la herramienta de desarrollo de GUI de MATLAB. Provee una serie de herramientas que simplifican el proceso de distribución de componentes en la ventana gráfica y la programación de cada uno de estos componentes.

Usando el editor de GUIDE, se puede completar una GUI fácilmente, arrastrando los posibles componentes desde un cuadro de selección hasta el área de la ventana. Entre los componentes a utilizar están:

- Ventanas gráficas
- Paneles para selección de opciones
- Ventanas de introducción de datos
- Ventanas desplegadas
- Ventanas con listas de selección
- Texto fijo
- Barras deslizantes
- Botones
- Casillas de validación
- Tablas de datos

Además, GUIDE permite la creación de forma sencilla de barras de menú, así como de menús contextuales, que se pueden vincular con lo que está sucediendo dentro de la ventana gráfica.

También proporciona amplias opciones para personalizar el entorno, mediante definición de colores, tipos de texto, herramientas para alinear componentes, facilidad para establecer el orden de tabulación, y un cuadro para poder visualizar todos los componentes de la ventana gráfica, indicando las jerarquías existentes.

Según se va modificando la GUI, de forma simultanea, se completa el archivo .m que contiene las opciones para programar cada uno de los componentes, utilizando como identificador en ambos entornos una etiqueta de referencia (Tag).

4.2.2 Inicio del diseño de la GUI

El proceso de diseño de la GUI comienza por decidir la composición de la ventana de forma general, considerando si se van a utilizar varias ventanas o una única ventana.

Para el desarrollo del programa *DINET*, se ha decidido implementar todo el entorno gráfico en una única ventana, tratando de ofrecer una visión completa del problema al proyectista que esté utilizando el programa. Este hecho, es el primer aspecto diferenciador con respecto a otros programas existentes en el mercado, y por lo tanto parte del reto adquirido al iniciar su programación.

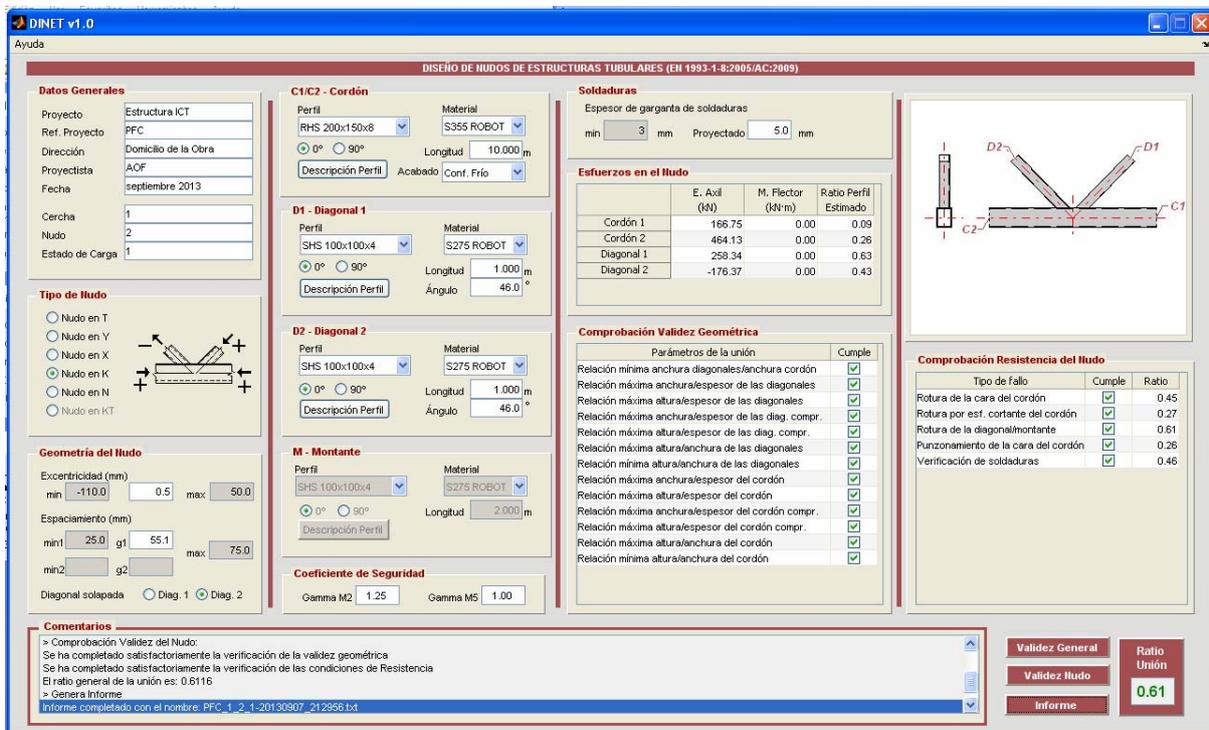


Figura 4-1 - Ventana principal *DINET*

Como forma de estructuración, se han empleado los componentes panel para agrupar botones y ventanas, con el fin de identificar el fin de cada uno de ellos.

Para incrementar la velocidad en el proceso de comprobación, se han agrupado las principales etapas del cálculo en tres botones que se activan y desactivan en función del estadio actual de verificación.

La selección del tipo de nudo se realiza mediante una serie de puntos de selección, dentro de un panel, que de forma automática sólo permite que esté activo uno de ellos. Junto a la relación de posibles tipos de nudo, se ha añadido una ventana gráfica estática, donde se reproduce una imagen fija para cada tipo de nudo, con el fin de facilitar su interpretación de forma visual.

La selección del tipo de perfil y material de cada barra se realiza a través de ventanas desplegadas, debido a la gran cantidad de opciones a escoger.

Para la comprobación de los parámetros de los perfiles seleccionados para cada barra, se ha optado por abrir una ventana auxiliar flotante, emergente con la pulsación del botón de “Descripción perfil”, que facilita la visualización de todos los parámetros, además de tener una ventana de representación gráfica a escala, de la sección del perfil, con la rotación escogida.

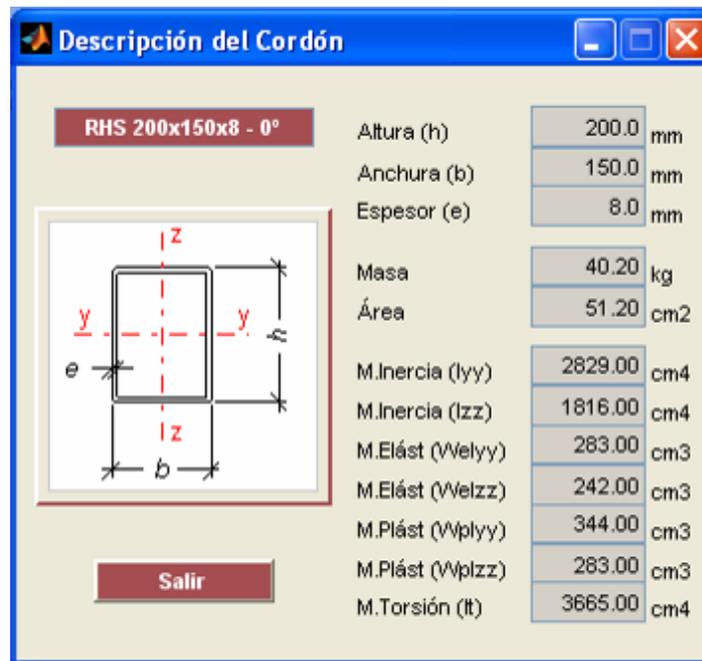


Figura 4-2 - Ventana Descripción Perfil

Para la introducción de los esfuerzos se ha escogido un componente tabla, ya que permite tener agrupados en un mismo cuadro los esfuerzos de todas las barras, además de disponer de una columna adicional donde se muestra el ratio aproximado de validez de la barra.

La representación de los resultados, tanto de la validación geométrica como de la comprobación del cumplimiento de las resistencias al fallo, se realiza utilizando también elementos tabla, ya que permite agrupar todos los tipos de comprobación o fallo en líneas sucesivas, que además pueden cambiarse en función de los resultados a mostrar. GUIDE además permite configurar una columna con casillas de validación, que ofrecen una visión rápida e intuitiva del cumplimiento de las condiciones.

Se han aprovechado las facilidades de representación gráfica para mostrar a tiempo real las modificaciones realizadas en el nudo en una ventana gráfica.

Por último, se ha utilizado un componente de lista de selección para mostrar los comentarios que se van realizando durante la ejecución del programa. La elección de este tipo de componente es por la comodidad de poder utilizar la barra deslizante lateral para poder acceder al histórico de comentarios introducidos.

Para la representación del informe se ha optado por abrir el archivo directamente en el bloc de notas, con el fin de facilitar las labores de edición, guardado e impresión.

En algunas ocasiones, se producen errores de tal envergadura que se avisa mediante una ventana de error, predefinidas por MATLAB, independientemente de que además se realice la correspondiente anotación en la ventana de comentarios.

Por último, indicar que se ha incorporado en una barra de menú, una persiana de Ayuda, donde se ofrece por un lado la posibilidad de abrir el manual de usuario en formato pdf, y por otro lado, se ha implementado una ventana donde se indican los créditos relativos al programa. Dicha ventana es estática y únicamente tiene un botón que permite cerrarla una vez leído.

4.2.3 Gestión de variables

Cuando se inicia la ejecución de un GUI realizada mediante MATLAB, el programa genera una variable tipo estructura llamada *handles*. Dicha estructura hace referencia a la GUI correspondiente, y almacena en sus miembros cada uno de los parámetros relacionados con cada uno de los componentes de la GUI.

Todas las funciones asociadas a los componentes de la GUI utilizan como una de las variables de entrada la estructura *handles*. Esto permite considerar que los valores almacenados dentro de la estructura pueden ser utilizados en cualquier función, como si de variables globales se tratara.

Además de dichos miembros, creados por el programa por defecto, he creado un miembro denominado *handles.PFC*, donde se almacenan los valores de las variables (en este caso submiembros) que necesita *DINET* para poder relacionarse con el resto de funciones, sin necesidad de crear variables globales.

Ejemplos de los miembros programados más representativos son:

- Bases de datos de perfiles:
 - *handles.PFC.bp.caract*
 - *handles.PFC.bp.denom*
- Bases de datos de materiales:
 - *handles.PFC.bm.caract*
 - *handles.PFC.bm.denom*
- Tipo de nudo:
 - *handles.PFC.nudo*
- Ángulo de rotación de los perfiles de cada barra:
 - *handles.PFC.aperfil*
- Esfuerzos de las barras:
 - *handles.PFC.Esfuerzos*
- Estadio de validez de los cálculos:
 - *handles.PFC.validez*: Esta variable puede tener los siguientes valores:
 - 3 > No se ha verificado nada
 - 2 > Se ha comprobado la validez general satisfactoriamente (habilita el botón “Validez Nudo”)
 - 1 > Se ha comprobado la validez geométrica satisfactoriamente
 - 0 > Se ha comprobado la resistencia del nudo (habilita el botón “Informe”)

Además, se almacenan también los valores antiguos de cada una de las ventanas de introducción de datos, con el fin de poder reescribirlo en caso de que el nuevo valor no tenga el formato o rango válido.

4.2.4 Relación de archivos

Además de crear la GUI de la ventana principal, y de las ventanas auxiliares de descripción del perfil y de créditos, para la programación de *DINET* se han tenido que crear una serie de archivos con funciones auxiliares, que contienen subrutinas que se ejecutan de forma repetida en distintas fases del programa.

A continuación se va a mostrar la relación de funciones existentes, por orden alfabético, con una breve descripción de sus funciones:

- *Crea_Avisos*: incorpora un nuevo comentario al historial existente y fija el nuevo historial en la ventana comentarios.
- *Crea_Informe*: realiza la función de crear cada una de las líneas que han de incorporarse al informe de resultados.
- *CreaTR*: Crea la tabla de resultados a partir de los resultados obtenidos.
- *CreaTVG*: Crea la tabla de Validez Geométrica, a partir de los resultados del análisis geométrico del nudo.
- *Creditos*: GUI que abre una ventana con los créditos.
- *Datosexcen*: Rellena las ventanas con los datos de excentricidad, espaciamiento y sus límites con los valores obtenidos del cálculo.
- *Datosnudo*: Rellena las ventanas con los datos correspondientes a los perfiles.
- *Descr_perfil*: GUI con los parámetros del perfil de la barra correspondiente
- *dibReprnudo*: Función que realiza la representación gráfica del nudo, a escala, en la ventana gráfica.
- *dibTiponudo*: Función que realiza la visualización de la imagen correspondiente al tipo de nudo escogido.
- *DINET*: GUI principal del programa
- *Espaciamiento*: función que calcula el espaciamiento a partir de los datos del nudo y de la excentricidad.
- *Excentricidad*: función que calcula la excentricidad a partir de los datos del nudo y del espaciamiento
- *Garg_sin_solape*: Realiza los cálculos necesarios para saber las tensiones a las que están sometidas las soldaduras de un perfil.
- *IniDINET*: Programa que se ejecuta al iniciar *DINET*, que sirve para cargar las bases de datos de perfiles y materiales, además de establecer los valores por defecto para la GUI.
- *Paramperfil*: Obtiene a partir de los parámetros de las barras, los parámetros de altura, anchura, espesor y material, para ser utilizados en los cálculos.
- *Ratio_esfuerzos*: Función que permite obtener los ratios aproximados de los esfuerzos para cada barra, para incluirlos en la tabla de esfuerzos.
- *Selectboton*: Subrutina que activa o deshabilita los botones de Validez nudo e Informe, según el estadio de comprobación en la que se encuentre el programa.
- *Selectnudo*: Subrutina que activa o deshabilita las ventanas de las distintas barras, de acuerdo al nudo escogido.
- *SHR.pfc*: base de datos de perfiles huecos rectangulares
- *SHS.pfc*: base de datos de perfiles huecos cuadrados

- *Tabla_esfuerzos*: Subrutina que realiza el montaje de la tabla de esfuerzos, a partir de los valores de esfuerzos y los ratios.
- *V_ga*: Función para la verificación del cumplimiento de las condiciones de validez generales.
- *V_gb*: Función que obtiene los esfuerzos de acuerdo a las barras implicadas en el nudo y discrimina las comprobaciones geométricas a realizar según el tipo de nudo.
- *V_gbKe*: Función que calcula las funciones de referencia para la comprobación de la validez geométrica de los nudos en K y N con espaciamiento.
- *V_gbT*: Función que calcula las funciones de referencia para la comprobación de la validez geométrica de los nudos en T, Y y X.
- *V_grKe*: Función que calcula las funciones de referencia para la comprobación de la resistencia de los nudos en K y N con espaciamiento, así como de las soldaduras.
- *V_grT*: Función que calcula las funciones de referencia para la comprobación de la resistencia de los nudos en T, Y y X, así como de las soldaduras.
- *Verifexc*: Subrutina que comprueba si la excentricidad y el espaciamiento están dentro de los límites calculados.
- *VerifNRd*: Subrutina que compara los esfuerzos con los valores obtenidos mediante el programa *V_gr**, según corresponda.
- *VerifVgb*: Subrutina que verifica el cumplimiento de las condiciones de validez geométrica a partir de los valores calculados en *V_gb**, según corresponda.

Además, para el almacenamiento de las imágenes que se utilizan para describir cada tipo de nudo, se utiliza la carpeta “imágenes”, situada en la carpeta principal.

El manual del usuario también se encuentra en la carpeta principal.

4.2.5 Descripción del programa principal *DINET*

Todos los archivos .m asociados a GUI elaborados mediante GUIDE, tienen una primera función, que no debe ser modificada.

A continuación tienen la función que únicamente se ejecuta al inicio, que en este caso es:

```
>> function DINET_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

Dentro de esta función se incluye:

- la ejecución de la función *iniDINET*
- la inicialización de los botones de validez del nudo e informe
- el posicionado de la ventana en el centro de la pantalla
- el dibujo inicial del nudo en la ventana gráfica
- la selección de la imagen correspondiente al nudo por defecto seleccionado

Después siempre aparece una función que se ejecuta cuando se finaliza el programa o se cierra:

```
>> function varargout = DINET_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

En esta función únicamente se incluye el borrado de la ventana.

A continuación aparecen cada una de las funciones asociadas a los componentes definidos al realizar el layout de la GUI.

Estas funciones tienen como nombre la etiqueta (Tag) del componente en la GUI, seguidas del término `_Callback` y se ejecutan cuando se produce algún cambio o selección en el componente correspondiente.

Además, con cada componente se crea otra función adicional, cuyo nombre también empieza por la etiqueta y termina con el término `_CreateFcn`, que se encarga de ejecutarse durante la creación del componente, después de haber fijado todas sus propiedades definidas en el archivo `.fig`. Estas funciones no se han modificado para ningún componente, por lo que no se volverá a hacer mención de ellas.

4.2.5.1 *Funciones correspondientes a los componentes del panel de Datos Generales*

Todos los componentes del panel de Datos Generales son ventanas de introducción de datos, que por no corresponder con ningún cálculo, no llevan asociadas ninguna rutina en sus funciones `_Callback`, por lo que todas ellas aparecen vacías.

4.2.5.2 *Funciones correspondientes a los componentes del panel de Tipo de Nudo*

Este panel está formado por 6 puntos de selección y una ventana gráfica. La ventana gráfica no tiene ninguna función asociada.

Los puntos de selección, correspondientes cada uno de ellos con un tipo de nudo, al estar insertados dentro del panel Tipo de Nudo, no llevan asociada función directamente, sino que es el propio panel el que tiene asociada la función:

```
>> function Pan_tipo_nudo_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función es exclusiva de los paneles y se ejecuta cuando cambia el botón o punto de selección insertado en su interior. El panel también controla que no pueda estar activo más de una selección a la vez.

Al ejecutarse esta función, devuelve el valor nuevo del punto seleccionado, identificado mediante su etiqueta.

Las acciones realizadas a partir de ese momento son:

- Se actualiza la variable del programa que se ha escogido para almacenar el tipo de nudo ('T', 'Y', 'X', 'K', 'N' o 'KT'):
 - `handles.PFC.nudo`
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se obtiene la excentricidad si corresponde por el tipo de nudo.

- Se obtienen los nuevos ratios de esfuerzos
- Se actualiza la representación gráfica del nudo
- Se actualiza la imagen fija del tipo de nudo

4.2.5.3 *Funciones correspondientes a los componentes del panel de Geometría del Nudo*

Este panel está formado por 5 ventanas no editables, que reflejan los valores límite de la excentricidad y los espaciamientos. Dichas ventanas no disponen de comandos en sus funciones asociadas.

Además hay 3 ventanas editables, una para la excentricidad, y otras dos para los espaciamientos.

La función Callback que se ejecuta cuando se activa la ventana de la excentricidad es la siguiente:

```
>> function Ventana_excentricidad_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dicha función tiene por objeto realizar las siguientes acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se obtienen los valores actualizados del espaciamiento de acuerdo a la nueva geometría.
- Se avisa de posibles errores si la excentricidad o espaciamiento no están entre los valores límite.
- Se actualizan las variables con los nuevos valores de excentricidad y espaciamiento.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se activan las ventanas del espaciamiento de la diagonal 1 o del espaciamiento de la diagonal 2 son las siguientes:

```
>> function Ventana_espaciamiento_diagonal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Ventana_espaciamiento_diagonal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dichas funciones tiene por objeto realizar las siguientes acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se obtienen los valores actualizados del espaciamiento de la otra diagonal y de la excentricidad de acuerdo a la nueva geometría.
- Se avisa de posibles errores si la excentricidad o espaciamiento no están entre los valores límite.
- Se actualizan las variables con los nuevos valores de excentricidad y espaciamiento.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

Por último, dentro del mismo panel, se ha incluido un subpanel, que contiene 2 puntos de selección, referidos a si la diagonal 1 o la diagonal 2 es la diagonal solapada en caso de solape.

La función Callback que se ejecuta cuando se modifica el valor de dichos puntos es:

```
>> function Pan_diagonal_solapada_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Las acciones a realizar cuando se ejecuta esta función son:

- Asigna el valor de la diagonal solapada (1 o 2) a la variable:
 - *handles.PFC.diagonal_solapada*
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

4.2.5.4 *Funciones correspondientes a los componentes de los paneles de las barras del nudo (Cordón, Diagonal 1, Diagonal 2 y Montante)*

Estos paneles está formado por componentes de distinto tipo, pero para todos los tipos de barras se repiten una serie de componentes con una estructura similar, por lo estos serán los que se describan en primer lugar, de forma conjunta para los cuatro tipos de barras.

En primer lugar todas las barras disponen de una ventana de persiana que permite elegir el tipo de perfil. La ventana contiene la base de datos cargada durante la ejecución de la función iniDINET, tanto de los perfiles SHR como SHS, y en este orden.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se despliegan dichas ventanas son:

```
>> function Pop_perfil_cordon_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_perfil_diagonal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_perfil_diagonal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_perfil_montante_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Las acciones a realizar cuando se ejecutan estas funciones son:

- Se actualiza la variable del programa que almacena el valor antiguo del tipo de perfil:
 - *handles.PFC.Tperfil_viejo*
- Se actualizan los valores límite de la excentricidad y el espaciamiento.
- Se avisa en caso de que el tipo de perfil con el material existente no sea un suministro estándar.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se obtienen los nuevos ratios de esfuerzos
- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

Todas las barras disponen de una ventana de persiana que permite elegir el material. La ventana contiene la base de datos cargada durante la ejecución de la función iniDINET, de los materiales S235H, S275H, S355H de acuerdo a las normas EN 10210-1 y EN 10219-1, correspondientes a las condiciones de suministro de los perfiles huecos para construcción acabados en caliente, y soldados y conformados en frío, respectivamente. Estos valores son inferiores a los indicados en la norma EN 1993-1-1 y ofrecen por lo tanto valores más conservadores en el cálculo de las soldaduras, ya que cambian los intervalos de espesores. En cualquier caso, se han implementado estos, por ser las normas EN 10210-1 y EN 10219-1 más actuales. Los valores introducidos son para perfiles de espesores entre 3 y 16 mm.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se despliegan dichas ventanas son:

```
>> function Pop_material_cordon_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_material_diagonal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_material_diagonal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Pop_material_montante_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Las acciones a realizar cuando se ejecutan estas funciones son:

- Se actualiza la variable del programa que almacena el valor antiguo del material:
 - *handles.PFC.Mperfil_viejo*
- Se avisa en caso de que el material seleccionado, con el tipo de perfil existente no sea un suministro estándar.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 2 (no afecta a la validez general)
- Se obtienen los nuevos ratios de esfuerzos.

Los perfiles de cada barra, en caso de ser rectangulares tienen 2 posibles posiciones para su ensamblaje en el nudo. Dichas posiciones se han representado en DINET mediante dos puntos de selección: uno indicando 0° (posición de máxima inercia – eje y -) y el otro 90° (posición de mínima inercia – eje z -). Para contener y seleccionar dichos puntos se ha empleado un subpanel de selección.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se modifica el valor de dichos puntos son:

```
>> function Pan_rotacion_cordon_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
>> function Pan_rotacion_diagonal1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
>> function Pan_rotacion_diagonal2_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
>> function Pan_rotacion_montante_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Las acciones a realizar cuando se ejecuta alguna de estas funciones son:

- Asigna el valor de la rotación (0 para 90° y 1 para 0°) a la variable:
 - *handles.PFC.aperfil*
- Se actualizan los valores límite de la excentricidad y el espaciamiento.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 3.
- Se obtienen los nuevos ratios de esfuerzos.

- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

La longitud de cada perfil se introduce a través de una ventana de introducción de datos editable.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se modifica el valor de las ventanas de longitud son:

```
>> function Ventana_longitud_cordon_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Ventana_longitud_diagonal1_Callback(hObject, eventdata,
handles)
>> function Ventana_longitud_diagonal2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
>> function Ventana_longitud_montante_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dichas funciones tienen por objeto realizar las siguientes acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número mayor que cero. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se actualizan las variables con los nuevos valores de longitud.
- Se actualiza el estado de validez al valor 3.

Todas las barras disponen de un botón “Descripción Perfil” que abre una nueva ventana con los parámetros almacenados en la base de datos, así como realiza una representación gráfica de la sección real del perfil, en la posición de rotación seleccionada.

Las funciones Callback correspondientes tienen como única acción la de llamar a la función *Descr_perfil*:

```
>> function Boton_perfil_cordon_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Boton_perfil_diagonal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Boton_perfil_diagonal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Boton_perfil_montante_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

En los cálculos de la resistencia del nudo, se precisa conocer el acabado del perfil del cordón para seleccionar el coeficiente de imperfección α :

- Acabado en caliente
- Conformado en frío

Teniendo esto en cuenta, se ha añadido una ventana desplegable con las 2 posibilidades de acabado comentadas, debajo de la ventana de longitud, únicamente, del panel del cordón.

La función Callback correspondiente es:

```
>> function Pop_acabado_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función tiene como acciones:

- Almacenar el valor del acabado (1 – acabado en caliente y 2 – conformado en frío) en la variable correspondiente:
 - *handles.PFC.acabado*

- Se actualiza el estadio de validez al valor 1 (no afecta a la validez geométrica ni general)

Los ángulos de las diagonales con respecto al cordón se introducen a través de unas ventanas de introducción de datos editables de los paneles de la diagonal 1 y de la diagonal 2, únicamente.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se modifica el valor de las ventanas de ángulo son:

```
>> function Ventana_angulo_diagonal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Ventana_angulo_diagonal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dichas funciones tienen por objeto realizar las siguientes acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número, y si el ángulo con el cordón o con el montante es mayor que 30°. También se comprueba que el ángulo introducido es menor de 90°. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se actualizan las variables con los nuevos valores del ángulo.
- Si el nudo es en K y el ángulo entre las 2 diagonales es inferior a 30° indica un aviso en comentarios, pero no muestra un error porque puede corregirse cambiando el ángulo de la otra diagonal.
- Se actualizan los valores límite de la excentricidad y el espaciamiento.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 2 para nudos en Y y X, y al valor 3 para el resto de nudos.
- Se actualiza la representación gráfica del nudo.

4.2.5.5 *Funciones correspondientes a los componentes del panel de Coeficiente de Seguridad*

Este panel está formado por 2 ventanas de introducción de datos, editables, que permiten modificar los coeficientes de seguridad de las soldaduras y del cálculo de la resistencia del nudo. Ambas ventanas tienen los valores por defecto que indica la norma EN 1991-1-8.

Las funciones Callback que se ejecutan cuando se modifica el valor de las ventanas de los coeficientes de seguridad son:

```
>> function Ventana_gammaM2_Callback(hObject, eventdata, handles)
>> function Ventana_gammaM5_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dichas funciones tienen por objeto realizar las siguientes acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número mayor que cero. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se actualizan las variables con los nuevos valores del coeficiente de seguridad γ_{M2} y γ_{M5} .
- Se actualiza el estadio de validez al valor 1 (ya que los cambios no afectan a las condiciones de validez generales ni geométricas)

4.2.5.6 *Funciones correspondientes a los componentes del panel de Soldaduras*

Este panel está formado por una ventana no editable, que indica el valor mínimo que ha de tener el espesor de garganta de la soldadura. Dicho valor es fijo, de acuerdo a las indicaciones de la norma EN 1993-1-8 en su apartado 4.5.2, donde indica que el espesor de garganta efectivo de una soldadura en ángulo no debería ser inferior a 3 mm.

La otra ventana de este panel es editable, y permite introducir el valor del espesor de garganta de todas las soldaduras del nudo.

La función Callback correspondiente es:

```
>> function Ventana_soldadura_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función tiene como acciones:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número mayor que el mínimo indicado en la otra ventana. En otro caso devuelve la ventana al valor antiguo y da un mensaje de error.
- A continuación se actualiza la variable con el nuevo valor del espesor de garganta.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 1 (ya que los cambios no afectan a las condiciones de validez generales ni geométricas)

4.2.5.7 *Funciones correspondientes a los componentes del panel Esfuerzos en el Nudo*

Este panel está formado por una tabla con las filas configurables en función de las barras que participan, según el tipo de nudo y 3 columnas. La primera de ellas es editable y permite introducir los esfuerzos axiales en kN. La segunda columna permite introducir los momentos flectores de cada barra en kN·m, pero está provisionalmente deshabilitada al no haberse resuelto completamente el cálculo de momentos en la versión actual del programa. La tercera columna no es editable y permite visualizar los ratios estimados del análisis estático de las barras.

Las tablas generan un tipo especial de función denominado CellEditCallback, que se ejecuta cuando se introduce algún dato nuevo en alguna de las celdas editables de la tabla:

```
>> function Tabla_esfuerzos_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)
```

La variable *eventdata* es una estructura que contiene 5 miembros:

- Indices: que indica la posición en fila y columna de la celda editada
- PreviousData: que guarda el valor antiguo de la celda.
- EditData: con el texto nuevo introducido.

- **NewData:** Texto introducido convertido al formato establecido al definir el tipo de columna. En caso de no poder realizarse la conversión, se devuelve un valor vacío.
- **Error:** Mensaje de error en caso de que no se haya podido realizar la conversión comentada anteriormente.

Las acciones realizadas en esta función son las siguientes:

- En primer lugar se verifica si el valor introducido es un número. En otro caso devuelve la celda al valor antiguo y da un mensaje de error.
- Se identifica el tipo de barra donde se ha producido la modificación, ya que dependiendo del tipo de nudo, las filas tienen unas barras u otras.
- Almacena el valor del nuevo esfuerzo en la variable correspondiente:
 - *handles.PFC.Esfuerzos*
- Obtiene los ratios estimados de los esfuerzos en las barras de nuevo.
- Se actualiza el estadio de validez al valor 2 (ya que los cambios no afectan a las condiciones de validez generales)

4.2.5.8 *Funciones correspondientes a los componentes del panel*

Comprobación Validez Geométrica

Este panel está formado por una tabla sin etiquetas en las filas. Además, ninguna celda de esta tabla es editable. Así, cada fila contendrá la condición de validez que se introduzca en cada caso al elaborar el contenido de la tabla con la función CreaTVG.

Esta panel no tiene código asociado a su Callback .

4.2.5.9 *Funciones correspondientes a los componentes del panel*

Comprobación Resistencia del Nudo

Este panel, al igual que el de Validez Geométrica, está formado por una tabla sin etiquetas en las filas. Además, ninguna de las celdas de esta tabla es editable. Así, cada fila contendrá la causa de fallo que se introduzca en cada caso al elaborar el contenido de la tabla con la función CreaTR.

Esta panel no tiene código asociado a su Callback .

4.2.5.10 *Funciones correspondientes a los componentes del panel*

Representación Gráfica

Este panel tampoco contiene ningún código asociado, ya que está formado por una ventana de representación gráfica que no puede ser modificada desde la GUI.

4.2.5.11 *Funciones correspondientes a los componentes del panel*

Comentarios

Este panel tampoco contiene ningún código asociado, ya que está formado por una ventana con un componente de lista, que se utiliza para mostrar el historial de

comentarios, sin necesidad de recoger ninguna información sobre lo que el usuario hace con la lista desde la GUI.

4.2.5.12 *Funciones correspondientes a los componentes del Botón de Validez General*

El botón de validez general se encuentra situado de forma independiente, sin formar parte de ningún panel. Su objetivo es ejecutar el proceso de validación general de los parámetros introducidos en la GUI.

La función Callback correspondiente es:

```
>> function Boton_validez_general_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función tiene como acciones:

- En primer lugar se verifica que la variable *handles.PFC.validez* tenga un valor igual a 3. En otro caso se indica en comentarios que sigue siendo válidos los cálculos anteriores y se sale de la función.
- A continuación se comprueba los ángulos entre las diagonales y el montante si el nudo es en N o en KT, y entre las 2 diagonales si el nudo es en K. En caso de que no se cumpla, se indica mediante un mensaje de error y se sale de la función.
- Se verifica que la anchura del cordón no es menor que la de las diagonales y montante del nudo. En caso de que no se cumpla, se indica mediante un mensaje de error y se sale de la función.
- Se ejecuta la función *V_ga* que comprueba el resto de condiciones de validez general del nudo. En caso de que no se cumpla, se indica mediante un mensaje de error y se sale de la función.
- Si no ha habido ningún mensaje de error, se actualiza el estadio de validez al valor 2, y se indica en comentarios que se ha comprobado la validez del nudo de forma satisfactoria.

4.2.5.13 *Funciones correspondientes a los componentes del Botón de Validez Nudo*

El botón de validez del nudo también se encuentra situado de forma independiente, sin formar parte de ningún panel. Su objetivo es ejecutar el proceso de validación de las condiciones geométricas y realizar las comprobaciones de la resistencia del nudo.

La función Callback correspondiente es:

```
>> function Boton_validez_nudo_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función tiene como acción preliminar:

- En primer lugar se verifica que la variable *handles.PFC.validez* tenga un valor mayor que 0. Como en caso de ser mayor de 2 el botón no estaría activo, sólo puede darse el caso de que sea menor. En el caso de que valga 0 se indica en comentarios que sigue siendo válidos los cálculos anteriores y se

sale de la función. También se comprueba si existe solapamiento, ya que no se ha implementado todavía su resolución.

Las comprobaciones a realizar se han organizado en fases:

- FASE 1: Verificación geométrica
 - Se obtienen las relaciones geométricas mediante la función V_gb , quedando almacenada en la variable Vgb .
 - Se utiliza la función $VerifVgb$ para saber si se cumplen o no cada una de las relaciones geométricas obtenidas anteriormente, generándose una matriz de validez de cada una de las condiciones, para cada barra comprobada: $Tcond$
 - Con dicha matriz, se construye, con la función $CreaTVG$, la tabla que será mostrada en el panel de Validez Geométrica.
 - En caso de no cumplirse todas las condiciones se muestra una ventana de error indicando el número de incumplimientos para que puedan ser comprobados en el listado del panel. A continuación se termina la comprobación.
 - En caso de cumplirse todas las verificaciones, se indica en comentarios y se actualiza la variable $handles.PFC.validez$ con el valor de 1.
- FASE 2: Verificación de resistencias
 - Se obtienen según el tipo de nudo las resistencias para cada tipo de fallo. También se obtienen las tensiones de las soldaduras de los perfiles existentes en el nudo. No se ha implementado todavía la comprobación del nudo KT, ni de los nudos N o K con solape.
 - Se utiliza la función $VerifNRd$ para saber si se cumplen o no cada una de las resistencias obtenidas anteriormente, generándose una matriz con los ratios de cada uno de los tipos de fallo, para cada barra comprobada: $Tratio$
 - Con dicha matriz, se construye, con la función $CreaTR$, la tabla que será mostrada en el panel de Comprobación de Resistencias del Nudo. Además, la función obtiene el $Ratio$ del conjunto de la unión.
 - Se actualizan todas las variables que almacenan la información del cálculo de las resistencias para utilizarlas después en la creación del informe.
 - Se actualiza la ventana no editable que muestra el ratio total de la unión.
 - Independientemente de que se hayan completado o no satisfactoriamente las comprobaciones de resistencia, se pasa la variable $handles.PFC.validez$ a 0, lo cual activa el botón de informe.

4.2.5.14 *Funciones correspondientes a los componentes del Botón de Informe*

El botón de informe también se encuentra situado de forma independiente, sin formar parte de ningún panel. Su objetivo es generar el informe, guardarlo en la carpeta principal y abrirlo en el bloc de notas.

La función Callback correspondiente es:

```
>> function Boton_informe_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Esta función no precisa realizar la comprobación de si la variable *handles.PFC.validez* es igual a 0, ya que en otro caso no se activaría el botón. Las acciones que se realizan en esta función son las siguientes:

- En primer lugar se construye el nombre del informe con los datos introducidos en las ventanas de:
 - Referencia
 - Cercha
 - Nudo
 - Estado de carga
- Además se obtiene el valor actual de la fecha y hora, para incluirlos en el nombre del informe.
- Se abre el archivo del informe como documento de texto y se llama a la función *Crea_Informe* para completarlo.
- Por último se cierra el archivo del informe y se abre en el bloc de notas mediante la función: *winopen*

4.2.6 Descripción de la función *Crea_Avisos*

Esta función tiene la misión de añadir una nueva línea de texto a la variable que almacena el historial de comentarios y mostrarlo en el panel de Comentarios.

Las principales variables de esta función son:

- *handles.PFC.Avisos.contenido*: donde se almacena el historial
- *handles.PFC.Avisos.indice*: donde se indica la cantidad de comentarios almacenados

Se ha establecido un límite máximo de 200 avisos con el fin de que en caso de un uso continuo del programa, la variable que almacena el historial no consuma demasiados recursos del sistema.

En primer lugar, la función verifica si se ha alcanzado dicho límite, borrando el primer comentario en caso afirmativo.

A continuación se añade el comentario a la lista y se muestra en el panel Comentarios, haciendo que se muestre como valor actual el último comentario (se resalta mediante un fondo azul).

4.2.7 Descripción de la función *Crea_Informe*

Esta función tiene como misión la de generar las líneas del informe, grabándolas en el archivo de texto abierto en DINET al pulsar el botón Informe.

Esta función almacena todas las líneas que genera automáticamente en el archivo mediante la función *fprintf*, por lo que no actualiza ninguna variable de la estructura *handles.PFC*.

Como ayuda para la generación del informe, se determinan inicialmente una serie de variables que determinan el número de barras del nudo por un lado (*k*) y el tipo de barras activas en el nudo (*i*).

El informe se inicia con la información existente en el panel de Datos Generales y el ratio del nudo, obtenidos directamente de los valores actuales de las ventanas de la GUI.

Para mostrar la geometría del nudo se realiza una iteración por las cuatro posibles barras, mostrando únicamente las que están activas.

Los parámetros de cada barra se obtienen directamente de la estructura *handles.PFC.bp*.

De igual forma se procede con los materiales de las barras del nudo, empleando la estructura *handles.PFC.bm*.

En caso de que el nudo tenga más de 1 barra, se muestra la excentricidad y el espaciamiento.

A continuación se añade el valor del espesor de la garganta de soldadura.

Para añadir los esfuerzos de las barras activas, se emplea la misma iteración que para los parámetros de las barras. No obstante, se ha tenido que utilizar una variable auxiliar *j1* para poder tener en cuenta que el cordón (barra n°1) tiene 2 valores de esfuerzo, uno por cada lado (C1 y C2).

Los valores de los coeficientes de seguridad se incluyen, obteniendo sus valores de las variables almacenadas en la estructura *handles.PFC* que almacenan los valores actuales.

Antes de escribir los resultados de las resistencias, se incluye la relación de parámetros generales, obtenidos de las variables correspondientes almacenadas en la estructura *handles.PFC*. En caso de no existir el parámetro correspondiente (NaN), se muestra un texto indicando que dicho parámetro se ha excluido del cálculo.

A continuación se muestran las anchuras eficaces de cada barra activa en el nudo.

Para la representación de las resistencias, en primer lugar se comprueba si se ha calculado la resistencia a pandeo o cortante de las caras laterales del cordón con la variable *handles.PFC.Tratio*. En caso afirmativo, se muestra en primer lugar el valor absoluto del esfuerzo entre diagonales y a continuación el valor de cálculo de la resistencia.

Todas las resistencias que se muestran en el informe tienen a su derecha el valor del ratio con respecto al esfuerzo correspondiente.

A continuación se añaden las resistencias calculadas para cada barra activa, mostrando en cada caso el valor absoluto del esfuerzo en primer lugar, e indicando al final de cada barra si cumple o no con los valores máximos de resistencia, así como el ratio total de la barra.

Igualmente, en caso de que no exista solape (la opción con solape no está implementada todavía), se representan también las comprobaciones realizadas de las soldaduras. Para ello, también por barra, se indica la tensión máxima de los cordones transversales y longitudinales, indicando finalmente si cumple o no y el valor del ratio de la barra con respecto a la soldadura.

Por último, se vuelve a mostrar el ratio total de la unión, indicando si el nudo cumple globalmente con el Eurocódigo 3 o no.

4.2.8 Descripción de la función *CreaTR*

Esta función tiene como misión la de generar la tabla que ha de mostrarse en el panel de Resistencias del nudo.

Como variables de entrada se emplea:

- *Tratio*: contiene los ratios de cada comprobación de resistencias de cada una de las barras

En la variable *TXT* se almacenan los textos correspondientes a los distintos tipos de fallo.

Como variable de salida se genera una matriz de celdas *TR*, siendo cada fila un tipo de fallo analizado y cada columna:

- 1ª Columna: Texto correspondiente al tipo de fallo analizado
- 2ª Columna: Indica si cumple con la resistencia máxima
- 3ª Columna: añade el valor del ratio

Se realiza una iteración con cada tipo de fallo y se detectan cuales han sido analizados, comprobando el valor de la primera columna de *Tratio*. Tras cada iteración se almacena el valor del ratio máximo de cada tipo de fallo.

Finalmente se almacena en la variable de salida *RatioTotal* el mayor de todos los ratios.

4.2.9 Descripción de la función *CreaTVG*

Esta función tiene como misión la de generar la tabla que ha de mostrarse en el panel de Validez geométrica.

Como variables de entrada se emplea:

- *Tcond*: cada fila representa un tipo de relación a comprobar y cada columna almacena mediante un valor lógico (0 o 1) si cumple o no con dicha relación cada barra.

En la variable *TVG* se almacenan las descripciones correspondientes a las distintas relaciones.

Como variable de salida se genera una matriz de celdas *TVG*, siendo cada fila una relación y cada columna:

- 1ª Columna: Texto que describe la relación analizada
- 2ª Columna: Indica si cumple o no la relación con la norma.

Se realiza una iteración con cada relación posible y se comprueba si se han cumplido para todas las barras del nudo, poniendo la columna en “falso” en caso de que no se cumpla alguna.

4.2.10 Descripción de la función *Creditos*

Esta función es, como el programa principal *DINET*, el archivo .m que soporta la ejecución de la GUI diseñada para mostrar los créditos del programa. Dicha ventana se abre seleccionando la opción créditos en el menú de Ayuda.

La GUI tiene 2 partes diferenciadas:

- El texto fijo, introducido como etiquetas, que no puede ser modificado, donde se describen todos los datos relativos a la realización del programa.
- Botón de salida: Situado en la parte inferior, facilita el cierre de la ventana, para continuar en *DINET*.

Al no admitirse ninguna acción sobre la GUI, a excepción de pulsar el botón de salir, prácticamente todo el código se ha tenido que añadir en la función de inicio, quedando la ventana a la espera únicamente de la pulsación de dicho botón.

Como variables de entrada se han incluido las siguientes variables:

- $Varargin\{1\} = handles.PFC.posicion$: contiene la posición de la ventana de DINET actual.

Así, la función del inicio es:

```
>> function Creditos_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

Dentro de esta función se incluyen las siguientes acciones:

- Se posiciona la ventana y se indica que se están mostrando los créditos en la cabecera de la ventana.
- Se ha habilitado la orden `uiwait(handles.figure1)` con el fin de que la ventana espere a que el usuario haga alguna acción (cerrar o pulsar el botón) antes de cerrarla. Mientras tanto, como la ventana se ha descrito como “modal”, no podrá realizarse ninguna otra acción en DINET.

La función que se ejecuta cuando se finaliza el programa o se cierra es la siguiente:

```
>> function varargout = Creditos_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

En esta función únicamente se incluye el borrado de la ventana mediante el comando: `delete(hObject)`

A continuación aparece la función correspondiente al botón de Salir:

```
>> function Boton_Salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dicha función contiene el comando que cierra la ventana: `close(handles.figure1)`.

Para gestionar el cierre de la ventana, existe la función:

```
>> function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Cuyo único comando es: `uiresume(handles.figure1)` cuya misión es dejar continuar con la ejecución que había detenido `uiwait`. Así se consigue que se ejecute la función de salida comentada anteriormente, borrando la ventana.

4.2.11 Descripción de la función *Datosexcen*

Esta función tiene como misión la de mostrar los valores de excentricidad y espaciamiento y sus valores límite.

Como variables de entrada se emplea:

- *Vexcen*: que es un vector que contiene todos los valores límite de excentricidad y espaciamiento, y que además, puede llevar o no los valores nuevos de excentricidad o espaciamiento.

El programa muestra de forma automática todos los valores límite excepto en el caso de los nudos K y N, que no muestra los valores del espaciamiento en la diagonal 2 (por no existir realmente).

Por otro lado, el programa comprueba los valores de excentricidad y espaciamiento, uno a uno, y ofrece 2 opciones:

- Si existe sobrescribe el valor actual.
- Si no existe (NaN) entonces cambia el color a rojo, indicando que está pendiente de la verificación general.

No tiene variables de salida.

4.2.12 Descripción de la función *Datosnudo*

Esta función tiene como misión la de mostrar las características de todas las barras, tomando los valores de las variables de entrada y fijándolos en las ventanas correspondientes.

Como variables de entrada se emplea:

- *Tperfil*: que es un vector que almacena el número de tipo de perfil de acuerdo a la base de datos de perfiles cargada por el programa.
- *Mperfil*: que es un vector que almacena el número de material de acuerdo a la base de datos de materiales cargada por el programa.
- *Adiagonal*: vector que almacena los valores del ángulo de las 2 diagonales con respecto al cordón.
- *Lperfil*: vector que almacena las longitudes de las 4 barras.
- *handles.PFC.aperfil*: variable incluida en la estructura *handles.PFC*, que indica el ángulo de rotación de cada barra.

No tiene variables de salida.

4.2.13 Descripción de la función *Descr_perfil*

Esta función es, como el programa principal *DINET*, el archivo .m que soporta la ejecución de la GUI diseñada para mostrar los parámetros de los perfiles.

La GUI tiene 4 partes diferenciadas:

- Cabecera: donde se muestra el tipo de perfil y el ángulo de rotación
- Dibujo: donde se hace la representación gráfica a escala de la sección del perfil.

- Parámetros: Situada a la derecha de la ventana, se han incluido una serie de ventanas no editables para poder representar cada parámetro.
- Botón de salida: Situado en la parte inferior, facilita el cierre de la ventana, para continuar en *DINET*.

Al no admitirse ninguna acción sobre la GUI, a excepción de pulsar el botón de cerrar, prácticamente todo el código se ha tenido que añadir en la función de inicio, quedando la ventana a la espera únicamente de la pulsación de dicho botón.

Como variables de entrada se han incluido las siguientes variables:

- $Varargin\{1\} = handles.PFC.Tperfil_viejo$: contiene el valor del tipo de perfil correspondiente a la barra a representar.
- $Varargin\{2\} = handles.PFC.bp$: base de datos de perfiles
- $Varargin\{3\} = handles.PFC.aperfil$: rotación del perfil
- $Varargin\{4\} = handles.PFC.posicion$: contiene la posición de la ventana de DINET actual.
- $Varargin\{5\} =$ tiene un valor multiplicador para posicionar la ventana:
 - Montante: 0
 - Diagonal 2: 1
 - Diagonal 1: 2
 - Cordón: 3

Así, la función del inicio es:

```
>> function Descr_perfil_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

Dentro de esta función se incluyen las siguientes acciones:

- Se posiciona la ventana y se indica la barra del nudo que se está analizando en la cabecera de la ventana, aprovechando el valor de la variable de entrada 5.
- Se completa la ventana que indica el tipo de perfil y su rotación, utilizando las variables de entrada 1, 2 y 3.
- Se obtienen de la base de datos de perfiles todos los parámetros a mostrar y se fijan en las ventanas no editables correspondientes.
- Se realiza la representación gráfica del nudo en los siguientes pasos:
 - En primer lugar se establecen los valores límite de la ventana en función de la dimensión mayor del perfil (altura o anchura), con el fin de visualizar la sección al mayor tamaño posible independientemente de sus dimensiones.
 - Para que la representación sea más realista se ha añadido el valor del radio de las esquinas de la sección a representar.
 - En primer lugar se dibujan las curvas exterior e interior de la sección
 - A continuación se dibujan los ejes, indicando que el de más momento de inercia es el “y” y el de menor momento de inercia el “z”, independientemente de la rotación del perfil
 - Además, se ha añadido las cotas de anchura, altura y espesor con el fin de facilitar la interpretación de los valores numéricos, independientemente del tipo de perfil o rotación.

- Por último, se ha habilitado la orden `uiwait(handles.figure1)` con el fin de que la ventana espere a que el usuario haga alguna acción (cerrar o pulsar el botón) antes de cerrarla. Mientras tanto, como la ventana se ha descrito como “modal”, no podrá realizarse ninguna otra acción en DINET.

La función que se ejecuta cuando se finaliza el programa o se cierra es la siguiente:

```
>> function varargout = Descr_perfil_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

En esta función únicamente se incluye el borrado de la ventana mediante el comando: `delete(hObject)`

A continuación aparece la función correspondiente al botón de Salir:

```
>> function Salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Dicha función contiene el comando que cierra la ventana: `close(handles.figure1)`.

Para gestionar el cierre de la ventana, existe la función:

```
>> function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Cuyo único comando es: `uiresume(handles.figure1)` cuya misión es dejar continuar con la ejecución que había detenido `uiwait`. Así se consigue que se ejecute la función de salida comentada anteriormente, borrando la ventana.

4.2.14 Descripción de la función *dibReprnudo*

Esta función tiene como misión la de realizar la representación gráfica de los perfiles, con sus dimensiones reales, a escala, de acuerdo a los valores actuales existentes en la GUI.

No realiza ninguna modificación en las variables del programa, ni tiene variables de salida.

En primer lugar obtiene los parámetros dimensionales de los perfiles del nudo, así como su excentricidad.

Para realizar el dibujo a escala se han establecido unas variables dimensionales que han facilitado el ajuste del dibujo a la ventana gráfica, según se ha ido realizando la programación.

El primer paso es el dibujo del cordón, tanto en la vista lateral, como en la sección.

Como la diagonal 2 es la que queda detrás de los demás perfiles en la vista en sección, es la primera en dibujarse. Posteriormente se dibuja el montante y por último la diagonal 1.

Por último, se dibujan los ejes verticales, según el tipo de nudo.

4.2.15 Descripción de la función *dibTiponudo*

Esta función tiene como misión la de mostrar en la ventana del panel Tipo de Nudo, la imagen fija con la representación esquemática del nudo actual seleccionado.

En primer lugar se localiza el archivo de imagen, dentro de la carpeta “imagenes”, situada en la carpeta principal, de acuerdo al tipo de nudo actual.

En caso de existir utiliza el comando *imread* para convertir la imagen en formato RGB, y se utiliza el comando *image* para mostrarlo en la ventana gráfica.

4.2.16 Descripción de la función *espaciamiento*

Esta función tiene como misión la de calcular el espaciamiento a partir de las siguientes variables de entrada:

- *e*: excentricidad
- *h*: altura de las barras del nudo
- *theta*: ángulo de las diagonales. En caso de nudo en N, para el montante le asigna 90° .
- *Nudo*: tipo de nudo

Tras los cálculos trigonométricos correspondientes, se obtienen 2 variables de salida (*g1* y *g2*) que contienen el valor del espaciamiento:

- Para los nudos en K y N el valor de $g1 = g2$, ya que hay un único espaciamiento.

4.2.17 Descripción de la función *excentricidad*

Esta función tiene como misión la de calcular la excentricidad a partir de las siguientes variables de entrada:

- *Tg*: es una etiqueta que puede tener el valor: ‘Esp1’ o ‘Esp2’. Y permite diferenciar si se utiliza como dato de entrada el espaciamiento de la diagonal 1 o 2, respectivamente.
- *Esp*: valor del espaciamiento
- *h*: altura de las barras del nudo
- *theta*: ángulo de las diagonales. En caso de nudo en N, para el montante le asigna 90° .
- *Nudo*: tipo de nudo

Tras los cálculos trigonométricos correspondientes, se obtiene 1 variable de salida (*e*) que contienen el valor de la excentricidad.

4.2.18 Descripción de la función *Garg_sin_solape*

Esta función tiene como misión la de calcular las tensiones de los cordones de soldadura de una barra del nudo que esté sin solape.

Las variables de entrada son:

- *NEd*: esfuerzo axil de la barra a analizar.
- *MEd*: momento flector de la barra a analizar

- *Garg*: Valor del espesor de garganta introducido en la GUI.
- *h*: altura de la barra
- *b*: anchura de la barra
- *Adiagonal*: ángulo de la barra con el cordón en radianes. En caso de ser el montante tendrá un valor de $\pi/2$.

En primer lugar se obtiene el valor del Área y del momento de inercia de los cordones de soldadura con respecto al eje y.

El esfuerzo axil se descompone en su componente horizontal y vertical, y se normalizan las unidades.

Se determina el valor de las tensiones *tn*, *n1* y *n2*, del conjunto de soldaduras.

Se calcula el valor de las tensiones sobre la garganta del cordón de soldadura de acuerdo a las fórmulas planteadas en el capítulo n°2 del proyecto.

Finalmente se obtiene una matriz *T*, como variable de salida en la que cada fila contiene las tensiones ($\sigma_1, \tau_1, \tau_2, \sigma_{co}$)

- Fila 1 y 2: tensiones en soldaduras transversales
- Fila 3 y 4: tensiones máximas en soldadura longitudinal.

4.2.19 Descripción de la función *iniDINET*

Esta función tiene como misión ejecutarse al inicio del programa DINET. Utiliza como variable de entrada la estructura *handles*, e igualmente, la entrega como variable de salida, una vez modificada.

Se justifica la realización de esta función para facilitar la edición y depuración de las rutinas que contiene, sin necesidad de abrir DINET, que tiene un tamaño mucho mayor.

El programa se inicia fijando los valores por defecto de todas las ventanas del programa. Esto ha sido especialmente útil en el proceso de depuración, ya que ha evitado tener que introducir todos los datos cada vez que se comprobaba el funcionamiento del programa. Como es un programa que permite la futura programación de muchas más funciones, se han mantenido la misma estructura, por si se quisiera hacer uso de ello.

Una vez introducidos los datos, se han programado las verificaciones mínimas (errores en formato, valores mínimos, ...) para depurar dichos datos, evitando que se produzcan errores en la ejecución del programa que podrían hacer dudar sobre su procedencia. Además, dicha programación ha servido como esquema inicial de las comprobaciones que posteriormente se han ido implementando en el programa principal DINET.

Otra función del programa *iniDINET* es cargar la base de datos de perfiles a partir de los archivos de texto existentes en la carpeta principal del programa. Para ello se ha utilizado la función de MATLAB *importdata*:

- Se ha utilizado el código de control '\t' de tabulación para diferenciar cada elemento del listado de parámetros de cada perfil.
- Se han despreciado las primeras 29 filas que se han considerado como cabecera.
- La función importa los datos guardando cada fila del fichero de texto en una fila de la matriz *shr_datos* o *shs_datos*, según sea el archivo de perfiles

rectangulares o cuadrados, respectivamente. Cada columna de la matriz guarda el valor numérico del parámetro correspondiente.

A continuación se generan las etiquetas de cada perfil de la base de datos, tomando los valores de anchura, altura y espesor. Estas etiquetas se almacenan en la variable: *handles.PFC.bp.denom*, primero para los perfiles RHS y posteriormente para los perfiles SHS, al mismo tiempo, en la variable *handles.PFC.bp.caract* se almacenan todos los parámetros del perfil incluidos en el archivo de texto.

El siguiente paso es indicar en el panel de comentarios de DINET la cantidad de unidades que contiene la base de perfiles, para ofrecer la confirmación de que se han cargado correcta y completamente.

Una vez generadas las bases de datos, se completan las persianas de la GUI de DINET, para la selección de perfiles.

Las verificaciones sobre la validez de los datos introducidos se realiza mediante la función de MATLAB *assert* que provoca la finalización del programa, incluso del DINET, y muestra en la pantalla de comandos de MATLAB el mensaje de error que hemos indicado para cada caso.

Otra función de iniDINET es fijar los valores iniciales de los miembros incluidos en la estructura *handles.PFC*.

También realiza una primera comprobación de que se cumplan las condiciones de validez generales, tanto en cuanto a longitud de los perfiles, como a los valores de excentricidad y espaciamiento.

Por último, se completa la tabla de esfuerzos, se utiliza la función *Selectnudo* para establecer las barras que estarán activas con el tipo de nudo fijado, y se indica en las tablas de validez geométrica y de resistencia, que hay que realizar la comprobación de la validez general.

4.2.20 Descripción de la función *Paramperfil*

Esta función tiene la misión de encontrar los parámetros de altura, anchura, espesor y límite elástico de las barras activas en el nudo.

Como variables de entrada se utiliza la estructura *handles*, no obstante, se ha configurado la función para obtener otros valores distintos a los existentes en la GUI, permitiendo introducir los siguientes valores opcionalmente como variables de entrada:

- *Tperfil*: Tipo de perfil de la barra
- *Mperfil*: Material de la barra

El programa utiliza la base de datos de perfiles y de materiales para localizar los datos necesarios, y los selecciona y agrupa según el tipo de nudo. El objetivo es proporcionar vectores sin elementos vacíos de cada parámetro.

Como variables de salida se entregan las siguientes:

- *h*: altura de las barras activas del nudo
- *b*: anchura de las barras activas del nudo
- *t*: espesor de las barras activas del nudo
- *fy*: límite elástico de las barras activas del nudo

4.2.21 Descripción de la función *Ratio_ esfuerzos*

Esta función tiene como misión la de calcular los ratios aproximados que los esfuerzos y momentos provocan sobre los perfiles elegidos de las barras del nudo. Esto permite tener una referencia de los cambios producidos en caso de necesitar cambiar alguno de los parámetros del nudo por incumplimiento de las condiciones de validez o de resistencia.

Las variables de entrada son:

- *Esfuerzos*: esfuerzos axiales y momentos flectores de las barras del nudo.
- *Mperfil*: Materiales de las barras del nudo.

En primer lugar se obtiene el valor del Área y del módulo resistente de todas las barras del nudo. También se obtienen los valores de resistencia de cada barra.

Se inicia el cálculo obteniendo los ratios de ambos lados del cordón.

Por último, se calculan los ratios de cada barra, comprobando si existe según el tipo de nudo. En caso contrario almacena el valor 0.

El resultado se guarda en un vector llamado *Resfuerzos*, que se entrega como variable de salida.

4.2.22 Descripción de la función *Selectboton*

Esta función tiene como misión activar o desactivar los botones de Validez Nudo y de Informe en función del estado de la variable *handles.PFC.validez*.

El programa empieza activando todos los botones y según el estadio de comprobación, se van desactivando los botones. Primero el de informe y después el de Validez Nudo.

No realiza ningún cambio en las variables del programa, ni tiene variables de salida.

4.2.23 Descripción de la función *Selectnudo*

Esta función tiene como misión activar o desactivar las ventanas de los paneles correspondientes a las barras. Además, también activa las ventanas del panel de Geometría del Nudo, donde se define la excentricidad y el espaciamiento, con el fin de adecuarlo al tipo de nudo seleccionado.

El programa empieza activando todos los paneles y según el tipo de nudo se van desactivando las ventanas barra a barra.

Posteriormente, comprueba las ventanas a habilitar según el tipo de nudo y actualiza el panel de Geometría del Nudo.

No realiza ningún cambio en las variables del programa, ni tiene variables de salida.

4.2.24 Descripción de la función *Tabla_ esfuerzos*

Esta función tiene como misión generar la estructura *Tesfuerzos* que contiene los valores a representar en la tabla de esfuerzos.

Como variables de entrada tiene:

- *Esfuerzos*: esfuerzos axiles y momentos flectores de las barras del nudo.
- *Resfuerzos*: ratios aproximados de los esfuerzos en cada barra

El programa empieza definiendo las 2 filas correspondientes a ambos lados del cordón.

A continuación, comprobando el tipo de nudo, se van añadiendo las filas correspondientes a las barras que realmente están activas en el tipo de nudo actual.

Como variable de salida se entrega la estructura *Tesfuerzos* que está compuesta de 2 miembros:

- *datos*: es una matriz donde se almacenan los valores numéricos de los esfuerzos y ratios, siendo cada fila una barra
- *etiquetas*: es un vector de celdas donde se almacenan los nombres de cada barra con el fin de incorporarlos como etiqueta en cada fila representada en la Tabla de Esfuerzos.

4.2.25 Descripción de la función *V_ga*

Esta función tiene como misión realizar algunas de las comprobaciones para determinar la validez general del nudo. En concreto, comprueba que:

- Se cumple la relación longitud/canto para cada barra.
- Los valores de excentricidad y espaciamiento están dentro de los límites de validez establecidos por la norma.

Como variable de entrada utiliza la estructura *handles*, por necesitar multitud de variables contenida en ella.

En primer lugar, pone a 0 la variable *Err*, que indicará el tipo de error en caso de existir.

A continuación se define la variable vector *i*, que toma para cada columna el valor de 0 o 1 en función de si existe o no la barra correspondiente, siguiendo el orden: cordón, diagonal 1, diagonal 2, montante.

La verificación de la relación longitud/canto se realiza mediante una iteración que recorre todas las posibles barras, comprobando sólo las activas. En caso de no cumplirse alguna relación, la variable *Err* se pone a 1. En caso contrario se indica que se han cumplido todas las comprobaciones longitud/canto.

A continuación se obtiene el valor de la excentricidad, espaciamiento y sus límites mediante la función *Verifexc*. En caso de que el resultado de la verificación sea válido, se escriben todos los valores en las correspondientes ventanas mediante la función *Datosexcen*. Si el resultado no es válido, se indica la razón por la cual no cumple, escribiendo un nuevo comentario y la variable *Err* se pone a 1.

4.2.26 Descripción de la función *V_gb*

Esta función tiene 2 funciones:

- Extraer los esfuerzos de la variable *Tesfuerzos*, y asignarlos a las variables NEd y MEd, únicamente para las barras que están activas.
- Según el tipo de nudo, elegir la función que realiza el cálculo de las relaciones correspondientes a cada condición de validez geométrica a cumplir.

Como variable de entrada utiliza la estructura *handles*, por necesitar multitud de variables contenida en ella.

El programa genera las siguientes variables de salida:

- *NEd*: esfuerzos axiales de las barras activas
- *MEd*: momentos flectores de las barras activas
- *Vgb*: vector de celdas en la que se guardan por orden los resultados de calcular las relaciones de cada una de las barras. Cada celda almacena para cada tipo de comprobación, los resultados por barra, mediante un vector numérico.

4.2.27 Descripción de la función *V_gbKe*

Esta función tiene la misión de calcular las relaciones que permitan comprobar las condiciones de validez geométricas de los nudos K, N o KT sin ningún solape.

Como variables de entrada utilizan las siguientes:

- *h*: altura de las barras activas del nudo
- *b*: anchura de las barras activas del nudo
- *t*: espesor de las barras activas del nudo
- *fy*: límite elástico de las barras activas del nudo
- *NEd*: esfuerzos axiales de las barras activas
- *Nudo*: Tipo de nudo a comprobar

En primer lugar se determina el número de barras (2 o 3) según el tipo de nudo.

A continuación se van calculando una a una todas las relaciones establecidas en las funciones definidas en el capítulo 2 del proyecto, realizando iteraciones cuando corresponde hasta completar el cálculo para todas las barras.

Cuando alguna comprobación no corresponde realizarla, se indica con el valor 'N'.

Al final se almacenan todos los cálculos en un vector de celdas denominado *VgbKe* que se convierte en variable de salida. Cada celda almacena para cada tipo de comprobación, los resultados por barra, mediante un vector numérico.

4.2.28 Descripción de la función *V_gbT*

Esta función tiene la misión de calcular las relaciones que permitan comprobar las condiciones de validez geométricas de los nudos T, Y o X.

Como variables de entrada utilizan las siguientes:

- *h*: altura de las barras activas del nudo
- *b*: anchura de las barras activas del nudo
- *t*: espesor de las barras activas del nudo
- *fy*: límite elástico de las barras activas del nudo
- *NEd*: esfuerzos axiales de las barras activas

El programa va calculando una a una todas las relaciones establecidas en las funciones definidas en el capítulo 2 del proyecto. Como con este tipo de nudo únicamente hay una barra que comprobar, no es preciso realizar iteraciones.

Cuando alguna comprobación no corresponde realizarla, se indica con el valor 'N'.

Al final se almacenan todos los cálculos en un vector de celdas denominado *VgbT* que se convierte en variable de salida. Cada celda almacena para cada tipo de comprobación, los resultados por barra, mediante un vector numérico. Si no se ha realizado alguna comprobación porque no corresponde a estos tipos de nudo, se deja la celda correspondiente vacía, con el fin de tener siempre en la misma celda el mismo tipo de comprobación.

4.2.29 Descripción de la función *V_grKe*

Esta función tiene la misión de calcular las resistencias NRd límites que establece la norma para cada tipo de fallo, en los nudos K, N o KT sin ningún solape.

Como variables de entrada utilizan las siguientes:

- *h*: altura de las barras activas del nudo
- *b*: anchura de las barras activas del nudo
- *t*: espesor de las barras activas del nudo
- *fy*: límite elástico de las barras activas del nudo
- *NEd*: esfuerzos axiales de la barras activas
- *MEd*: momento flector de la barras activas
- *Nudo*: Tipo de nudo a comprobar

Además, se añade la estructura *PFC* para poder acceder a algún valor más almacenado en esta estructura.

En primer lugar se calculan las variables generales que servirán para realizar los cálculos:

- Beta
- n
- kn

El resto de variables se calculan durante la ejecución del programa cuando se va a proceder al cálculo de la resistencia a la que afectan.

Se determina el número de barras (2 o 3) según el tipo de nudo, y se almacena en la variable *j*.

Si alguna resistencia tiene una condición que excluye su cálculo, se comprueba previamente, dando a la resistencia correspondiente el valor de 'NaN'.

A continuación se van calculando una a una todas las resistencias establecidas en las funciones definidas en el capítulo 2 del proyecto, realizando iteraciones cuando corresponde hasta completar el cálculo para todas las barras.

Al final se almacenan todos los cálculos en un vector de celdas denominado *NRd* que se convierte en variable de salida. Cada celda almacena para cada tipo de resistencia, los resultados por barra, mediante un vector numérico.

Además, como variables de salida, también se adjuntan los parámetros calculados, con el fin de que sean incluidos en el informe:

- *Beta*
- *Gamma*
- *ParamG*: Vector que almacena el resto de parámetros más importantes:

- n
- kn
- Av
- Ved
- $VplRd$
- $Beff$
- Bep
- $beov = NaN$: esta variable no corresponde por no existir solape.
- $Eta = NaN$: esta variable sólo se calcula con nudos T, Y y X.

Adicionalmente, también se devuelve el valor de *Adiagonal*, que incluye el ángulo de las diagonales y el montante (si existe) en radianes, evitando su cálculo posterior.

4.2.30 Descripción de la función V_grT

Esta función tiene la misión de calcular las resistencias NRd límites que establece la norma para cada tipo de fallo, en los nudos T, Y o X.

Como variables de entrada utilizan las siguientes:

- h : altura de las barras activas del nudo
- b : anchura de las barras activas del nudo
- t : espesor de las barras activas del nudo
- fy : límite elástico de las barras activas del nudo
- NEd : esfuerzos axiales de la barras activas
- MEd : momento flector de la barras activas
- $Nudo$: Tipo de nudo a comprobar

Además, se añade la estructura *PFC* para poder acceder a algún valor más almacenado en esta estructura.

En primer lugar se calculan las variables generales que servirán para realizar los cálculos:

- Beta
- Eta
- n
- kn

El resto de variables se calculan durante la ejecución del programa cuando se va a proceder al cálculo de la resistencia a la que afectan.

Si alguna resistencia tiene una condición que excluye su cálculo, se comprueba previamente, dando a la resistencia correspondiente el valor de 'NaN'.

A continuación se van calculando una a una todas las resistencias establecidas en las funciones definidas en el capítulo 2 del proyecto. En este caso sólo es preciso guardar un valor para cada resistencia calculada, al haber únicamente un barra.

Al final se almacenan todos los cálculos en un vector de celdas denominado *NRd* que se convierte en variable de salida. Cada celda almacena para cada tipo de resistencia, los resultados.

Además, como variables de salida, también se adjuntan los parámetros calculados, con el fin de que sean incluidos en el informe:

- *Beta*
- *Gamma*
- *ParamG*: Vector que almacena el resto de parámetros más importantes:
 - *n*
 - *kn*
 - *Av*
 - *Ved*
 - *VplRd*
 - *Beff*
 - *Bep*
 - *beov* = NaN: esta variable no corresponde por no existir solape.
 - *Eta*

Adicionalmente, también se devuelve el valor de *Adiagonal*, que incluye el ángulo de las diagonales o el montante (si existe) en radianes, evitando su cálculo posterior.

4.2.31 Descripción de la función *Verifexc*

Esta función tiene la misión de calcular los valores actuales de la excentricidad y espaciamiento y compararlos con los límites marcados por la norma.

Como variables de entrada utilizan las siguientes:

- *varargin{1}* = es un texto que determina a qué se refiere el número que se introduce en *varargin{2}*:
 - ‘Exc’: Excentricidad
 - ‘Esp1’: Espaciamiento 1
 - ‘Esp2’: Espaciamiento 2
 - ‘ ‘: Devuelve los valores límite sin comprobar excentricidad ni espaciamiento
- *varargin{2}*: valor numérico que se corresponde con el texto de *varargin{1}*
- *varargin{3}* = *handles.PFC.nudo*: tipo de nudo
- *varargin{4}* = *h*: altura de las barras activas del nudo
- *varargin{5}* = *b*: anchura de las barras activas del nudo
- *varargin{6}* = *t*: espesor de las barras activas del nudo
- *varargin{7}* = *handles.PFC.Adiagonal_viejo*: ángulo de las diagonales con respecto al cordón

Al inicio se pone el marcador de error *Err* a 0, y se dejan también sin valor las variables correspondientes a la excentricidad y espaciamiento.

El espaciamiento mínimo depende de la variable *Beta*, por lo que se calcula en primer lugar, según el tipo de nudo.

A continuación se calculan todos los límites de la excentricidad y el espaciamiento, según la formulación descrita en el capítulo 2 del proyecto.

En caso de que *varargin{1}* esté vacío, se termina la ejecución y devuelve los valores límite, con las variables de excentricidad y espaciamiento vacías.

El siguiente paso es detectar que tipo de dato se ha introducido en $varargin\{2\}$ y calcular los otros 2 restantes (excentricidad, espaciamento 1 y espaciamento 2) utilizando las funciones *espaciamento* y *excentricidad*, en función de las necesidades.

Uno a uno se van comprobando, a continuación, que los valores obtenidos están dentro de los límites fijados, almacenando un número diferente en la variable *Err*, según el tipo de error detectado. En el momento que detecta un error termina la ejecución de la función.

Las variables de salida son las siguientes:

- *Err*: número que indica el tipo de error detectado. 0 en otro caso.
- *Exc*: excentricidad
- *Exc_min*: excentricidad mínima
- *Exc_max*: excentricidad máxima
- *Esp_g1*: espaciamento 1
- *Esp_g2*: espaciamento 2 (sólo en caso de nudo KT)
- *g1_min*: espaciamento 1 mínimo
- *g2_min*: espaciamento 2 mínimo
- *Esp_max*: espaciamento máximo (vale para ambos espaciamentos si los hay)

4.2.32 Descripción de la función *VerifNRd*

Esta función tiene la misión de comprobar el ratio de los esfuerzos de cada barra con respecto a las resistencias calculadas mediante V_{gr}^* .

Como variables de entrada utiliza la estructura *handles.PFC* para obtener datos específicos, además de las siguientes:

- *NRd*: resistencias calculadas de la barras activas
- *NEd*: esfuerzos axiles de la barras activas
- *MEd*: momento flector de la barras activas
- *T*: tensiones sigma y tau para cada cordón de soldadura del nudo
- *Beta*: parámetro Beta del nudo
- *Gamma*: parámetro gamma del nudo
- *h*: altura de las barras activas del nudo

El proceso de comprobación se inicia poniendo a cero la matriz que va a almacenar los ratios (*Tratio*). Esta variable será la que se entregue al finalizar la función como variable de salida, y está formada por una fila para cada una de las posibles comprobaciones que tiene que realizar. Las columnas de la matriz almacenan números con el siguiente significado:

- Columna 1: vale 1 si se ha realizado la comprobación de ese tipo de fallo según el tipo de nudo y los valores de *Beta* y *Gamma*.
- Columna 2: vale 1 si hay algún ratio calculado para el tipo de fallo de esa fila mayor de 1.
- Columna 3: almacena el valor del mayor ratio para ese tipo de fallo.
- Columna 4, 5 y 6: son los ratios calculados para las diagonales 1, 2 y el montante. Se almacena de forma secuencial, por lo que si, por ejemplo, sólo hay 2 barras (nudos K o N), sólo se ocuparían las columnas 4 y 5.

- Columna 7, 8 y 9: son las resistencias ordenadas con los ratios correspondientes, con el fin de poder utilizarlas en el informe, sin tener que volver a reclasificarlas allí.

Los valores de esfuerzos axiles se comparan con las resistencias en valor absoluto. También se elimina el signo de las tensiones de las soldaduras.

Para facilitar la ejecución de las iteraciones se asigna el número de barras soldadas al cordón en la variable j , dependiendo del tipo de nudo.

Con el fin de realizar las comprobaciones en caso de solape, se ha incluido el código necesario para detectar dónde están dichos solapes, pero no obstante, no se ha implementado en esta versión su comprobación.

En primer lugar se verifican los ratios de los nudos tipo T, X e Y, de acuerdo a la formulación establecida en el capítulo 2 de este proyecto. Únicamente se comprueban los tipos de fallo que indica la norma, por lo que los valores de Beta y Gamma determinan si realiza el cálculo o no. Al completar el cálculo, se termina la ejecución de la función y se devuelve el valor de *Tratio*.

En segundo lugar se ha incluido la formulación correspondiente a los nudos K y N, sin solape. En este caso, al igual que con los nudos en T, X e Y, se siguen los mismos pasos, adaptados a la formulación que le corresponde e igualmente, al terminar el cálculo se finaliza la ejecución de la función y se devuelve el valor de *Tratio*.

Todavía no se ha programado en esta función el cálculo de los ratios correspondientes a nudos en KT o con solape.

4.2.33 Descripción de la función *VerifVgb*

Esta función tiene la misión de comprobar cada una de las condiciones de validez geométrica establecidas por la norma, comparando las relaciones calculadas mediante V_gb^* , con los valores límite.

Como variables de entrada utiliza la estructura *handles.PFC* para obtener datos específicos, además de las siguientes:

- *Vgb*: relaciones de validez geométrica calculadas de la barras activas
- *NEd*: esfuerzos axiles de la barras activas

En este caso, a pesar de no haberse programado la función correspondiente para obtener las relaciones en caso de solape o de nudo KT, sí se ha contemplado esa posibilidad, habiéndose considerado para cada una de las condiciones de validez geométrica, los valores límite que deberían tenerse en cuenta en cada caso.

Se determina el número de barras (1, 2 o 3) según el tipo de nudo, y se almacena en la variable j . También se realiza la comprobación de los solapes presentes en el nudo con el fin de utilizarlo en las comprobaciones. El solape se comprueba con el estado de la variable *handles.PFC.solape*, y se rellena el vector *solape* (siendo cada elemento una diagonal/montante) con el valor lógico de 1 en caso de existir solape y 0 en caso contrario.

El resultado es:

- *handles.PFC.solape = 1*: indica que hay solape en la diagonal 1. Pudiendo darse 3 casos:

- Nudo en K: con la diagonal 2
- Nudo en N o en KT: con el montante
- *handles.PFC.solape = 2*: indica que en un nudo en KT hay solape en la diagonal 2. Por lo tanto afecta también al montante.
- *handles.PFC.solape = 3*: indica que en un nudo en KT hay solape en la diagonal 1 y en la 2. Por lo tanto afecta a la diagonal 1, 2 y al montante.

El proceso de comprobación se inicia poniendo a 0 la matriz que va a almacenar el cumplimiento de cada condición para cada tipo de barra (*Tcond*). Esta variable será la que se entregue al finalizar la función como variable de salida, y está formada por una fila para cada una de las posibles comprobaciones que tiene que realizar. Las columnas de la matriz almacenan números lógicos (0 o 1) con el siguiente significado:

- Cada columna representa una barra.
- En caso de que alguna condición no se cumpla se pone el valor a 1 para la barra que corresponda.

Al finalizar las comprobaciones, si toda la matriz sigue siendo cero indica que se han cumplido todas las condiciones. En caso contrario, servirá para indicar en la tabla de comprobación de la validez geométrica, las condiciones que no se han cumplido.

4.3 VINCULACIÓN ENTRE PROGRAMAS Y VARIABLES

Como resumen a este capítulo, se va a incluir a continuación una relación esquemática de todas las funciones realizadas, con su vinculación entre sí. Además, se indicarán que variables de las estructura *handles.PFC* utiliza cada uno de ellos.

Tabla 4.1 - Vinculación entre programas y variables

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS <i>handles.PFC</i> VINCULADOS
DINET DINET_ OpeningFcn	dibReprnudo dibTiponudo iniDINET Selectboton	posición validez
DINET Pan_tipo_nudo_ SelectionChangeFcn	Crea_Avisos Datosexcen dibReprnudo dibTiponudo Paramperfil Ratio_esfuerzos Selectboton Selectnudo Tabla_esfuerzos Verifexc	Adiagonal_viejo Esfuerzos Mperfil_viejo nudo Tperfil_viejo validez

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
DINET Ventana_excentricidad_ Callback	Crea_Avisos Paramperfil Selectboton Verifexc dibReprnudo	Adiagonal_viejo Mperfil_viejo nudo solape Tperfil_viejo validez Ventana_excentricidad_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal1_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal2_viejo
DINET Ventana_espaciamento_ diagonal1_Callback	Crea_Avisos Paramperfil Selectboton Verifexc dibReprnudo	Adiagonal_viejo Mperfil_viejo nudo solape Tperfil_viejo validez Ventana_excentricidad_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal1_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal2_viejo
DINET Ventana_espaciamento_ diagonal2_Callback	Crea_Avisos Paramperfil Selectboton Verifexc dibReprnudo	Adiagonal_viejo Mperfil_viejo nudo solape Tperfil_viejo validez Ventana_excentricidad_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal1_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal2_viejo
DINET Pan_diagonal_solapada_ SelectionChangeFcn	Crea_Avisos Selectboton dibReprnudo	diagonal_solapada nudo solape validez
DINET Pop_perfil_cordon_ Callback Pop_perfil_diagonal1_ Callback Pop_perfil_diagonal2_ Callback Pop_perfil_montante_ Callback	Crea_Avisos Datoexcen dibReprnudo Paramperfil Ratio_esfuerzos Tabla_esfuerzos Selectboton Verifexc	Adiagonal_viejo bp.denom Esfuerzos Mperfil_viejo nudo Tperfil_viejo validez Ventana_excentricidad_viejo

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
DINET Pop_material_cordon_ Callback Pop_material_diagonal1_ Callback Pop_material_diagonal2_ Callback Pop_material_montante_ Callback	Crea_Avisos Paramperfil Ratio_esfuerzos Tabla_esfuerzos Selectboton	bm.denom Esfuerzos Mperfil_viejo validez
DINET Pan_rotacion_cordon_ SelectionChangeFcn Pan_rotacion_diagonal1_ SelectionChangeFcn Pan_rotacion_diagonal2_ SelectionChangeFcn Pan_rotacion_montante_ SelectionChangeFcn	Crea_Avisos Datosexcen dibReprnudo Paramperfil Ratio_esfuerzos Tabla_esfuerzos Selectboton Verifexc	Adiagonal_viejo aperfil Esfuerzos Mperfil_viejo nudo validez Ventana_excentricidad_viejo
DINET Ventana_longitud_ cordon_Callback Ventana_longitud_ diagonal1_Callback Ventana_longitud_ diagonal2_Callback Ventana_longitud_ montante_Callback	Crea_Avisos Selectboton	Lperfil_viejo validez
DINET Boton_perfil_ cordon_Callback Boton_perfil_ diagonal1_Callback Boton_perfil_ diagonal2_Callback Boton_perfil_ montante_Callback	Descr_perfil	aperfil bp posicion Tperfil_viejo
DINET Pop_acabado_Callback	Crea_Avisos Selectboton	acabado validez
DINET Ventana_angulo_ diagonal1_Callback Ventana_angulo_ diagonal2_Callback	Crea_Avisos Datosexcen dibReprnudo Paramperfil Selectboton Verifexc	Adiagonal_viejo nudo validez Ventana_excentricidad_viejo

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
DINET Ventana_gammaM2_ Callback	Crea_Avisos Selectboton	validez Ventana_gammaM2_viejo
DINET Ventana_gammaM5_ Callback	Crea_Avisos Selectboton	validez Ventana_gammaM5_viejo
DINET Ventana_soldadura_ Callback	Crea_Avisos Selectboton	validez Ventana_soldadura_min Ventana_soldadura_viejo
DINET Tabla_esfuerzos_ CellEditCallback	Crea_Avisos Selectboton	Esfuerzos Mperfil_viejo validez
DINET Boton_validez_ general_Callback	Crea_Avisos Paramperfil Selectboton	Adiagonal_viejo Esfuerzos Mperfil_viejo nudo validez
DINET Boton_validez_ nudo_Callback	Crea_Avisos CreaTR CreaTVG Garg_sin_solape Paramperfil Selectboton V_gb V_grKe V_grT VerifNRd VerifVgb	Beta Gamma NRd nudo ParamG solape T Tratio validez Ventana_soldadura_viejo
DINET Boton_informe_Callback	Crea_Avisos Crea_Informe	
Crea_Avisos		Avisos.contenido Avisos.indice

132 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
Crea_Informe		ac.denom acabado Adiagonal_viejo aperfil Beta bm.character bm.denom bp.character bp.denom Esfuerzos Gamma Lperfil_viejo Mperfil_viejo NRd nudo ParamG solape T Tperfil_viejo Tratio Ventana_espaciamento_ diagonal1_viejo Ventana_espaciamento_ diagonal2_viejo Ventana_excentricidad_viejo Ventana_gammaM2_viejo Ventana_gammaM5_viejo Ventana_soldadura_viejo
CreaTR		
CreaTVG		
Creditos		
Datosexcen		
Datosnudo		aperfil
Descr_perfil Descr_perfil_OpeningFcn		bp.character bp.denom
dibReprnudo	Crea_Avisos espaciamento Paramperfil	Adiagonal_viejo nudo solape diagonal_solapada Ventana_excentricidad_viejo
dibTiponudo		nudo
espaciamento		
excentricidad		
Garg_sin_solape		

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
iniDINET	Datosexcen Datosnudo Paramperfil Ratio_esfuerzos Tabla_esfuerzos Selectnudo Verifexc	ac.denom acabado Adiagonal_viejo aperfil Avisos.contenido Avisos.indice bm.caract bm.denom bp.caract bp.denom diagonal_solapada GammaM0 GammaM2 GammaM5 Esfuerzos lperfil_viejo MElastico Mperfil_viejo nudo solape Tperfil_viejo Ventana_soldadura_viejo Ventana_espaciamiento_ diagonal1_viejo Ventana_espaciamiento_ diagonal2_viejo Ventana_excentricidad_viejo
Paramperfil		aperfil bp.caract bm.caract nudo
Ratio_esfuerzos		aperfil bp.caract bm.caract GammaM0 nudo Tperfil_viejo
Selectboton		validez
Selectnudo		nudo
Tabla_esfuerzos		nudo

PROGRAMA	FUNCIONES VINCULADAS	MIEMBROS handles.PFC VINCULADOS
V_ga	Crea_Avisos Datosexcen Paramperfil Verifexc	Adiagonal_viejo aperfil bp.caract lperfil_viejo Mperfil_viejo nudo Tperfil_viejo
V_gb	Paramperfil V_gbKe V_gbT	Esfuerzos nudo solape
V_gbKe		
V_gbT		
V_grKe	espaciamiento	Adiagonal_viejo aperfil bm.caract bp.caract Mperfil_viejo nudo Tperfil_viejo Ventana_gammaM2_viejo Ventana_gammaM5_viejo Ventana_excentricidad_viejo
V_grT	espaciamiento	acabado Adiagonal_viejo aperfil bm.caract bp.caract MElastico Mperfil_viejo Tperfil_viejo Ventana_gammaM2_viejo Ventana_gammaM5_viejo
Verifexc	espaciamiento excentricidad	
VerifNRd		Adiagonal_viejo nudo solape
VerifVgb		nudo solape

Capítulo 5

Validación de los resultados de DINET

5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez realizada la programación de DINET y tras haber comprobado que su uso no produce errores, es necesario realizar una validación de los resultados obtenidos, con el fin de verificar que los cálculos realizados por el programa se corresponden con los valores esperados. Para realizar esta validación, en el capítulo 3 se realizó el cálculo manual de 2 tipos de nudo en K de una estructura propuesta por el ICT (Instituto para la Construcción Tubular) como caso resuelto, en el documento técnico: “Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero”. Además, con el fin de asegurar su validez, en dicho capítulo se realizó una comparación con los resultados obtenidos por el programa CIDJOINT, distribuido por el propio CIDECT (Comité Internacional para el Desarrollo y Estudio de la Construcción Tubular). Tras esta validación previa, se han tomado los resultados obtenidos en el capítulo 3 como resultados de referencia para la validación del programa.

No obstante, teniendo en cuenta que se disponía de la posibilidad de poder acceder a otros programas comerciales, como el Autodesk® Robot™ y el CoP2 VM, se ha decidido realizar los mismos cálculos en dichos programas con el fin de mostrar en este capítulo las posibles diferencias, tanto en resultados, como en el uso de los programas.

El programa Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional, está desarrollado por la compañía Autodesk, Inc. dedicada al software de diseño en 2D y 3D para las industrias de manufacturas, infraestructuras, construcción, medios y entretenimiento y datos transmitidos vía inalámbrica. Su sede actual se encuentra en San Rafael de California (EE.UU.). Esta compañía es mundialmente conocida por el programa de diseño gráfico Autocad®. Robot es un software que proporciona, a los ingenieros de estructuras, herramientas para la simulación avanzada de edificios, así como capacidad de análisis de estructuras de gran tamaño y complejidad. El software está especialmente diseñado para trabajar de forma fluida, permitiendo a los ingenieros realizar las simulaciones y análisis de forma rápida. La versión utilizada para esta comparativa es la edición 2011. El programa dispone de una serie de pantallas, por las que se va definiendo la estructura, adaptándose el entorno en cada fase que se inicia. Además, como elementos extra para la comprobación de

estructuras, dispone de la opción dentro del dimensionamiento del acero, de poder realizar la comprobación de nudos. El entorno de nudos dispone a su vez de distintas configuraciones de barras y elementos estructuras, siendo la denominación de una de ellas: “nudo de celosía de tubos”, que utiliza la norma EN 1993-1-8:2005/AC:2009, como base para el cálculo, que corresponde a la versión del Eurocódigo 3 que está sirviendo de base a este proyecto.

El programa CoP2 VM, está desarrollado por un gabinete de ingeniería de Alemania denominado: Feldmann + Weynand GMBH, situado en Aachen. Además cuenta con la ayuda de la Universidad de Lieja en Bélgica, y en concreto del departamento ArGEnCO de la Facultad de Ciencias Aplicadas. Dicho departamento se dedica a los campos de la Arquitectura, Geología e Ingeniería Civil y Medioambiental. Por último, también cuenta con el apoyo de Vallourec&Mannesmann Tubes y ArcelorMittal Global R&D, fabricantes ambos de perfiles tubulares de acero. El programa utilizado es la versión 1.5.7, editada el 2013. El programa es exclusivamente para la comprobación de nudos de estructuras metálicas de acero. Dispone de varias ventanas, y en la ventana “General”, dispone de la opción de seleccionar el tipo de unión, permitiendo para tubos huecos las siguientes opciones:

- Nudo en T/Y plano
- Nudo en X plano
- Nudo en K/N plano

Esta última opción será la escogida para realizar la comprobación.

5.2 EJECUCIÓN DE LOS PROGRAMAS

5.2.1 Datos de entrada

De acuerdo a lo indicado en el capítulo 3, se han utilizado los siguientes datos de entrada para los 3 programas analizados:

- NUDO 2:
 - Tipo de Nudo: K
 - Perfil Cordón: RHS 200x150x8 – posición máxima inercia
 - Perfil Diagonal 1: SHS 100x100x4
 - Perfil Diagonal 2: SHS 100x100x4
 - Material Cordón: S355 J2H
 - Material Diagonal 1: S275 J0H
 - Material Diagonal 2: S275 J0H
 - Excentricidad: 0,45 mm
 - Espesor garganta: 5 mm
 - Esfuerzos Cordón 1: 166,75 kN (compresión)
 - Esfuerzo Cordón 2: 464,13 kN (compresión)
 - Esfuerzo Diagonal 1: 258,34 kN (compresión)
 - Esfuerzo Diagonal 2: -176,37 kN (tracción)

- NUDO 11:
 - Tipo de Nudo: K
 - Perfil Cordón: SHS 120x120x8
 - Perfil Diagonal 1: SHS 100x100x4
 - Perfil Diagonal 2: SHS 100x100x4
 - Material Cordón: S355 J2H
 - Material Diagonal 1: S275 J0H
 - Material Diagonal 2: S275 J0H
 - Excentricidad: 22,33 mm
 - Espesor garganta: 5 mm
 - Esfuerzos Cordón 1: -313,46 kN (tracción)
 - Esfuerzo Cordón 2: 61,05 kN (compresión)
 - Esfuerzo Diagonal 1: 258,34 kN (compresión)
 - Esfuerzo Diagonal 2: -258,74 kN (tracción)

5.2.2 Ejecución de Robot

Una vez iniciado el programa y seleccionado la ventana para la comprobación de nudos, se selecciona el tipo de nudo correspondiente a nudos de celosía de tubos. El programa permite la configuración para el idioma español.

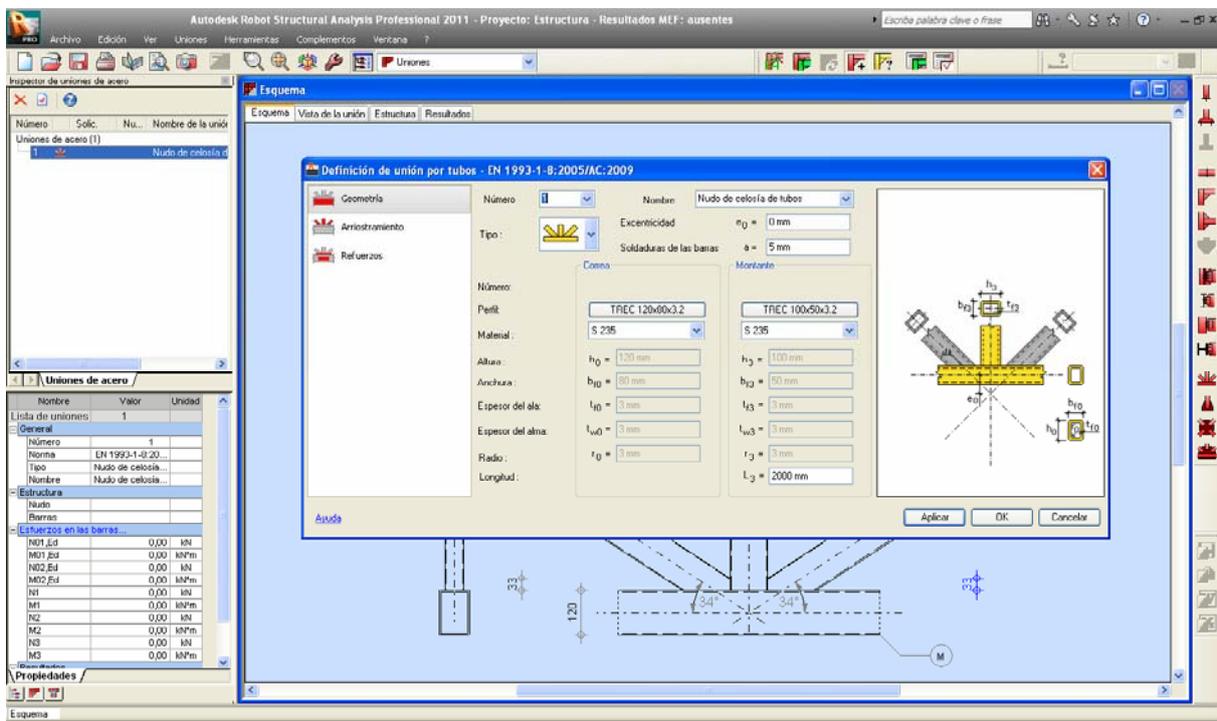


Figura 5-1 - Ventana inicial de Robot para nudos de celosía de tubos

En la ventana central se introducen los datos a través de un menú de 3 opciones situadas a la derecha:

- Geometría
- Arriostramiento
- Refuerzos

En la ventana de geometría seleccionamos el tipo de nudo, los valores de excentricidad y de la garganta del cordón de soldadura y características de los perfiles del cordón y del montante (en caso de existir). Los perfiles se han seleccionado de la base de datos existente en el programa sobre perfiles franceses. El programa mantiene una base de datos de la sesión actual, con el fin de localizar los perfiles más habituales.

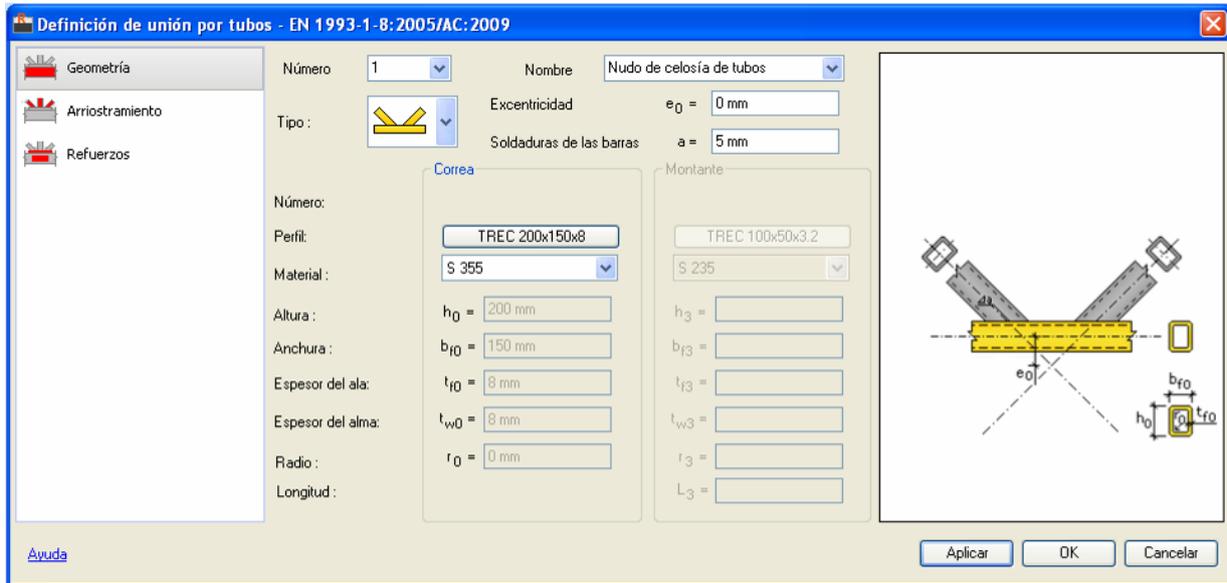


Figura 5-2 - Robot: Geometría del Nudo

Según se introducen los datos, existe un botón en la parte inferior derecha que permite actualizar la representación gráfica real a escala, tapada por la ventana de introducción de datos. Con el fin de controlar el sentido de los valores introducidos, existe una ventana a la izquierda estática, que muestra la situación de las cotas más importantes.

La siguiente ventana corresponde a los arriostramientos. En esta ventana, además de introducir los perfiles seleccionados, con los ángulos con respecto al cordón, también se puede modificar el espaciamiento.

La última ventana de introducción de geometría se refiere a refuerzos, que no han sido contemplados en este ejemplo, por lo que se pulsa el botón OK, visualizando la representación real a escala del nudo:

A continuación se pulsa el icono de cálculos manuales de la unión, apareciendo una pantalla para la introducción de los datos de esfuerzos. El programa contempla la posibilidad de introducir un esfuerzo distinto a cada lado del cordón y tanto esfuerzos axiales como flectores en todas las barras. El signo de los esfuerzos axiales es:

- Tracción: positivo
- Compresión: negativo

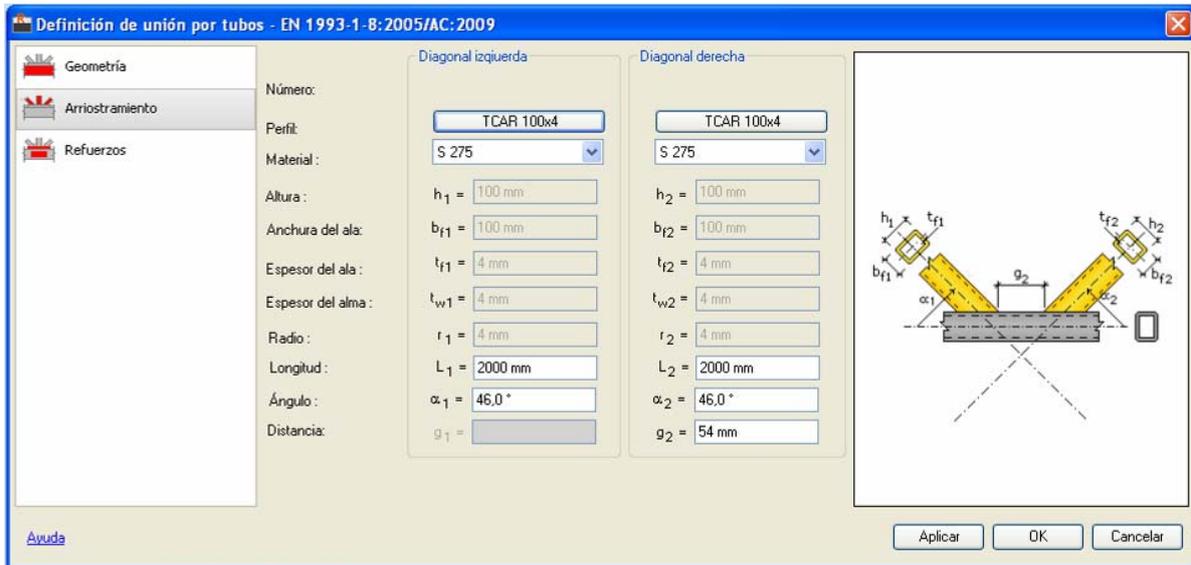


Figura 5-3 - Robot: Ventana arriostramientos

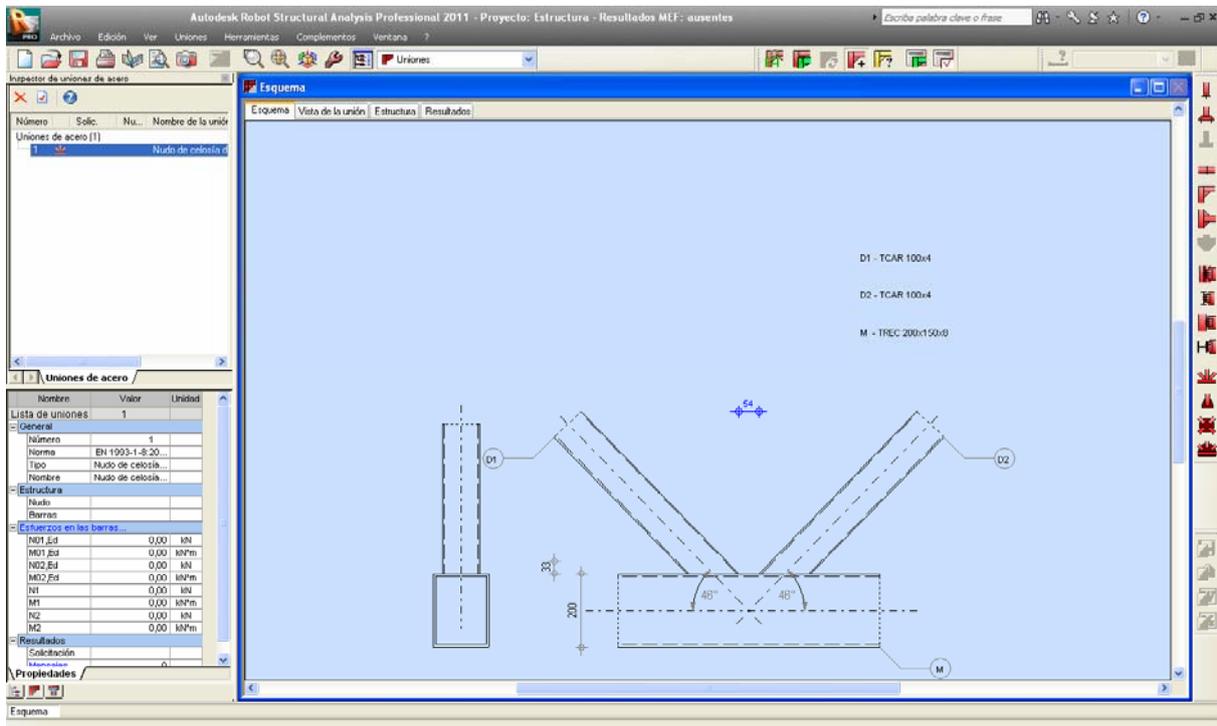


Figura 5-4 - Robot: Vista general del nudo a escala

Verificación manual de la unión

Nudo n.º: 0

Número de la unión: 1

Esfuerzos internos en la unión

Cordón (celosía)

N01.Ed = -464,13 kN M01.Ed = 0,00 kN*m

Q01.Ed = 0,00 kN

N02.Ed = -166,75 kN M02.Ed = 0,00 kN*m

Q02.Ed = 0,00 kN

Diagonal 1

N1 = 176,37 kN M1 = 0,00 kN*m

Diagonal 2

N2 = -258,34 kN M2 = 0,00 kN*m

Poste

N3 = 10,00 kN M3 = 0,00 kN*m

Nota simplificada

Cerrar Calcular

Figura 5-5 - Robot: Introducción de cargas para cálculo manual

La denominación de los perfiles no es la misma que el ejemplo propuesto, por lo que se ha tenido que adaptar.

Al pulsar el botón de calcular, se genera automáticamente el informe con los resultados, que ocupa la ventana de representación gráfica. Hay 3 botones en la esquina inferior izquierda que permiten la edición del informe, o exportarlo a Word o Excel. En el lado derecho debajo de la selección de nudos también existen 4 botones, donde además de exportar, permiten guardar el informe o enviarlo por correo electrónico en formato HTML.

Se han incluido las hojas de resultados como anejos de este proyecto.

5.2.3 Ejecución de CoP2 VM

El programa CoP2 VM, se inicia directamente abriendo una ventana donde introducir los datos del nudo. Además se ofrece la opción a través de iconos de abrir un nudo ya definido anteriormente. El programa está en inglés. La ventana está dividida por la mitad en 2 zonas. La zona de la derecha contiene la ventana gráfica que representa el nudo a tiempo real, a escala. Debajo de dicha ventana gráfica, hay una tabla donde se indican cada uno de los avisos o errores producidos durante la entrada de datos o en los cálculos. La zona de la izquierda contiene 5 pestañas, en inglés, que permiten ir avanzando en el proceso de entrada de datos hasta el cálculo final:

- General
- Members
- Connection
- Loading
- Results

En la pestaña General, se pueden introducir la denominación del nudo, su posición y comentarios adicionales. Un botón permite introducir los datos de proyecto.

El primer paso es seleccionar el tipo de nudo como: “Lattice girder K/N-joint configuration” e introducir el valor de la excentricidad. Una ventana no editable

informa en todo momento el grado de solapamiento o espaciamiento existente. No obstante, como todavía no se han introducido los datos de los perfiles, no es significativo.

Al pulsar en la pestaña Members, aparecen otras 3 pestañas, para introducir cada uno de los datos correspondientes a cada barra. Según la pestaña activa, así el programa resalta en rojo la barra correspondiente en la representación gráfica.

Para la introducción de los perfiles, en primer lugar se selecciona el tipo de tubo a emplear (RHS o SHS). A continuación se dispone de una ventana desplegable con todos los perfiles de la base de datos. Además, permite la opción de visualizar las características del perfil seleccionado pulsando un botón de edición dispuesto al lado de la ventana desplegable. La información que ofrece es únicamente dimensional e informa de los materiales disponibles para las dimensiones seleccionadas. Los perfiles se han ordenado en primer lugar por altura, y en segundo lugar por espesor, terminando de ordenarse en anchura.

La selección del material también se realiza mediante una ventana desplegable, e igualmente se puede acceder a la información del material mediante un icono situado a la derecha de la ventana.

Para completar la introducción de los datos correspondientes a las diagonales, en cada pestaña hay una casilla donde se puede introducir el ángulo entre la diagonal y el cordón.

Además, si el perfil es rectangular, se habilita una casilla de verificación por si el perfil se utiliza con el eje de menor inercia (90°).

En el caso del cordón, además existe una casilla para implementar pletinas de refuerzo, que en este proyecto no se han considerado.

Con cada perfil, se incluye en una ventana inferior un pequeño detalle a escala de la sección real del perfil.

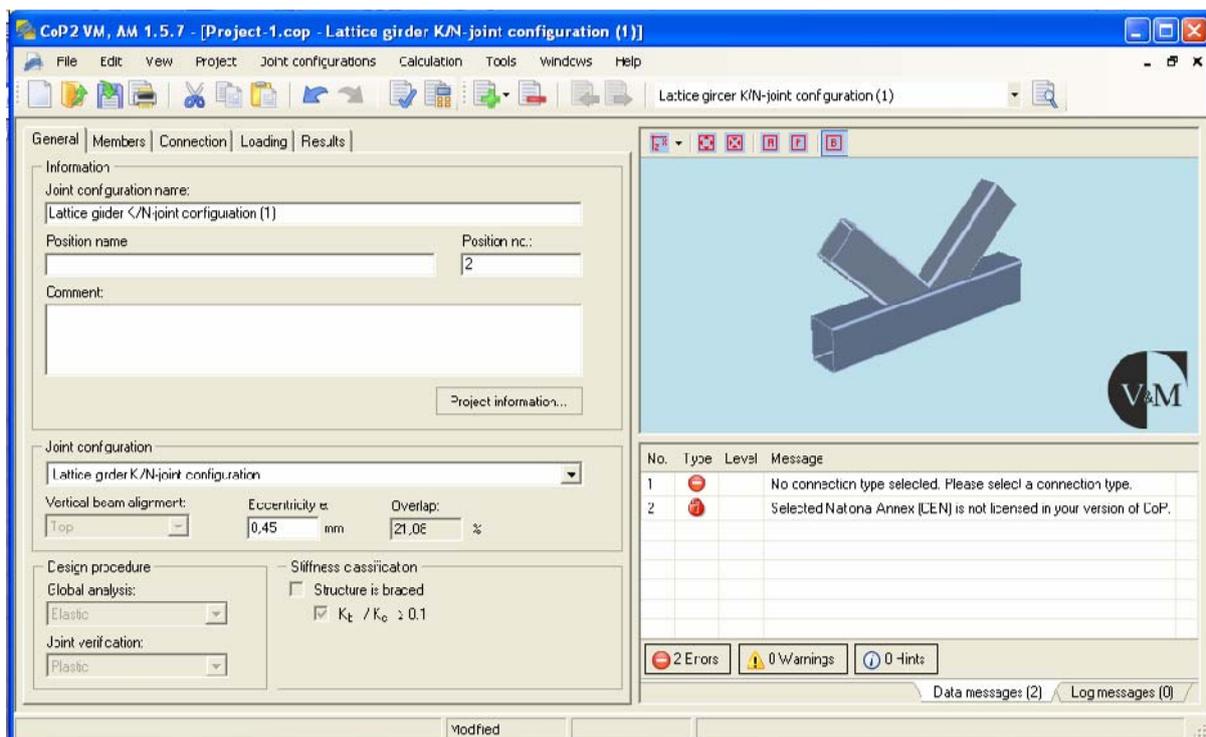


Figura 5-6 - CoP2 VM: Pantalla General

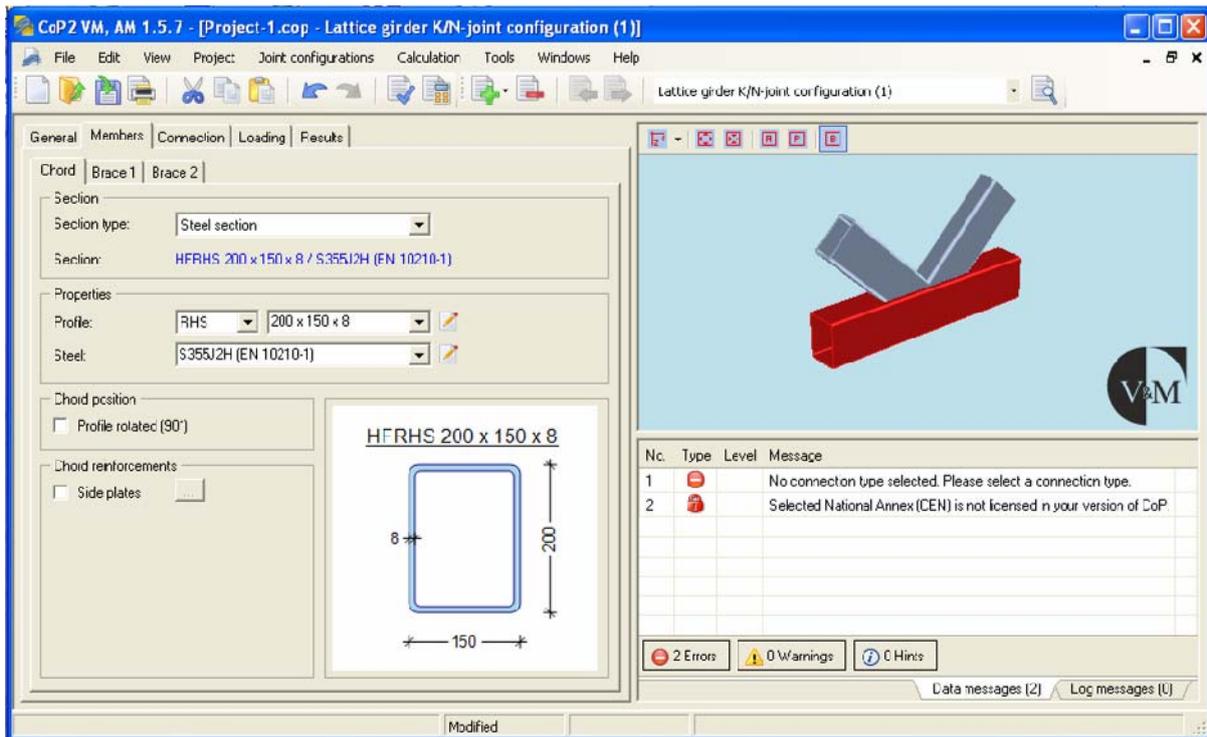


Figura 5-7 - CoP2 VM: Ventana Members - Chord

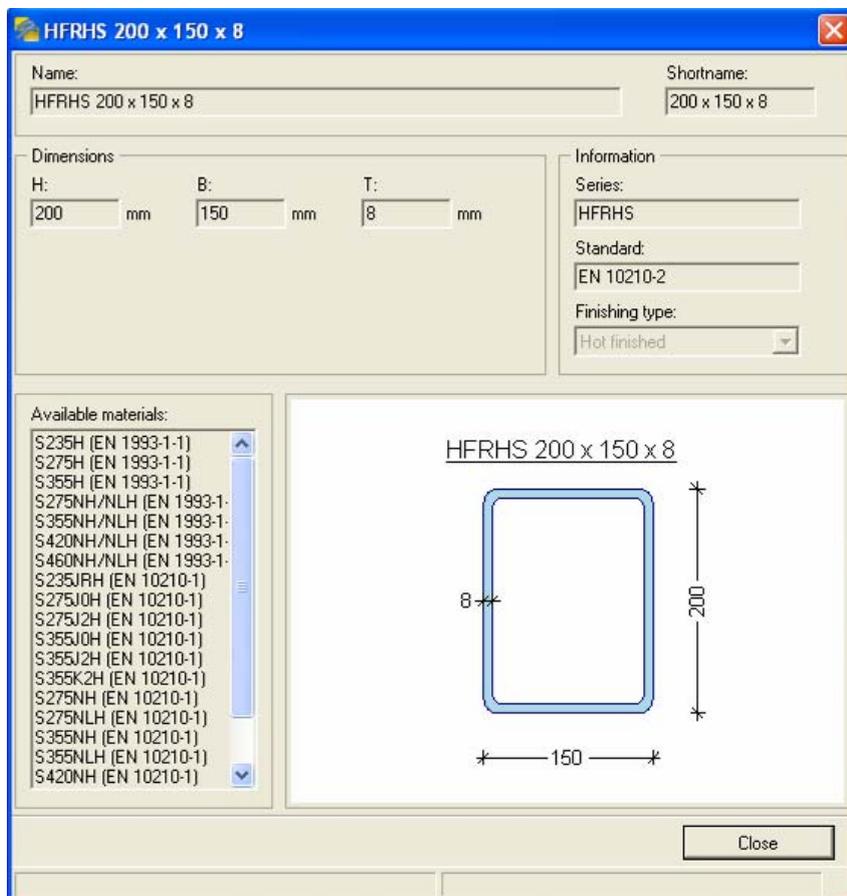


Figura 5-8 - CoP2 VM: Ventana información perfil

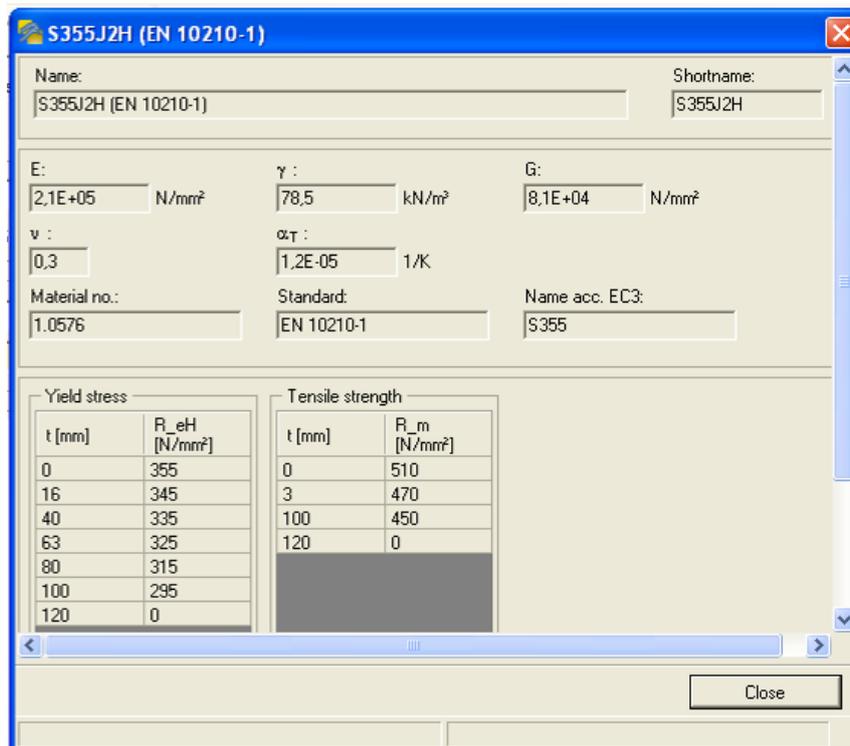


Figura 5-9 - CoP2 VM: Ventana información material

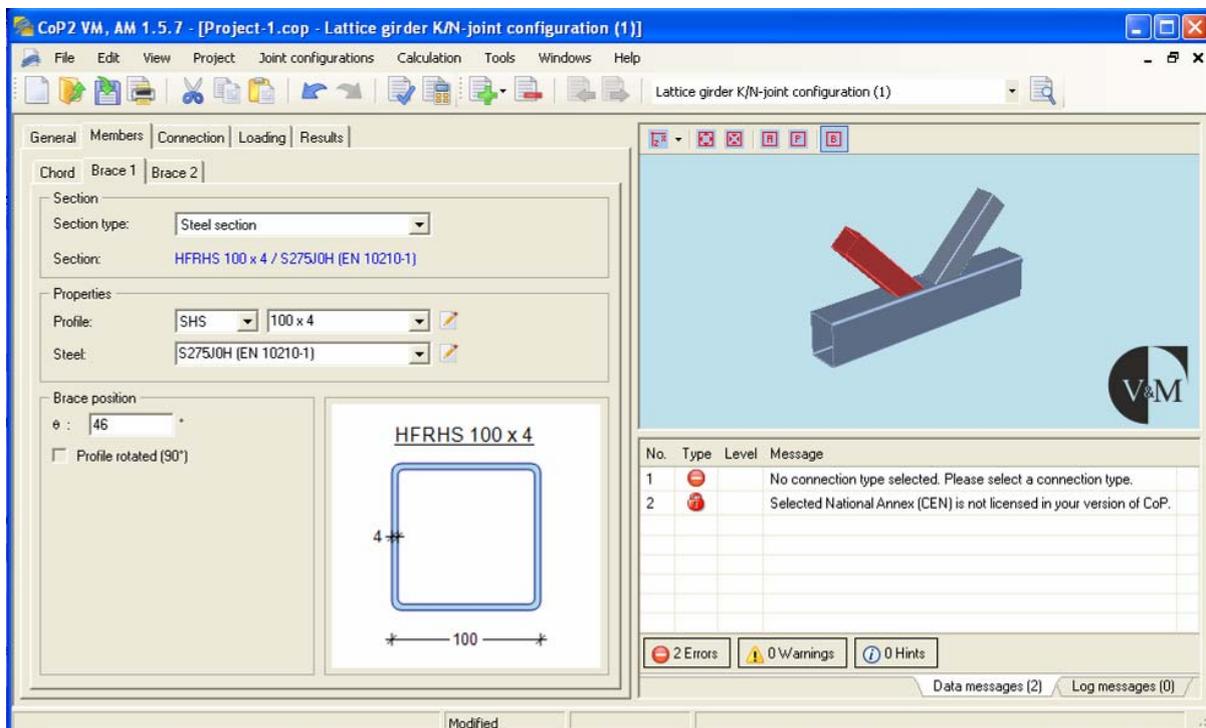


Figura 5-10 - CoP2 VM: Ventana Members – Brace 1

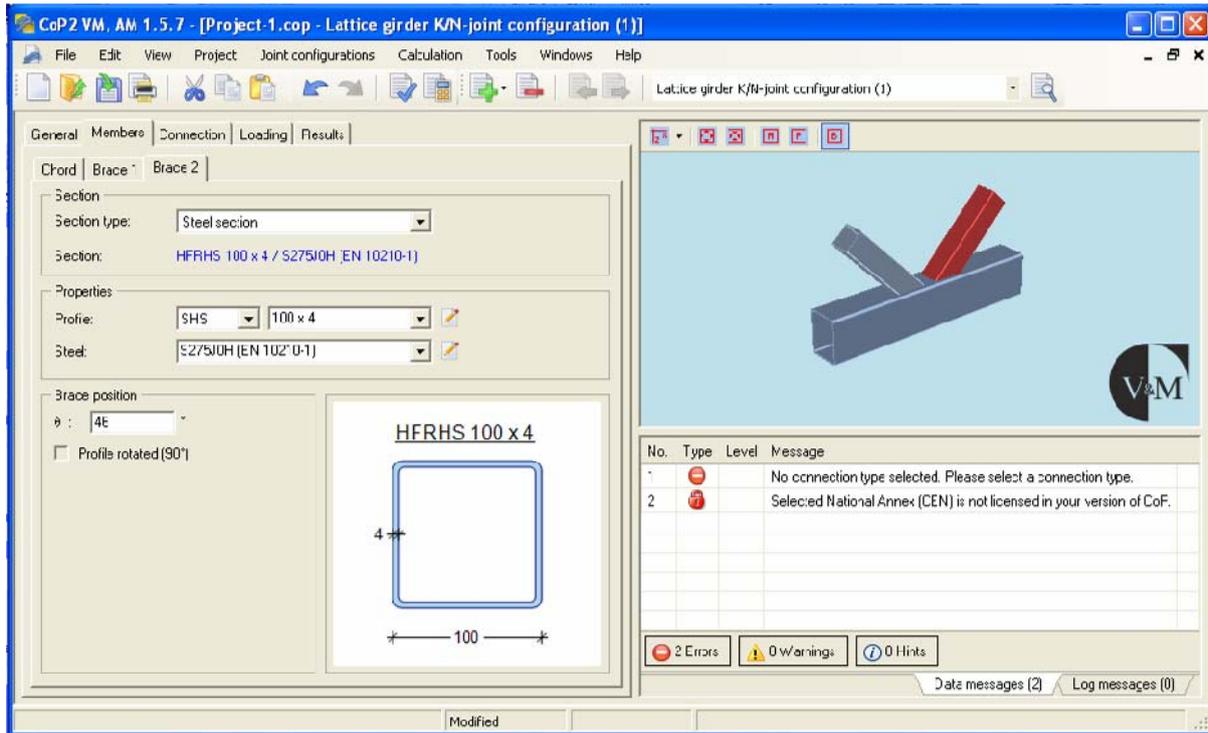


Figura 5-11 - CoP2 VM: Ventana Members – Brace 2

La pestaña Connection permite definir el tipo de unión. En este caso sólo hay una opción: “Welded connection” (nudo soldado), y se abre una ventana editable donde se puede introducir el valor del espesor de la garganta del cordón de soldadura.

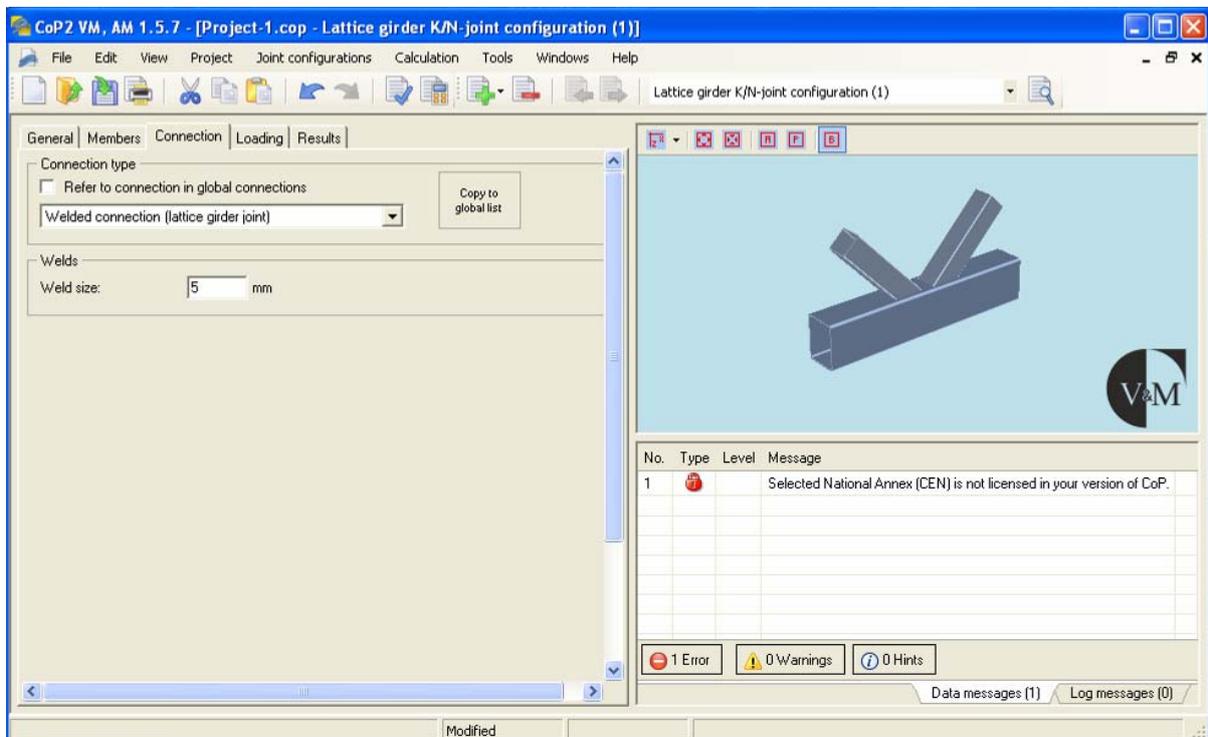


Figura 5-12 - CoP2 VM: Ventana Connection

La pestaña Loading permite introducir los esfuerzos que actúan en cada barra. El programa no contempla la posibilidad de introducir un esfuerzo distinto a cada lado del cordón (por lo que se introducirá el de mayor valor). El signo de los esfuerzos axiales es:

- Tracción: positivo
- Compresión: negativo

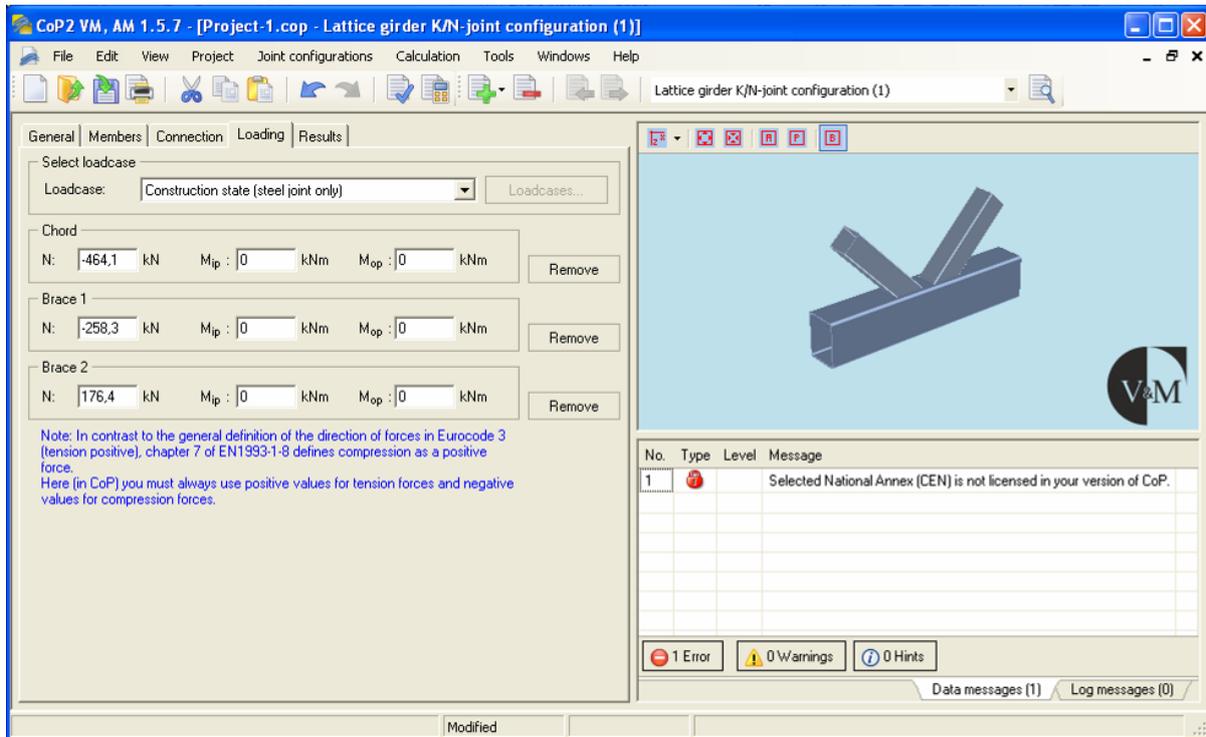


Figura 5-13 - CoP2 VM: Ventana Loading

Por último la ventana Results tiene 4 botones que permiten agilizar la obtención de resultados:

- Check data: realiza la comprobación del cumplimiento general y de las condiciones de validez geométrica.
- Start calculation: realiza el cálculo de las resistencias de cada perfil, mostrándolo en la ventana izquierda los valores mínimos.
- Details: permite visualizar todas las resistencias calculadas.
- Show output: abre una ventana con el informe definitivo.

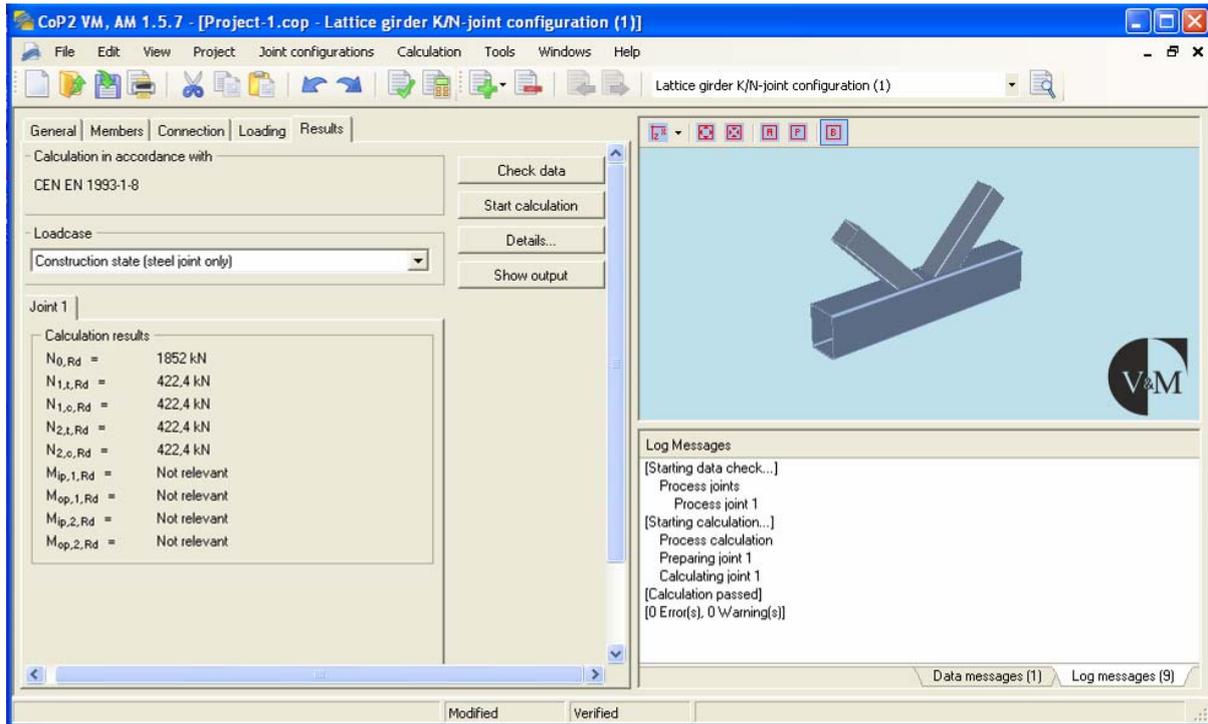


Figura 5-14 - CoP2 VM: Ventana Results

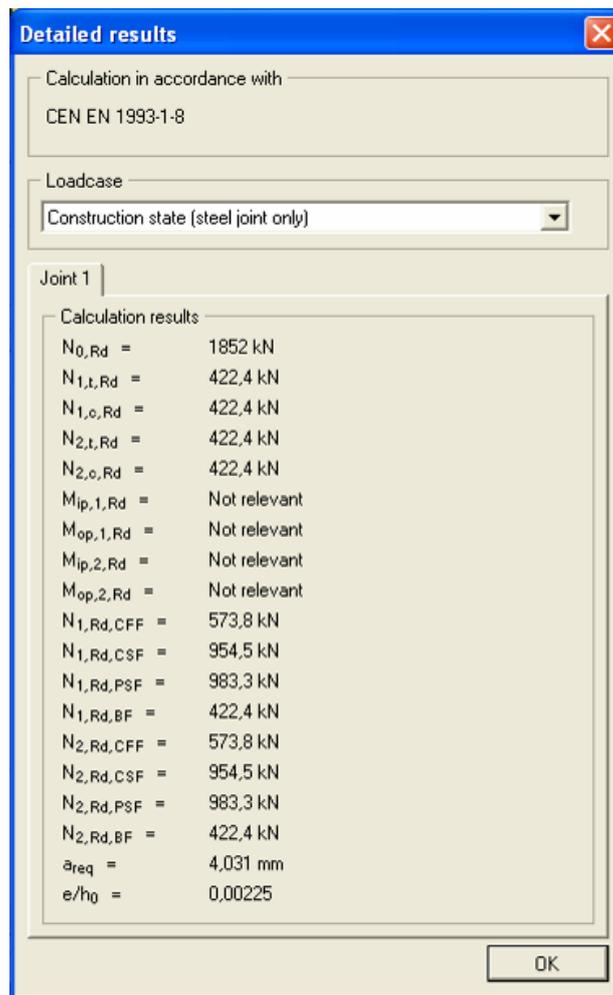


Figura 5-15 - CoP2 VM: Detalle de resultados

El programa genera como informe un archivo PDF, que no puede ser editado. La ventana Output permite elegir la ubicación donde guardarlo o la de imprimirlo. Se han incluido las hojas de resultados como anejos de este proyecto.

5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.3.1 Resultado de los cálculos de resistencias

Una vez ejecutados los 2 programas, se ha realizado una comparación con los resultados obtenidos en DINET y los obtenidos en el capítulo 3 con CIDJOINT para obtener la resistencia a los tipos de fallo del nudo 2, de acuerdo a las fórmulas definidas por el Eurocódigo 3.

Así, se ha elaborado la siguiente tabla donde quedan reflejados dichos resultados:

Tabla 5.1 - Comparación entre resultados obtenidos con los distintos programas para el cálculo de la resistencia a los tipos de fallo del nudo 2

COMPROBACIÓN	CIDJOINT/MANUAL	ROBOT	COP2 VM	DINET
$Beta (\beta)$	0,67	0,67	---	0,67
$Gamma (\gamma)$	---/9,38	9,38	---	9,38
n	-0,26	---	---	0,26
kn	1	1	---	1
A_v	3349,98 mm ²	---	---	3349,98 mm ²
V_{Ed}	185,83 kN	---	---	185,83 kN
$V_{pl,Rd}$	686,61 kN	---	---	686,61 kN
$b_{eff,i}$	100 mm	---	---	100 mm
$b_{ep,i}$	53,33 mm	---	---	53,33 mm
$ N_{0,Ed} $	346,21 kN	464,13 kN 166,75 kN	464,1 kN	346,21 kN
$N_{0,Rd}$	1819,11 kN/1773,22 kN	1766,62 kN	1852 kN	1773,21 kN
$ N_{1,Ed} $	258,34 kN	258,34 kN	258,3 kN	258,34 kN
$N_{1,Rd} (Cp)$	573,80 kN	573,80 kN	573,8 kN	573,80 kN
$N_{1,Rd} (Sh)$	954,50 kN	954,50 kN	954,5 kN	954,50 kN
$N_{1,Rd} (Wd)$	422,40 kN	422,40 kN	422,4 kN	422,40 kN
$N_{1,Rd} (Pu)$	983,26 kN	983,26 kN	983,3 kN	983,26 kN
$ N_{2,Ed} $	176,37 kN	176,37 kN	176,4 kN	176,37 kN
$N_{2,Rd} (Cp)$	573,80 kN	573,80 kN	573,8 kN	573,80 kN
$N_{2,Rd} (Sh)$	954,50 kN	954,50 kN	954,5 kN	954,50 kN
$N_{2,Rd} (Wd)$	422,40 kN	422,40 kN	422,4 kN	422,40 kN
$N_{2,Rd} (Pu)$	983,26 kN	983,26 kN	983,3 kN	983,26 kN
$Ratio Nudo$	0,61	0,61	0,6115	0,61

Nota: se indica con “---“ cuando el programa correspondiente no aportaba dicha información

Tabla 5.2 - Comparación entre resultados obtenidos con los distintos programas para el cálculo de la resistencia a los tipos de fallo del nudo 11

COMPROBACIÓN	CIDJOINT/MANUAL	ROBOT	COP2 VM	DINET
$Beta (\beta)$	0,83	0,83	---	0,83
$Gamma (\gamma)$	---/7,50	7,50	---	7,50
n	-0,05	---	---	0,05
kn	1	1	---	1
A_v	2234,23 mm ²	---	---	2234,23 mm ²
V_{Ed}	186,12 kN	---	---	185,83 kN
$V_{pl,Rd}$	457,93 kN	---	---	457,93 kN
$b_{eff,i}$	100 mm	---	---	100 mm
$b_{ep,i}$	66,67 mm	---	---	66,67 mm
$ N_{0,Ed} $	134,00 kN	313,46 kN 61,05 kN	313,5 kN	134,00 kN
$N_{0,Rd}$	1192,80 kN/ ---	941,81 kN	1179 kN	1124,56 kN
$ N_{1,Ed} $	258,34 kN	258,34 kN	258,34 kN	258,34 kN
$N_{1,Rd} (Cp)$	641,53 kN	641,53 kN	641,5 kN	641,53 kN
$N_{1,Rd} (Sh)$	---	636,59 kN	636,1 kN	636,59 kN
$N_{1,Rd} (Wd)$	---	---	422,4 kN	422,4 kN
$N_{1,Rd} (Pu)$	---	1013,65 kN	1014 kN	1013,65 kN
$ N_{2,Ed} $	258,74 kN	258,74 kN	258,74 kN	258,74 kN
$N_{2,Rd} (Cp)$	641,53 kN	641,53 kN	641,5 kN	641,53 kN
$N_{2,Rd} (Sh)$	---	636,59 kN	636,1 kN	636,59 kN
$N_{2,Rd} (Wd)$	---	---	422,4 kN	422,4 kN
$N_{2,Rd} (Pu)$	---	1013,65 kN	1014 kN	1013,65 kN
<i>Ratio Nudo</i>	0,40	0,41	0,6115	0,61

Nota: se indica con “---“ cuando el programa correspondiente no aportaba dicha información

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, los valores de los parámetros de cálculo y de las resistencias coinciden exactamente, a excepción de la resistencia por cortante en el espaciamiento del cordón. El valor obtenido por DINET coincide en la tabla 1 con el conseguido en el cálculo manual. Como ya se comentó en el capítulo 3, está avalado por organismos internacionales el no tener en cuenta la relación $V_{Ed}/V_{pl,Rd}$, cuando no se supera el 50% de la capacidad plástica a cortante del cordón. Esto podría explicar la variabilidad en el valor entre los programas, suponiendo que cada programa interpreta de diferente forma dicha recomendación. No obstante hay que destacar que en los 2 ejemplos, el valor de la resistencia dada por Robot es inferior al resto. Esto indica que en este aspecto Robot es más conservador y tanto CoP2 como Cidjoint, son menos conservadores que los cálculos manuales y los resultados de DINET. Además, el valor de referencia para comprobar dicho cortante del cordón, varía entre programas. Cidjoint y DINET, de acuerdo a la forma de calcular indicada en la guía del ICT, obtienen el valor de la diferencia entre los esfuerzos en cada extremo del cordón. Por el contrario, Robot utiliza los valores de los extremos directamente, y CoP2 sólo permite introducir el valor en un extremo

(aunque no dice nada el manual, interpreto que el valor a introducir es el mayor de los 2 extremos del cordón).

Otro aspecto a destacar es el criterio de signos de los esfuerzos axiales. Todos los programas a excepción de DINET, mantienen como criterio de signos el establecido por la norma EN 1993-1-1:

- Tracción: positivo
- Compresión: negativo

En el capítulo 7 de la norma EN 1993-1-8, el criterio seguido de signos establecido es el contrario:

- Tracción: negativo
- Compresión: positivo

En la programación de DINET, teniendo en cuenta que utiliza como base la norma de diseño de nudos EN 1993-1-8, se ha optado por seguir su criterio, a pesar de ser distinto al del resto del Eurocódigo, con el fin de no modificar la formulación allí establecida. En caso de que en un futuro se quisiera integrar dicho programa con un programa para el análisis de la estructura, únicamente sería necesario realizar un cambio de signo, sin necesidad de traicionar el espíritu de la norma, que deja claro su criterio en múltiples ocasiones (por lo que evidentemente no se puede interpretar como un error. Más aún considerando que en la versión de la norma EN 1993-1-1-A1:1992, predecesora de la actual EN 1993-1-8:2005, ya aparecía con el mencionado criterio de signos).

Con el cálculo del nudo formado por perfiles SHS en su totalidad, tanto la guía del ICT como Cidjoint, han utilizado la opción simplificada de cálculo, ofrecido por la norma en la tabla 7.10. En dicha tabla, únicamente se exige comprobar la rotura de la cara del cordón. En este caso, Robot llega más allá y calcula todos los tipos de fallo, como en el caso general, excepto el caso de rotura de la diagonal. Por último, tanto CoP2 como DINET, realizan un cálculo completo, según el caso general, sin tener en cuenta esta simplificación. Para aplicar dicha simplificación, la norma obliga a aplicar un criterio más restrictivo de los parámetros geométricos, por lo que se ha optado al programar DINET seguir únicamente el método general, aumentando así las opciones de diseño del nudo, en caso de ser necesario un rediseño. Dicho criterio también es compartido por CoP2. El hecho de no considerar en Robot el fallo por rotura de las diagonales, provoca que los ratios obtenidos sean menos conservadores que los obtenidos por DINET y CoP2.

5.3.2 Resultado de los cálculos de soldaduras

Las soldaduras sólo son comprobadas por el programa Robot. Cidjoint no realiza ningún tipo de comprobación, y CoP2 VM realiza una comprobación general de todas las soldaduras, proponiendo un espesor mínimo de garganta del cordón de soldadura, en base a la siguiente fórmula:

$$a_{req} = \sqrt{2} \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot \beta_w \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot t_i \quad (5.1)$$

Como esta fórmula no está avalada por la formulación existente en la norma EN 1993-1-8, se descarta para esta comparativa.

Teniendo esto en cuenta, se van a comparar los resultados de DINET, únicamente con Robot. Para ello se va a mostrar los resultados de todos los cordones en el cálculo de las tensiones normales y tangenciales a la garganta del cordón.

Tabla 5.3 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Transversal 1

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	42,23	99,49	0	177,43	295,20	385,88
Robot	2,46	59,72	0	103,46	328	397,58

Tabla 5.4 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura de 1 nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Transversal 2

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	99,49	42,23	0	123,49	295,20	385,88
Robot	59,72	2,46	0	59,87	328	397,58

Tabla 5.5 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 1 – Cordón Longitudinal

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	54,98	54,98	75,08	170,30	295,20	385,88
Robot	54,98	54,98	75,08	170,30	328	397,58

Tabla 5.6 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Transversal 1

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	28,83	67,92	0	121,13	295,20	385,88
Robot	1,68	40,77	0	70,63	328	397,58

Tabla 5.7 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Transversal 2

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	67,92	28,83	0	84,31	295,20	385,88
Robot	40,77	1,68	0	40,87	328	397,58

Tabla 5.8 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 2 - diagonal 2 – Cordón Longitudinal

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	37,53	37,53	51,26	116,26	295,20	385,88
Robot	37,53	37,53	51,26	116,26	328	397,58

Tabla 5.9 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Transversal 1

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	42,23	99,49	0	177,43	295,20	385,88
Robot	2,46	59,72	0	103,46	328	397,58

Tabla 5.10 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura de 1 nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Transversal 2

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	99,49	42,23	0	123,49	295,20	385,88
Robot	59,72	2,46	0	59,87	328	397,58

Tabla 5.11 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 1 – Cordón Longitudinal

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	54,98	54,98	75,08	170,30	295,20	385,88
Robot	54,98	54,98	75,08	170,30	328	397,58

Tabla 5.12 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Transversal 1

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	42,30	99,65	0	177,70	295,20	385,88
Robot	2,46	59,81	0	103,62	328	397,58

Tabla 5.13 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Transversal 2

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	99,65	42,30	0	123,68	295,20	385,88
Robot	59,81	2,46	0	59,96	328	397,58

Tabla 5.14 - Comparativa entre los resultados de DINET y Robot para los cordones de soldadura del nudo 11 - diagonal 2 – Cordón Longitudinal

Programa	$ \sigma_1 $ (MPa)	$ \tau_1 $ (MPa)	$ \tau_2 $ (MPa)	$ \sigma_{co} $ (MPa)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$\sigma_{co,max}$ (MPa)
DINET	55,06	55,06	75,20	170,56	295,20	385,88
Robot	55,06	55,06	75,20	170,56	328	397,58

Los ratios obtenidos para ambos programas son:

Tabla 5.15 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 2 – Diagonal 1

Programa	Transversal 1		Transversal 2		Longitudinal	
	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$
DINET	0,14	0,46	0,34	0,32	0,19	0,44
Robot	0,01	0,26	0,18	0,15	0,17	0,43

Tabla 5.16 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 2 – Diagonal 2

Programa	Transversal 1		Transversal 2		Longitudinal	
	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$
DINET	0,10	0,31	0,23	0,22	0,13	0,30
Robot	0,01	0,18	0,12	0,10	0,11	0,29

Tabla 5.17 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 11 – Diagonal 1

Programa	Transversal 1		Transversal 2		Longitudinal	
	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$
DINET	0,14	0,46	0,34	0,32	0,19	0,44
Robot	0,01	0,26	0,18	0,15	0,17	0,43

Tabla 5.18 – Ratios obtenidos tras el cálculo de las soldaduras en el nudo 11 – Diagonal 2

Programa	Transversal 1		Transversal 2		Longitudinal	
	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{co,max}$
DINET	0,14	0,46	0,34	0,32	0,19	0,44
Robot	0,01	0,26	0,18	0,15	0,17	0,43

Con respecto al cálculo de las soldaduras, hay 2 aspectos fundamentales a considerar:

- Cálculo de las tensiones: Se ha comprobado que las tensiones obtenidas mediante Robot para los cordones transversales no coinciden con las tensiones obtenidas en DINET. Dichos cordones tienen el inconveniente de tener un ángulo de garganta de cordón distinto de 45°, al no estar las diagonales a 90° con el cordón. Las fórmulas empleadas para el cálculo de dichas tensiones se han expuesto en el capítulo 2 de este proyecto. Las fórmulas empleadas para el cálculo de las soldaduras por parte de Robot no se han podido conseguir, por lo que no se ha conseguido determinar las razones que provocan dicha divergencia. Para los cordones longitudinales, que siempre tienen la garganta a 45°, los valores calculados por DINET y

por Robot coinciden, por lo que, teniendo en cuenta que la formulación es la misma que en los cordones transversales, no se comprende las diferencias detectadas.

- Cálculo de las tensiones máximas (resistencias): las tensiones máximas calculadas con DINET, no coinciden con las calculadas por Robot. En este caso, como Robot muestra la formulación empleada, se ha podido comprobar que el origen de dicha diferencia es que Robot utiliza, para realizar los cálculos, las fórmulas de la versión anterior de la norma EN 1993-1-8:2005, que es la ENV 1993-1-1:1992. Evidentemente, esta formulación no es válida, y entendemos que será corregida en próximas versiones del programa.

5.3.3 Diferencias entre la formulación para el cálculo de soldaduras de la norma

ENV 1993-1-1:1992 y la norma EN 1993-1-8:2005

Con el fin de completar la información aportada en el anterior apartado sobre las diferencias entre la norma ENV 1993-1-1:1992 (anexo M) y la norma EN 1993-1-8:2005, se va a realizar a continuación una breve descripción de dichas diferencias.

En primer lugar, hay una diferencia entre las fórmulas utilizadas en cada uno de los años, para el cálculo de la tensión normal máxima ($\sigma_{1,max}$). Así, en la norma del año 1992, la fórmula utilizada es:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \quad (5.2)$$

mientras que en la formulación del 2005, la condición se expresa como:

$$\sigma_1 \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.3)$$

El valor de $\gamma_{Mw} = \gamma_{M2}$, por lo que la única diferencia es el coeficiente que antecede a la fórmula (0,9) y que hace que la correspondiente a la versión actual del 2005 sea más conservadora.

La otra fórmula es la misma en ambas versiones:

$$\sigma_{co} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (5.4)$$

En este caso, el coeficiente de correlación β_w aportado por Robot, debería corresponderse con el que aparece en la tabla 4.1 de la norma EN 1993-1-8:2005 (según indica en su informe). No obstante, no coincide, teniendo un valor de 0,82, cuando en la norma se indica que para un tipo de acero S275 J0H debe considerarse un coeficiente 0,85. Por consiguiente, al igual que sucedía con el cálculo de la resistencia correspondiente a la tensión normal, los valores aportados por la norma

son más conservadores que los calculados por Robot, y por lo tanto en ambos casos, no cumple con la norma EN 1993-1-8:2005.

5.4 CONCLUSIONES

Tras las pruebas realizadas con los programas Cidjoint, Robot y CoP2 VM, y los cálculos manuales incluidos en el capítulo 3, se pueden dar por válidos los cálculos realizados por el programa DINET, a excepción del cálculo de las tensiones de las soldaduras realizado en los cordones transversales, que no ha quedado completamente confirmada su validez por comparación con otros programas, aunque se haya utilizado la formulación existente en la documentación de referencia. Además, como se ha visto, los resultados en el cálculo de las resistencias de DINET son en general más conservadores que los obtenidos por el resto de programas, al no aplicar las simplificaciones que han utilizado los demás o al utilizar normativa más actualizada que la utilizada en el caso de las soldaduras con Robot.

Con respecto al uso del programa, DINET aporta con respecto al resto de programas analizados varias ventajas a resaltar, que formaban parte del reto asumido al inicio de la elaboración de este proyecto. Entre ellas están:

- Todo el programa e introducción de datos se realiza sobre una única ventana, facilitando las labores de edición en caso de rediseño del nudo por incumplimiento de las condiciones exigidas por el Eurocódigo 3 (ningún otro programa lo aporta). Para ello se ha tenido en cuenta que la pantalla tiene que tener como mínimo una resolución de 1280x720 pixels, que son valores bastante habituales en pantallas panorámicas a partir de 17". Se ha tratado así de crear un programa que aprovecha las posibilidades tecnológicas actuales. Como inconveniente es que el resto de programas proporcionan mayor importancia a la representación gráfica del nudo.
- Con respecto a la vista, indicar que Robot no permite visualizar el estado actual del nudo, de forma automática, sino que obliga a pulsar el botón aplicar. Además, la vista se encuentra oculta por el panel de introducción de datos, por lo que complica su interpretación. No obstante, el tamaño de la representación es un punto a favor de Robot. Con respecto a CoP2, el programa proporciona una representación gráfica en 3D que es difícilmente superable, con actualización automática. Es una buena referencia para futuras ediciones de DINET, aunque se echan de menos un par de vistas cartesianas que permitan tener controlado en todo momento la geometría del nudo, sin perspectivas. CoP2 te las muestra pero de una en una.
- La introducción de perfiles se puede realizar de forma rápida, sin necesidad de realizar una selección previa. Robot obliga a preseleccionar los perfiles, aunque se pueden seleccionar todos. CoP2 es similar a DINET, pero clasifica los perfiles dando prioridad a ordenarlos por espesor en lugar de por altura, lo que dificulta localizar perfiles de similares dimensiones a los existentes pero que necesitamos de más espesor para cumplir con alguna condición.
- El espaciamiento y la excentricidad en Robot no están en la misma ventana, por lo que no permite el programa ver a la vez como afectan los valores introducidos uno respecto al otro. CoP2 no permite introducir el espaciamiento, y la única manera de conseguirlo es tanteando con la

excentricidad. DINET, al disponer de ambos valores editables y en el mismo panel, facilita la introducción de dichos datos, tanto en análisis como en diseño.

- El idioma de CoP2 es en inglés, y no permite en español en la edición actual. Tanto Robot como DINET trabajan en español.
- La base de datos de perfiles no es editable en CoP2, y sólo contiene los perfiles acabados en caliente según la norma EN 10210. Robot posee muchas librerías, pero están en formato XML, por lo que no se permite su edición. DINET se ha preparado para que pueda servir de base de datos cualquier archivo TXT, que tenga la misma estructura que los 2 que existen de referencia. Además, añadir perfiles es tan sencillo como añadir una línea nueva y completar los datos. Este formato permite poder importar las características de los perfiles desde cualquier plataforma entregada por los fabricantes.
- DINET ofrece la posibilidad de comprobar todas las características mecánicas del perfil seleccionado para cada barra, lo cual proporciona una ayuda para el rediseño de la unión. CoP2 no ofrece esa posibilidad, y Robot sí, pero seleccionando en el menú general el catálogo de perfiles y buscando en el listado completo el perfil en cuestión.
- CoP2 no ha contemplado las longitudes de las barras, en las ventanas de introducción de datos, y son valores muy importantes, ya que la formulación que ofrece la norma EN 1993-1-8 está basada en el cumplimiento de las condiciones generales que afectan también a la configuración de la celosía a la que pertenece el nudo. Robot si lo ha tenido en cuenta, al igual que DINET.
- CoP2 no permite introducir los valores de esfuerzo a cada lado del cordón, con lo cual no se pueden realizar los cálculos de tensiones en el espaciamiento de acuerdo a lo indicado por la norma. Robot y DINET si lo permiten.
- DINET aporta a la introducción de los esfuerzos y momentos un parámetro de ratio de resistencia estática de los perfiles activos que no incluyen ni CoP2 ni Robot. Dicho ratio es muy útil para el rediseño del nudo, ya que ofrece una orientación de cómo afecta el cambio de perfil a la respuesta estática de la estructura en esa barra y por lo tanto, anticipa de forma aproximada los resultados que se pueden esperar cuando, tras el rediseño, se tenga que volver a calcular la estructura completa.
- Por último, resaltar que CoP2 entrega como informe un documento PDF que no permite la edición, mientras que tanto DINET como Robot, sí permiten la edición antes de grabarlo o imprimirlo.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez explicados todos los aspectos estudiados en este proyecto, se resumen en este capítulo de una forma breve los trabajos realizados, las conclusiones más importantes que se han obtenido y se proponen las posibles líneas de trabajo que este proyecto ha dejado abiertas.

6.2 TRABAJOS REALIZADOS

Tras la revisión exhaustiva de la documentación proporcionada por el CIDECT sobre el análisis y cálculo del comportamiento de los nudos en estructuras tubulares, y de la norma EN 1993-1-8:2005 (que basa su contenido en los resultados de CIDECT), en este proyecto se ha desarrollado la formulación para el cálculo de todas las posibles variantes de los nudos de las estructuras tubulares realizadas mediante perfiles RHS y SHS.

A continuación se realizó el desarrollo completo del cálculo, de forma manual de una estructura tubular formada por perfiles RHS y SHS, con el fin de afianzar los conocimientos adquiridos y generar un modelo de comparación que me permitiera validar los resultados que obtuviera en el resto del proyecto.

La comprobación de la resistencia de los nudos, implica una serie de cálculos y comprobaciones preliminares que se han implementado como herramienta de ayuda al proyectista en un programa de MATLAB, aprovechando las facilidades que proporciona para la creación de GUI. No obstante, el programa no desarrolla todas las opciones incluidas en la formulación, por ser un trabajo similar entre los distintos tipos de nudo. Así, el objetivo primordial era desarrollar los tipos de nudo y configuraciones de acuerdo a los nudos típicos de las estructuras tipo Warren, Pratt o Fink, y en concreto, de aquellas en las que las diagonales se sueldan a los cordones sin solapamientos. Particularmente, la estructura utilizada como referencia en el proyecto es una estructura tipo Warren.

El programa desarrollado en el proyecto se ha denominado DINET, y facilita la verificación y rediseño de los nudos de los tipos T, Y, X, K y N, estos 2 últimos, en el caso de perfiles con espaciamiento. Además, no se han considerado las posibilidades de la acción de los momentos flectores en el cálculo, por no tener valores importantes

en este tipo de estructura, al considerarse, de acuerdo a los propios preceptos de la norma que las diagonales se suponían articuladas en los extremos.

No obstante, tanto en el diseño de la interface gráfica, como en la programación de la estructura interna del programa se han tenido en cuenta la posibilidad de su ampliación, habiéndose reservado ventanas específicas para indicar solapamientos, o para reflejar los momentos aplicados a cada perfil. El nudo KT (correspondiente a celosías Warren con montantes), también se ha considerado en el diseño del programa, e incluso en el desarrollo de la representación gráfica de la interface.

Así, el desarrollo de dichos complementos al programa, puede realizarse como módulos complementarios al trabajo ya realizado, sin afectar de manera significativa al núcleo de la programación.

La implementación de opciones de menú e iconos que faciliten las labores de almacenamiento de las características del nudo o su lectura, así como establecer opciones de configuración del interface, no se han desarrollado en DINET, por no corresponder al fin primordial del programa, que era la verificación de los nudos.

El cálculo de las relaciones y resistencias empleadas para la comprobación de la validez del nudo se ha realizado mediante módulos independientes, en sucesivas fases, por lo que dichos módulos serían fácilmente implementables en un programa dedicado a la optimización de los resultados del nudo. Igualmente, se han desarrollado en el programa iniDINET las comprobaciones mínimas necesarias para la ejecución de forma automática de comprobaciones a partir de otros programas de análisis, dejando abierta la posibilidad de utilizarlo creando la correspondiente pasarela de intercambio de datos.

Finalmente, en el proyecto se ha realizado una validación de los resultados obtenidos con DINET, comparándolos con los resultados de los cálculos manuales de acuerdo a las guías del CIDECT, y con los resultados de los cálculos de programas reconocidos como Robot o CoP2 VM.

6.3 CONCLUSIONES

Las estructuras tubulares de perfiles huecos tienen un uso muy extendido por sus buenas propiedades mecánicas, debido fundamentalmente al hecho de tratarse de perfiles cerrados. Esta característica, que les hace tener una capacidad de resistencia a la compresión muy superior a los perfiles abiertos de peso similar, obliga a considerar con más importancia el comportamiento de los nudos, por convertirse en los puntos críticos de las estructuras en celosía. Sobre todo en aquellas donde las diagonales se pueden suponer articuladas en los extremos y por lo tanto, despreciar el momento flector que afecta a las barras.

Con el fin de determinar las posibilidades de fallo de los nudos de las estructuras tubulares de perfiles huecos, existe un organismo internacional CIDECT que ha realizado un estudio empírico, habiendo acotado los tipos de fallo y logrando obtener una formulación que, referida a los parámetros que configuran el nudo, permite deducir unos esfuerzos máximos resistentes en los perfiles. Los resultados obtenidos por CIDECT se han plasmado en la norma EN 1993-1-8, que sirve de base para toda la formulación contenida en este proyecto.

Dicha formulación tiene un proceso laborioso de cálculo, al obligar a definir previamente unos parámetros, verificar unas condiciones geométricas y por último

aplicar unas fórmulas según las condiciones concretas del nudo. Así, de este proyecto se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Por un lado, el proyecto tenía como fin último el desarrollar herramientas propias que automatizaran dichos cálculos con el fin de poder aportar los resultados como complemento a cualquier análisis de la estructura. Además, el objetivo de dicha herramienta, denominada DINET, ha sido aportar unas condiciones favorables para el rediseño del nudo, en caso de no cumplir con dichas resistencias mínimas. Es este último aspecto el que ha hecho especialmente interesante el desarrollo del programa, habiéndose comprobado que programas como Robot o CoP2 VM, tienen una programación más orientada a la verificación que al rediseño.
- Además, precisamente por la complejidad de la norma EN 1993-1-8, se hacía especialmente interesante el verificar si los programas que actualmente existen en el mercado realizaban los cálculos con el rigor que se requería. Los resultados, aunque muy similares entre sí, evidencian pequeñas diferencias, motivadas por diversas razones, argumentadas en el proyecto y que deberían ser tenidas en cuenta por un analista de este tipo de estructuras que utilizara dichos programas. En concreto, hay que resaltar con respecto a Robot, por su relevancia como programa de cálculo de estructuras, que se ha detectado que en el cálculo de la resistencia de las soldaduras utiliza normativa antigua (ENV 1993-1-1:1992), por lo que da como resultado valores menos conservadores que la norma actual.
- Otro de los objetivos del proyecto es utilizar el entorno de MATLAB para el desarrollo del programa, y en concreto su herramienta de desarrollo de GUI llamada GUIDE. Esta herramienta permite crear un interface con muchas posibilidades de configuración, facilitando el uso de multitud de elementos de distintos tipos con un alto grado de posibilidades de configuración. Su funcionamiento se ha comprobado que es bastante estable, y una vez conocidas las reglas que rigen su programación, la depuración de errores es bastante sencilla y cómoda. El uso de MATLAB para este proyecto, sienta los cimientos para poder desarrollar cualquier otro programa o aplicación aprovechando dicho entorno.
- Por último comentar que se ha utilizado el proyecto para sistematizar la formulación establecida en la norma de forma esquemática y en ocasiones confusa, facilitando las labores de interpretación. Para facilitar dicha interpretación se han utilizado las guías editadas por CIDECT, con mucha más información sobre la formulación existente en la norma y aportando las interpretaciones correctas a cada uno de los tipos de fallo ocurridos en los nudos. Así, el proyecto no sólo es una sucesión de fórmulas ordenadas, obtenidas de la norma, sino que a su vez es un tratado donde se puede obtener información complementaria que facilite al analista la interpretación de las posibilidades de fallo de los nudos que intervienen en las estructuras.

6.4 TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de continuar el desarrollo del programa DINET para la ayuda en el cálculo y rediseño de nudos en estructuras tubulares, se proponen las siguientes vías para futuros trabajos:

- Completar el cálculo del nudo en KT para estructuras tipo Warren con montante
- Implementar el cálculo de nudos con K y N con solape.
- Implementar la comprobación de estructuras cuando las diagonales se ven afectadas por momentos flectores importantes.
- Realizar el recálculo de la resistencia del cordón, considerando los momentos secundarios provocados por la excentricidad del nudo.
- Completar la GUI con otros componentes habituales en este tipo de aplicaciones, como el menú o la barra de iconos.
- Desarrollar la representación gráfica utilizando las posibilidades que proporciona MATLAB de diseño en 3D.
- Emplear los módulos del programa para el desarrollo de aplicaciones de optimización.
- Crear pasarelas desde programas de análisis de estructuras, para automatizar las verificaciones.

Referencias

GENERALES

1. Martí Montrull, P.: Análisis de estructuras. Métodos clásicos y matriciales. – Horacio Escarabajal Editores, 2ª Edición octubre 2007
2. Muñoz Pereira, N. y otros: Curso de Experto en Estructuras Metálicas: Fabricación, Control y Patología Normativa EA95 y Eurocódigo 3 – Universidad Nacional Española a Distancia, año 2001
3. Masnou Malgosa, M.: Estudio de los diferentes métodos de dimensionamiento para uniones atornilladas y soldadas de acuerdo con la normativa vigente – Universidad Politécnica de Barcelona, septiembre de 2007 – enlace: <http://hdl.handle.net/2099.1/6080>

PROGRAMACIÓN EN MATLAB

4. Fernández de Córdoba Martos, G.: Creación de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con MATLAB – Universidad de Málaga, septiembre 2007
5. García de Jalón, J. y otros: Aprenda MATLAB 7.0 como si estuviera en primero – Universidad Politécnica de Madrid, diciembre 2005.
6. Barragán Guerrero, D. O.: Manual de interfaz gráfica de usuario en MATLAB. Parte I – www.matpic.com

NORMATIVA

7. EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010: Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras – AENOR Edición julio 2010.
8. EN 1993-1-1:2008/AC: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios – AENOR Edición mayo 2010
9. EN 1993-1-8:2005/AC:2009: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, Parte 1-8: Uniones – AENOR Edición noviembre 2011
10. EN 1090-2:2008: Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero – AENOR Edición mayo 2011
11. EN 10210-1:2006: Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro – AENOR Edición julio 2007

162 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

12. EN 10219-1:2007/Erratum: Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro – AENOR septiembre 2010
13. Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo: Instrucción de Acero Estructural (EAE) – BOE nº149, jueves 23 de junio de 2011.

DOCUMENTACIÓN CIDECT-ICT

14. Wardenier, J. y otros: Guía nº1: Diseño de nudos de perfiles tubulares circulares (CHS) bajo cargas predominantemente estáticas – CIDECT, segunda edición 2008
15. A. Packer, J. y otros: Guía nº3: Diseño de nudos de perfiles tubulares rectangulares (RHS) bajo cargas predominantemente estáticas – CIDECT, primera edición 1996
16. Wardenier, J.: Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales – ICT, primera edición 2002
17. Iglesias G. y otros: Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero – ICT, primera edición 2004
18. Iglesias G. y otros: Naves industriales resueltas con perfiles tubulares de acero – ICT, primera edición 2005
19. Iglesias G. y otros: Monográfico: Perfil tubular de acero... conformado en frío o en caliente? – ICT, Construber, boletín informativo nº9 – año 2008

CATÁLOGOS

20. Grupo Condesa: Catálogo de tubo estructural. Gama de productos – febrero 2012
21. Grupo Bornay: Catálogo tubo estructural – 2006

SOFTWARE

22. MATLAB R2012a – MathWorks® - Natick, Massachusetts (EE.UU.)
23. Disseny 2012 – Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Estructuras y Construcción
24. Cidjoint v1.38 – CIDECT
25. CoP2 VM v1.5.7 - Feldmann + Weynand GMBH, - Aachen, Bélgica
26. Robot Structural Analysis Professional 2011 - Autodesk® - San Rafael, California (EE.UU.)

Anejo A

Manual del usuario del programa DINET

A.1 INTRODUCCIÓN

DINET es un programa concebido para realizar la verificación y resolución de nudos soldados de estructuras de acero, formadas por tubos rectangulares y/o cuadrados huecos. Para su desarrollo se han utilizado las fórmulas y limitaciones establecidas en la norma EN 1993-1-8:2005 y EN 1993-1-8:2005/AC:2009, correspondientes al Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, parte 1-8: Uniones.

El programa realiza la verificación geométrica de acuerdo a los parámetros que establece la norma para su resolución. A continuación realiza el cálculo de la resistencia máxima de los perfiles del nudo, así como de las soldaduras, dando como resultado final un informe completo de los cálculos realizados, así como el ratio de sollicitación del nudo, en función de los esfuerzos introducidos para cada barra.

Este programa se ha desarrollado como parte del proyecto fin de carrera: “Análisis y diseño de nudos de estructuras tubulares según el Eurocódigo 3”, realizado en la Universidad Politécnica de Cartagena, por el departamento de Estructuras y Construcción.

Uno de los objetivos del programa era establecer una única pantalla para la introducción de datos, ofreciendo así la posibilidad de controlar todos los parámetros de la unión, como parte de la resolución del nudo. Asimismo, el programa ofrece una ventana de visualización gráfica que se actualiza en tiempo real, permitiendo cotejar de forma inmediata, si el resultado de los datos introducidos es el esperado.

El estudio de cada nudo ha de realizarse en 3 etapas, habiéndose dispuesto un botón en la pantalla para cada una de ellas, con el fin de facilitar la comprobación:

1. Etapa: Botón “Validez General”
2. Etapa: Botón “Validez Nudo”
3. Etapa: Botón “Informe”

La superación de cada etapa, cumpliendo todas las comprobaciones, permite pulsar el siguiente botón.

A continuación se mostrarán los pasos que deberían realizarse para cada nudo y estado de carga (o envolvente), con el fin de asegurar la validez del nudo y poder obtener el informe final.

Este manual se corresponde con la versión DINET v1.0.

A.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

A.2.1 Descripción de los archivos del programa

Para poder ejecutar el programa en primer lugar hay que descomprimir el archivo DINET.zip.

Todos los archivos del programa se encuentran ubicados en la misma carpeta principal. Además, se ha creado una carpeta \imagenes, que contiene las imágenes fijas de cada nudo que se representan al seleccionar el tipo de nudo.

A continuación se selecciona como “current folder” la ubicación de la carpeta descomprimida DINET.

El programa se inicia directamente introduciendo “DINET” en la línea de comandos de MATLAB.

A.2.2 Descripción general de la ventana principal

El programa ofrece una única pantalla para la introducción de los datos necesarios para realizar la comprobación del nudo:

Datos Generales

Proyecto: Estructura ICT
 Ref. Proyecto: PFC
 Dirección: Domicilio de la Obra
 Projectista: AOF
 Fecha: septiembre 2013
 Cercha: 1
 Nudo: 2
 Estado de Carga: 1

Tipo de Nudo

Nudo en T
 Nudo en Y
 Nudo en X
 Nudo en K
 Nudo en N
 Nudo en KT

Geometría del Nudo

Excentricidad (mm): min -110.0, max 50.0
 Espaciamento (mm): min1 25.0, g1 55.1, max 75.0
 min2, g2
 Diagonal solapada: Diag. 1 Diag. 2

C1/C2 - Cordón

Perfil: RHS 200x150x8
 Material: S355 ROBOT
 Longitud: 10.000 m
 0° 90°
 Descripción Perfil: Acabado Conf. Frio

D1 - Diagonal 1

Perfil: SHS 100x100x4
 Material: S275 ROBOT
 Longitud: 1.000 m
 0° 90°
 Descripción Perfil: Ángulo 46.0°

D2 - Diagonal 2

Perfil: SHS 100x100x4
 Material: S275 ROBOT
 Longitud: 1.000 m
 0° 90°
 Descripción Perfil: Ángulo 46.0°

M - Montante

Perfil: SHS 100x100x4
 Material: S275 ROBOT
 Longitud: 2.000 m
 0° 90°
 Descripción Perfil:

Coefficiente de Seguridad

Gamma M2: 1.25 Gamma M5: 1.00

Soldaduras

Espesor de garganta de soldaduras: min 3 mm, Proyectoado 5.0 mm

Esfuerzos en el Nudo

	E. Axil (kN)	M. Flector (kNm)	Ratio Perfil Estimado
Cordón 1	166.75	0.00	0.09
Cordón 2	464.13	0.00	0.26
Diagonal 1	258.34	0.00	0.63
Diagonal 2	-176.37	0.00	0.43

Comprobación Validez Geométrica

Parámetros de la unión	Cumple
Relación mínima anchura diagonales/anchura cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor de las diag. compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor de las diag. compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación mínima altura/anchura de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor del cordón compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor del cordón compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/anchura del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación mínima altura/anchura del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>

Comprobación Resistencia del Nudo

Tipo de fallo	Cumple	Ratio
Rotura de la cara del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.45
Rotura por est. cortante del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.27
Rotura de la diagonal/montante	<input checked="" type="checkbox"/>	0.61
Funcionamiento de la cara del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.28
Verificación de soldaduras	<input checked="" type="checkbox"/>	0.46

Comentarios

> Comprobación Validez del Nudo:
 Se ha completado satisfactoriamente la verificación de la validez geométrica.
 Se ha completado satisfactoriamente la verificación de las condiciones de Resistencia.
 El ratio general de la unión es: 0.6116
 > Genera Informe
 Informe completado con el nombre: PFC_1_2_1-20130307_212958.txt

Validez General Cumple **Ratio Unión** 0.61
Validez Nudo Cumple
Informe

Figura A-1 - Ventana principal

Los datos a introducir se han agrupado dentro de paneles, y estos a su vez se han agrupado en 4 columnas. En términos generales, se ha tratado que la mitad

izquierda se corresponda a la zona de introducción de datos y la mitad derecha sea la correspondiente a la salida de datos y visualización gráfica. Como excepción, en la tercera columna se han incluido los datos relativos a esfuerzos aplicados sobre el nudo y garganta de soldadura.

En la parte baja se ha incluido una ventana de comentarios, donde se van indicando en todo momento las modificaciones que se van realizando, así como algunos avisos que pueden provocar problemas en la verificación posterior.

Por último, en la esquina inferior derecha, se han situado los 3 botones correspondientes a las 3 etapas de las comprobaciones a realizar, así como una ventana donde se indica el ratio del conjunto de la unión, una vez realizados los cálculos de resistencia, representándose en color rojo o verde, en función de si es mayor o menor de la unidad, respectivamente.

A.2.3 Introducción de los datos generales

El primer paso una vez iniciado el programa es introducir los datos generales que permitirán identificar en el informe, quién lo ha realizado y con que estructura y nudo se corresponde.

Datos Generales	
Proyecto	Estructura ICT
Ref. Proyecto	PFC
Dirección	Domicilio de la Obra
Projectista	AOF
Fecha	septiembre 2013
Cercha	1
Nudo	2
Estado de Carga	1

Figura A-2 - Panel datos generales

Los datos a introducir son:

- Proyecto: Nombre del proyecto
- Ref. Proyecto: Referencia que permita identificar al proyecto y que servirá de base para el nombre del informe final. Es por esto por lo que no debería incluir ninguno de los siguientes caracteres: \/*:."?<>|
- Dirección: Domicilio de la obra
- Projectista: Datos relativos al projectista.
- Fecha: Fecha de referencia para el proyecto.
- Cercha: Identifica la cercha de acuerdo a la nomenclatura del proyecto.
- Nudo: Numeración del nudo dentro de la cercha
- Estado de carga: número del estado de carga de acuerdo a la hoja de resultados obtenida con el programa de análisis de la estructura.

Estos tres últimos campos también se utilizan para configurar el nombre del informe, por lo que también deberá respetarse la indicación de los caracteres, si se pretende que aparezcan.

A.2.4 Selección del tipo de nudo

El siguiente paso es indicar el tipo de nudo a verificar, seleccionándolo directamente en el panel de tipo de nudo.

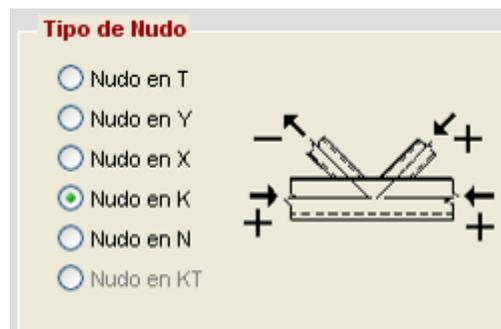


Figura A-3 - Panel tipo de nudo

A la derecha del panel se indica, mediante un dibujo esquemático, la forma general del nudo y el sentido positivo y negativo de los esfuerzos.

En esta versión del programa no se ha implementado todavía el nudo en KT.

A.2.5 Introducción de la excentricidad o espaciamiento

El siguiente panel, titulado geometría del nudo, permite introducir los parámetros de excentricidad y espaciamiento del nudo en caso de sea necesario (nudos K, N y KT). En caso de existir un espaciamiento negativo (solapamiento), se podrá seleccionar la diagonal solapada en la parte inferior.

Los valores de excentricidad y solapamiento máximos y mínimos se actualizan con los cambios realizados en el resto de paneles, si corresponde. No obstante, los valores de excentricidad y espaciamiento introducidos sólo se verifican al pulsar el botón de Validez General.

Figura A-4 - Panel geometría del nudo

Se pueden introducir en primer lugar la excentricidad o el espaciamiento, calculando el programa de forma automática el otro valor, de acuerdo a la geometría existente. No obstante, para los cálculos, siempre se utilizará como referencia la excentricidad.

El programa activa las ventanas correspondientes a la excentricidad o espaciamiento de acuerdo al tipo de nudo seleccionado, evitando la posibilidad de error.

En esta versión del programa todavía no se ha implementado la verificación cuando se produce solapamiento entre las diagonales o diagonal y montante.

A.2.6 Introducción de los parámetros de los perfiles

En la segunda columna hay 4 paneles, para la introducción de los parámetros de cada perfil. El programa activa los paneles de los perfiles correspondientes al nudo seleccionado.

Todos los paneles para la introducción de los datos de los 4 posibles perfiles: cordón, diagonal 1 y 2 y montante, tienen la misma distribución. Además, el panel correspondiente al cordón, permite indicar si el perfil seleccionado está acabado en caliente o conformado en frío. Para el resto de los perfiles, este dato no afecta a los cálculos, por lo que no se ha incluido.

La primera ventana del panel corresponde a un desplegable que permite seleccionar el tipo de perfil de la base de datos del programa. En primer lugar están todos los perfiles RHS, y a continuación, en el mismo listado, los SHS, ordenados por anchura, altura y espesor de menor a mayor, sucesivamente.

Figura A-5 - Panel cordón

Figura A-6 - Panel montante

La ventana de la derecha corresponde a un desplegable que permite seleccionar el material del perfil, de acuerdo a la base de datos que dispone el programa. En primer lugar se han incluido los perfiles que se comercializan habitualmente, con la

resistencia última de acuerdo a la norma, y al final se han añadido los perfiles de acuerdo a los programas de cálculo (por ejemplo ROBOT™ Structural Analysis Professional de Autodesk®), cuyo valor es inferior, dando por lo tanto resultados más conservadores.

Debajo de la ventana de selección del tipo de perfil, se puede seleccionar si el perfil está en posición de máxima inercia (0°) o de mínima inercia (90°). En perfiles SHS, esta opción no provoca ningún resultado.

La ventana de longitud permite introducir las longitudes de los perfiles en metros.



Figura A-7 - Panel diagonal

Los paneles de las diagonales, además, tienen una ventana para la introducción del menor ángulo entre el perfil correspondiente y la cara superior del cordón en grados sexagesimales.

Todos los paneles cuentan con un botón que permite conocer todos los parámetros del tipo de perfil seleccionado en la ventana perfil. El dibujo de la sección del perfil que aparece en la ventana se corresponde a las dimensiones reales a escala del perfil, estando además en la posición que indica el ángulo de rotación de inercia (0° o 90°).

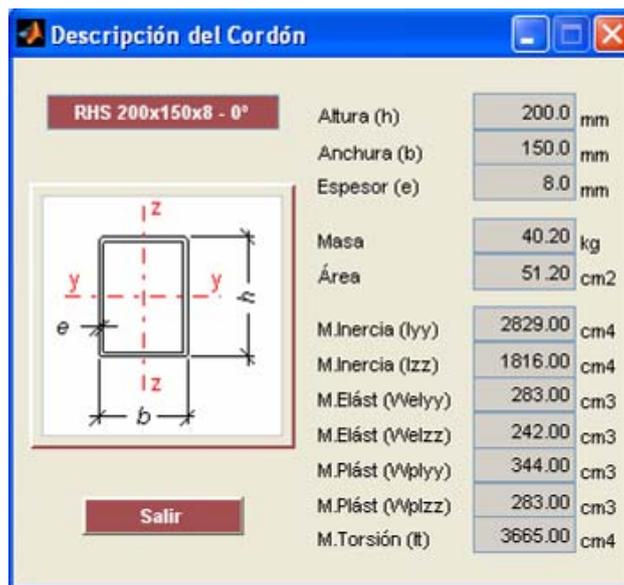


Figura A-8 – Ventana descripción del perfil

A.2.7 Panel de coeficientes de seguridad

Debajo de los paneles de los perfiles, en la misma columna, está el panel donde se pueden cambiar los coeficientes de seguridad. Por defecto aparecen los correspondientes a la norma, pero se puede poner cualquier valor:

- Gamma M2: Coeficiente de seguridad correspondiente a las soldaduras.
- Gamma M5: Coeficiente de seguridad correspondiente al cálculo de la resistencia del nudo.



Figura A-9 - Panel coeficientes de seguridad

A.2.8 Espesor de garganta de soldaduras

En la tercera columna, en la parte superior, se encuentra el panel de Soldaduras, que permite introducir el valor proyectado de la garganta del cordón de soldadura a realizar entre el perfil y el cordón o entre perfiles, con el fin de comprobar si cumple con los límites establecidos en el Eurocódigo 3.

A la izquierda hay una ventana que indica el valor mínimo de la soldadura de acuerdo a las indicaciones del Eurocódigo 3.

A la derecha, aparece una ventana editable, donde se puede introducir el valor de la garganta de soldadura en milímetros.

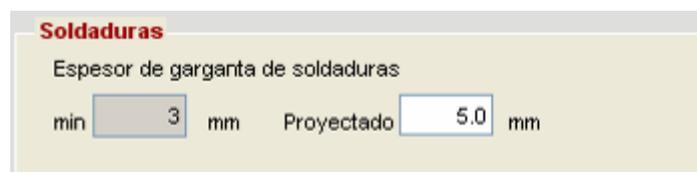


Figura A-10 - Panel soldaduras

A.2.9 Tabla de esfuerzos del nudo

Debajo del panel de soldaduras se encuentra el último panel de introducción de datos: la tabla de esfuerzos del nudo.

La tabla se actualiza según el tipo de nudo seleccionado, dejando en las filas únicamente los perfiles activos. Para el cordón, además, se aportan 2 filas (C1 y C2), con el fin de poder introducir los valores de esfuerzos en el cordón a ambos lados del nudo. Con el fin de facilitar la introducción de los esfuerzos, en la ventana de visualización del nudo, situada a la derecha, se indica la posición donde se sitúa cada esfuerzo.

La tabla dispone de 3 columnas:

- Esfuerzos axiales: Se introducen en kN, y el criterio de signos seguidos es el mismo que establece la norma EN 1993-1-8 para los nudos:
 - Compresión positivo (+)

- Tracción negativo (-)
- En la figura que acompaña el tipo de nudo en el panel de selección, se indica de forma intuitiva, el signo y sentido de los esfuerzos.
- Este sistema de signos es contrario con el resto del Eurocódigo 3, pero se ha mantenido por coherencia con la norma de nudos y su formulación.
- Momentos flectores: Permite introducir los valores de los momentos flectores en caso de existir en kN·m. Como en el cálculo de estas estructuras se suele considerar que las diagonales y montantes están articuladas en los extremos, en esta primera versión del programa esta columna está inhabilitada.
- Ratio Perfil Estimado: Este valor lo proporciona el programa con el objeto de valorar de forma aproximada la relación entre los valores introducidos y los perfiles seleccionados. Para ello tiene en cuenta tanto los materiales como el coeficiente de seguridad γ_{M0} . Este coeficiente no es editable en la ventana gráfica, pero se puede modificar en el archivo iniPFC. El valor por defecto es 1,05, de acuerdo a las recomendaciones del Eurocódigo. Este ratio permite controlar en que medida afectan a la resistencia del perfil los cambios que se realicen en el nudo para conseguir que cumpla todas las condiciones.

Esfuerzos en el Nudo			
	E. Axil (kN)	M. Flector (kN·m)	Ratio Perfil Estimado
Cordón 1	166.75	0.00	0.09
Cordón 2	464.13	0.00	0.26
Diagonal 1	258.34	0.00	0.63
Diagonal 2	-176.37	0.00	0.43

Figura A-11 - Panel esfuerzos en el nudo

A.2.10 Panel de comprobación de validez geométrica

El panel inferior de la tercera columna es la relación de comprobaciones realizadas para determinar si se cumplen las condiciones de validez geométrica indicadas en la norma para poder aplicar los cálculos que permiten obtener las resistencias del nudo.

Las comprobaciones a realizar para todos los tipos de nudos son las mismas, aunque en función de cada tipo, los parámetros límite son distintos, de acuerdo a lo establecido en la norma, en la tabla 7.8: “Rango de validez para uniones soldadas entre diagonales CHS o RHS y cordones RHS”

El programa desglosa cada una de las comprobaciones realizadas, he indica en la columna de la derecha si se ha cumplido con el valor que estable la norma para dicha relación.

Comprobación Validez Geométrica	
Parámetros de la unión	Cumple
Relación mínima anchura diagonales/anchura cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor de las diag. compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor de las diag. compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/anchura de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación mínima altura/anchura de las diagonales	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima anchura/espesor del cordón compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/espesor del cordón compr.	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación máxima altura/anchura del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>
Relación mínima altura/anchura del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura A-12 - Panel comprobación validez geométrica

A.2.11 Ventana de visualización del nudo

En la parte superior de la cuarta columna, se ha añadido una ventana de visualización del nudo, que se actualiza de forma automática con cualquier cambio que se realice en los parámetros de la unión (ángulos, perfiles, excentricidad, ...)

Para ello se han incluido la vista frontal del nudo y la lateral correspondiente al lado del cordón C1.

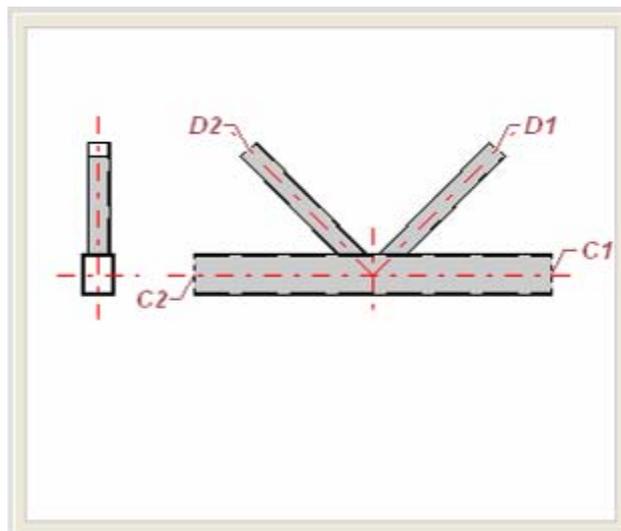


Figura A-13 – Ventana visualización del nudo

A.2.12 Panel de comprobación de validez geométrica

En la parte inferior de la cuarta columna, se indican cada una de las comprobaciones de resistencia realizadas de acuerdo a las indicaciones de la norma, según los parámetros β y γ .

Tipo de fallo	Cumple	Ratio
Rotura de la cara del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.45
Rotura por esf. cortante del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.27
Rotura de la diagonal/montante	<input checked="" type="checkbox"/>	0.61
Punzonamiento de la cara del cordón	<input checked="" type="checkbox"/>	0.26
Verificación de soldaduras	<input checked="" type="checkbox"/>	0.46

Figura A-14 – Ventana visualización del nudo

La segunda columna indica si se cumple con los límites de resistencia que establece la norma para cada tipo de fallo de la unión.

En la tercera columna se han incluido los ratios máximos de todas las comprobaciones realizadas para cada tipo de fallo de la unión.

La última comprobación es siempre la verificación de todas las soldaduras de la unión.

A.2.13 Panel comentarios

En la parte inferior de la ventana del programa se ha añadido un panel donde se van añadiendo todos los comentarios de los cálculos y modificaciones realizadas en la verificación del nudo.



Figura A-15 – Panel comentarios

El primer comentario con el que abre el programa, indica la cantidad de tipos de perfiles cargados en la base de datos del programa.

Cada una de las acciones realizadas en las ventanas, quedan reflejadas en este panel, permitiendo hacer un seguimiento de las modificaciones realizadas al nudo para conseguir su validez.

Además, en esta ventana se van añadiendo avisos o recomendaciones según los parámetros introducidos en cada caso o las acciones realizadas.

A.2.14 Botones de validación

En la parte inferior derecha de la ventana del programa, se han situado los botones que permiten de forma rápida e intuitiva la comprobación de la validez de los nudos introducidos. Mientras no se haya comprobado la validez general de forma satisfactoria, no se podrá comprobar la validez del nudo, y el botón correspondiente permanecerá desactivado (en gris)



Figura A-16 – Boton de validez general

La validez general incluye las siguientes comprobaciones:

- Relación entre la longitud de los perfiles y su altura, lo que permite despreciar los momentos secundarios en la unión.
- Relación entre la excentricidad y la altura del cordón, lo que permite despreciar los momentos resultantes de las excentricidades.
- Que tanto la excentricidad como el espaciamiento se encuentren dentro de los límites establecidos por la norma.

Una vez cumplidas satisfactoriamente las comprobaciones de validez general, se activará el botón de validez del nudo.



Figura A-17 – Boton de validez nudo

La validez del nudo realiza en primer lugar las comprobaciones de las condiciones de validez geométrica. En caso de no cumplirse todas, aparece una ventana de aviso indicando cuantas no se han cumplido.

Una vez modificados los parámetros del nudo se ha de volver a pulsar el botón de validez general o de validez del nudo en función de si se han modificado o no las condiciones de validez general que se habían comprobado anteriormente.

Una vez se ha comprobado satisfactoriamente la validez geométrica, se indica en el panel de comentarios y se empieza a realizar la comprobación de las resistencias a los distintos tipos de fallo.

El resultado se indica en el panel de comentarios y queda reflejado en el cumplimiento o no de las distintas comprobaciones.

La realización de las comprobaciones de resistencia, habilita el botón de informe.

A.2.15 Botón de informe

En la parte inferior derecha de la ventana del programa, debajo de los botones descritos anteriormente, se han situado el botón de informe. Dicho botón no se activará hasta que no se haya completado el cálculo de la validez del nudo.



Figura A-18 – Boton de informe

El botón informe genera un documento donde se incluyen todos los parámetros introducidos en los distintos paneles, así como los resultados de los cálculos.

El documento tiene las siguientes partes:

1. Cabecera, con los datos generales
2. Ratio global de la unión
3. Geometría de la unión, con la descripción de los perfiles involucrados en el nudo, tanto en su geometría como materiales. También se indica la excentricidad y el espesor de la garganta de soldadura.
4. Esfuerzos introducidos del nudo, así como los coeficientes de seguridad
5. Resultados: que a su vez se divide en tres partes:
 - Parámetros generales calculados para realizar los cálculos
 - Relación de resistencias según el tipo de fallo. De acuerdo a la norma, según los parámetros generales, algunos tipos de fallo no se comprueban, por lo que se indican como excluidos.
 - Verificación de soldaduras. Se realiza la verificación para cada perfil y cada soldadura. Para cada soldadura, se indican los valores de las sigma y tau, así como la sigma de comparación, de acuerdo al criterio establecido por el Eurocódigo 3. Por último se indica para cada soldadura las tensiones máximas de la sigma normal (σ_n) y de la sigma de comparación (σ_{co})

El documento, una vez elaborado, se guarda automáticamente, utilizando los datos generales introducidos:

1. En primer lugar la referencia del proyecto
2. a continuación el número de cercha, número de nudo y estado de carga.
3. por último la fecha y hora actual.

Teniendo en cuenta que dichos campos se utilizan para elaborar el nombre del archivo, no deberían incluir ninguno de los siguientes caracteres: $\backslash/*:?"<>|$. En caso de que el nombre generado no sea válido, el programa automáticamente genera el documento, denominándolo: “Informe”, seguido de la fecha y la hora actual.

El archivo es almacenado en el directorio donde se encuentra el programa.

Una vez generado el informe, se abre mediante el bloc de notas, para facilitar su manipulación, su impresión, grabarlo en otra ubicación o con otro nombre.

A.2.16 **Ratio total**

En la esquina inferior derecha de la ventana del programa, se ha incluido una ventana con el ratio total de la unión. Dicho ratio es el mayor de todos los calculados para la resistencia del nudo, y no tiene en cuenta los ratios estimados con los esfuerzos de los perfiles.



Figura A-19 – Ventana ratio unión

En caso de que el resultado sea inferior a la unidad, y por lo tanto que el diseño del nudo sea válido, el valor del ratio se pondrá de color verde. En caso de que no sea válido, tomará un color rojo, indicando que han de revisarse los parámetros de la unión.

A.3 CRÉDITOS

Dentro del menú de Ayuda se ha incluido una referencia a los créditos de este programa, donde se indican las personas involucradas y la versión del programa.

Este manual se ha realizado en base a:

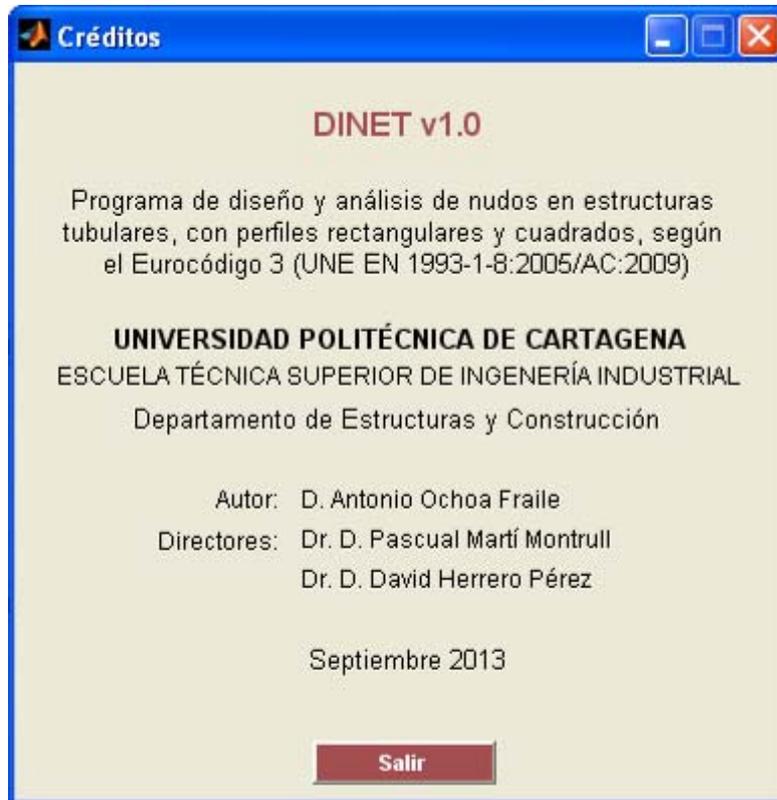


Figura A-20 - Créditos

Anejo B

Informe de resultados de DINET

B.1 INFORME RESULTADOS NUDO N°2

PFC_1_2_1-20130910_130704.txt

DINET v1.0

Programa de diseño y análisis de nudos en estructuras tubulares, con perfiles rectangulares y cuadrados, según el Eurocódigo 3 (UNE EN 1993-1-8:2005/AC:2009)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Departamento de Estructuras y Construcción

Proyecto: Estructura ICT
Ref. Proyecto: PFC
Dirección de la Obra: Domicilio de la Obra
Proyectista: AOF
Fecha: septiembre 2013

DATOS GENERALES:

Cercha: 1
Nudo: 2
Estado de Carga: 1
Tipo de Nudo: K

** Ratio de la unión = 0.61 **

GEOMETRÍA:

Características de los perfiles:

Denominación	Tipo	h	b	t	Ángulo	Longitud	Área
Perfil	Perfil	mm	mm	mm	°	m	mm ²
Cordón	RHS 200x150x8 - 0°	200	150	8.0	0.0	10.000	5120.00
Diagonal 1	SHS 100x100x4 - 0°	100	100	4.0	46.0	1.000	1490.00
Diagonal 2	SHS 100x100x4 - 0°	100	100	4.0	46.0	1.000	1490.00

Características de los materiales:

Denominación	Tipo	fy	fu	Beta_w	Acabado
Perfil	Material	MPa	MPa		
Cordón	S355 ROBOT	355	470	0.90	Conf. Frío
Diagonal 1	S275 ROBOT	275	410	0.85	Indiferente
Diagonal 2	S275 ROBOT	275	410	0.85	Indiferente

Excentricidad (e) = 0.5 mm

Espaciamiento (g1) = 55.0 mm

Espesor de garganta de soldaduras (a) = 5.0 mm

ESFUERZOS:

Denominación	NEd	MEd
Perfil	kN	kN*m
Cordón 1	166.75	0.00
Cordón 2	464.13	0.00

PFC_1_2_1-20130910_130704.txt
 Diagonal 1 258.34 0.00
 Diagonal 2 -176.37 0.00

Coefficiente de seguridad soldaduras (Gamma M2) = 1.25
 Coeficiente de seguridad nudo (Gamma M5) = 1.00

 RESULTADOS:

Parámetros generales:

Ratio de anchuras	Beta	=	0.67
Geometría del cordón	Gamma	=	9.38
Límite superior punzonamiento	1-1/Gamma	=	0.89
Máx. tensión compresión en cordón	n	=	0.26
Función de precarga del cordón f(n)	kn	=	1.00
Área de esfuerzo cortante del cordón	Av	=	3349.98 mm2
Esfuerzo vertical máximo (cortante)	VEd	=	185.83 kN
Resistencia a cortante del cordón	Vp1,Rd	=	686.61 kN
Diagonal 1:			
Anchura eficaz de rotura	b _{eff,i}	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento	b _{ep,i}	=	53.33 mm
Anchura eficaz de solapamiento	b _{ev,i}	=	excluido
Diagonal 2:			
Anchura eficaz de rotura	b _{eff,i}	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento	b _{ep,i}	=	53.33 mm
Anchura eficaz de solapamiento	b _{ev,i}	=	excluido

Resistencias según el tipo de fallo:

Ratio

Cordón:

Esfuerzo axial en espaciamento	N0,Ed	=	346.21 kN	
Rotura cara lateral por esf. cortante	N0,Rd(gap)	=	1773.21 kN	(0.20)
***** Resultado resistencia	Cordón	=	CUMPLE	(0.20)

Diagonal 1:

Esfuerzo axial	N1,Ed	=	258.34 kN	
Rotura de la cara del cordón	N1,Rd(1)	=	573.80 kN	(0.45)
Pandeo de la cara lateral del cordón	N1,Rd(2)	=	excluido	
Rotura por esf. cortante del cordón	N1,Rd(3)	=	954.50 kN	(0.27)
Rotura/pandeo indeterminado del cordón	N1,Rd(4)	=	excluido	
Rotura de la diagonal/montante	N1,Rd(5)	=	422.40 kN	(0.61)
Punzonamiento de la cara del cordón	N1,Rd(6)	=	983.26 kN	(0.26)
Pandeo local de la diagonal/montante	N1,Rd(7)	=	excluido	
***** Resultado resistencia	Diagonal 1	=	CUMPLE	(0.61)

Diagonal 2:

Esfuerzo axial	N2,Ed	=	176.37 kN	
Rotura de la cara del cordón	N2,Rd(1)	=	573.80 kN	(0.31)
Pandeo de la cara lateral del cordón	N2,Rd(2)	=	excluido	
Rotura por esf. cortante del cordón	N2,Rd(3)	=	954.50 kN	(0.18)
Rotura/pandeo indeterminado del cordón	N2,Rd(4)	=	excluido	
Rotura de la diagonal/montante	N2,Rd(5)	=	422.40 kN	(0.42)
Punzonamiento de la cara del cordón	N2,Rd(6)	=	983.26 kN	(0.18)
Pandeo local de la diagonal/montante	N2,Rd(7)	=	excluido	
***** Resultado resistencia	Diagonal 2	=	CUMPLE	(0.42)

180 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

PFC_1_2_1-20130910_130704.txt

```

Verificación de soldaduras:
-----
Diagonal 1:
  Transversal 1:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,1| = 42.23 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n1,1| = 99.49 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p1,1| = 0.00 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_col,1| = 177.43 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.14)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.46)
  Transversal 2:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,2| = 99.49 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n1,2| = 42.23 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p1,2| = 0.00 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_col,2| = 123.49 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.34)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.32)
  Longitudinal:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,3| = 54.98 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n1,3| = 54.98 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p1,3| = 75.08 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_col,3| = 170.30 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.19)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.44)

***** Resultado soldaduras Diagonal 1 = CUMPLE (0.46)

Diagonal 2:
  Transversal 1:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,1| = 28.83 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n2,1| = 67.92 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p2,1| = 0.00 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_co2,1| = 121.13 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.10)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.31)
  Transversal 2:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,2| = 67.92 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n2,2| = 28.83 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p2,2| = 0.00 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_co2,2| = 84.31 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.23)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.22)
  Longitudinal:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,3| = 37.53 MPa
    Tensión tangencial perpendicular    |tau_n2,3| = 37.53 MPa
    Tensión tangencial paralela         |tau_p2,3| = 51.26 MPa
    Tensión de comparación              |sigma_co2,3| = 116.26 MPa
    Tensión normal máxima                0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.13)
    Tensión de comparación máxima       fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.30)

***** Resultado soldaduras Diagonal 2 = CUMPLE (0.31)

*****
** La unión cumple con el Eurocódigo 3 Ratio 0.61 **
*****

```

B.2 INFORME RESULTADOS NUDO N°11

PFC_1_11_1-20130910_130909.txt

DINET v1.0

Programa de diseño y análisis de nudos en estructuras tubulares, con perfiles rectangulares y cuadrados, según el Eurocódigo 3 (UNE EN 1993-1-8:2005/AC:2009)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Departamento de Estructuras y Construcción

Proyecto: Estructura ICT
Ref. Proyecto: PFC
Dirección de la Obra: Domicilio de la Obra
Proyectista: AOF
Fecha: septiembre 2013

DATOS GENERALES:

Cercha: 1
Nudo: 11
Estado de Carga: 1
Tipo de Nudo: K

** Ratio de la unión = 0.61 **

GEOMETRÍA:

Características de los perfiles:

Denominación	Tipo	h	b	t	Ángulo	Longitud	Área
Perfil	Perfil	mm	mm	mm	°	m	mm ²
Cordón	SHS 120x120x8 -	120	120	8.0	0.0	10.000	3360.00
Diagonal 1	SHS 100x100x4 -	100	100	4.0	46.0	1.000	1490.00
Diagonal 2	SHS 100x100x4 -	100	100	4.0	46.0	1.000	1490.00

Características de los materiales:

Denominación	Tipo	fy	fu	Beta_w	Acabado
Perfil	Material	MPa	MPa		
Cordón	S355 ROBOT	355	470	0.90	Conf. Frío
Diagonal 1	S275 ROBOT	275	410	0.85	Indiferente
Diagonal 2	S275 ROBOT	275	410	0.85	Indiferente

Excentricidad (e) = 22.3 mm

Espaciamiento (g1) = 20.0 mm

Espesor de garganta de soldaduras (a) = 5.0 mm

ESFUERZOS:

Denominación	NEd	MEd
Perfil	kN	kN*m
Cordón 1	-313.46	0.00
Cordón 2	61.05	0.00

182 ANÁLISIS Y DISEÑO DE NUDOS DE ESTRUCTURAS TUBULARES SEGÚN EL EC3

PFC_1_11_1-20130910_130909.txt
 Diagonal 1 258.34 0.00
 Diagonal 2 -258.74 0.00

Coefficiente de seguridad soldaduras (Gamma M2) = 1.25
 Coeficiente de seguridad nudo (Gamma M5) = 1.00

RESULTADOS:

Parámetros generales:

Ratio de anchuras	Beta	=	0.83
Geometría del cordón	Gamma	=	7.50
Límite superior punzonamiento	1-1/Gamma	=	0.87
Máx. tensión compresión en cordón	n	=	0.05
Función de precarga del cordón f(n)	kn	=	1.00
Área de esfuerzo cortante del cordón	Av	=	2234.32 mm2
Esfuerzo vertical máximo (cortante)	VEd	=	185.83 kN
Resistencia a cortante del cordón	Vpl,Rd	=	457.94 kN
Diagonal 1:			
Anchura eficaz de rotura	beff,i	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento	bep,i	=	66.67 mm
Anchura eficaz de solapamiento	beov,i	=	excluido
Diagonal 2:			
Anchura eficaz de rotura	beff,i	=	100.00 mm
Anchura eficaz de punzonamiento	bep,i	=	66.67 mm
Anchura eficaz de solapamiento	beov,i	=	excluido

Resistencias según el tipo de fallo:

-----			Ratio

Cordón:			
Esfuerzo axial en espaciamiento	N0,Ed	=	134.00 kN
Rotura cara lateral por esf. cortante	N0,Rd(gap)	=	1124.56 kN (0.12)
***** Resultado resistencia	Cordón	=	CUMPLE (0.12)
Diagonal 1:			
Esfuerzo axial	N1,Ed	=	258.34 kN
Rotura de la cara del cordón	N1,Rd(1)	=	641.53 kN (0.40)
Pandeo de la cara lateral del cordón	N1,Rd(2)	=	excluido
Rotura por esf. cortante del cordón	N1,Rd(3)	=	636.62 kN (0.41)
Rotura/pandeo indeterminado del cordón	N1,Rd(4)	=	excluido
Rotura de la diagonal/montante	N1,Rd(5)	=	422.40 kN (0.61)
Punzonamiento de la cara del cordón	N1,Rd(6)	=	1013.65 kN (0.25)
Pandeo local de la diagonal/montante	N1,Rd(7)	=	excluido
***** Resultado resistencia	Diagonal 1	=	CUMPLE (0.61)
Diagonal 2:			
Esfuerzo axial	N2,Ed	=	258.74 kN
Rotura de la cara del cordón	N2,Rd(1)	=	641.53 kN (0.40)
Pandeo de la cara lateral del cordón	N2,Rd(2)	=	excluido
Rotura por esf. cortante del cordón	N2,Rd(3)	=	636.62 kN (0.41)
Rotura/pandeo indeterminado del cordón	N2,Rd(4)	=	excluido
Rotura de la diagonal/montante	N2,Rd(5)	=	422.40 kN (0.61)
Punzonamiento de la cara del cordón	N2,Rd(6)	=	1013.65 kN (0.26)
Pandeo local de la diagonal/montante	N2,Rd(7)	=	excluido
***** Resultado resistencia	Diagonal 2	=	CUMPLE (0.61)

PFC_1_11_1-20130910_130909.txt

```

Verificación de soldaduras:
-----
Diagonal 1:
  Transversal 1:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,1| = 42.23 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n1,1|  = 99.49 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p1,1|  = 0.00 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co1,1| = 177.43 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.14)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.46)
  Transversal 2:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,2| = 99.49 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n1,2|  = 42.23 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p1,2|  = 0.00 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co1,2| = 123.49 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.34)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.32)
  Longitudinal:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n1,3| = 54.98 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n1,3|  = 54.98 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p1,3|  = 75.08 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co1,3| = 170.30 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.19)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.44)

***** Resultado soldaduras Diagonal 1 = CUMPLE (0.46)

Diagonal 2:
  Transversal 1:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,1| = 42.30 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n2,1|  = 99.65 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p2,1|  = 0.00 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co2,1| = 177.70 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.14)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.46)
  Transversal 2:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,2| = 99.65 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n2,2|  = 42.30 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p2,2|  = 0.00 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co2,2| = 123.68 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.34)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.32)
  Longitudinal:
    Tensión normal en la garganta      |sigma_n2,3| = 55.06 MPa
    Tensión tangencial perpendicular   |tau_n2,3|  = 55.06 MPa
    Tensión tangencial paralela        |tau_p2,3|  = 75.20 MPa
    Tensión de comparación             |sigma_co2,3| = 170.56 MPa
    Tensión normal máxima              0.9*fu/gM2 = 295.20 MPa (0.19)
    Tensión de comparación máxima      fu/(Bw*gM2) = 385.88 MPa (0.44)

***** Resultado soldaduras Diagonal 2 = CUMPLE (0.46)

*****
** La unión cumple con el Eurocódigo 3 Ratio 0.61 **
*****

```

Anejo C

Informe de resultados de CoP2 VM

C.1 INFORME RESULTADOS NUDO N°2

Project:
Client:Page 1 / 5
10/09/2013

Design of joints

1 General

Project name
Project number
CommentClient name
Client addressCompany
Company address
Designer

Calculation in accordance with CEN EN 1993-1-8

Note: In the following calculations references to the Eurocodes are given. If the relevant part of Eurocode is not specified reference is made to EN 1993-1-8.

2 Description of joint configuration

Name: Lattice girder K/N-joint configuration (1)
 Comment:
 Configuration: Lattice girder K/N-joint configuration
 Connection type: Welded connection (lattice girder joint)
 Position number: 2
 Position name:
 Braced structure: No
 Ratio K_b/K_c greater or equal 0.1: Yes
 Global design procedure: Elastic

2.1 Data for joint 1

2.1.1 Safety factors

Safety factor γ_{M0} = 1
 Safety factor γ_{M5} = 1

2.1.2 Chord

Name HFRHS 200 x 150 x 8, S355
 Section height h = 200 mm
 Section width b = 150 mm
 Thickness t = 8 mm
 Inner radius r_1 = 8 mm

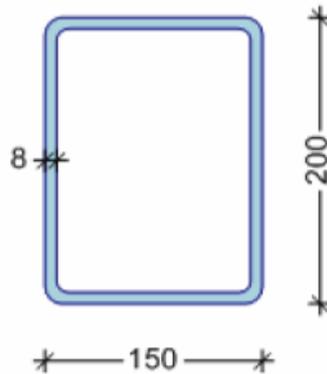


Project:
Client:

Page 2 / 5
10/09/2013

Outer radius	r_2	= 12 mm
Yield strength	f_y	= 355 N/mm ²
Ultimate strength	f_u	= 470 N/mm ²

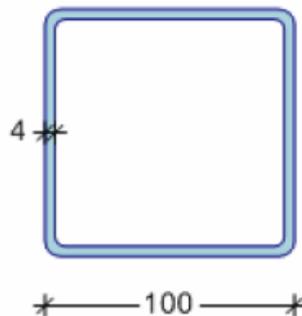
HFRHS 200 x 150 x 8



2.1.3 Brace 1

Name	HFRHS 100 x 4, S275	
Section height	h	= 100 mm
Section width	b	= 100 mm
Thickness	t	= 4 mm
Inner radius	r_1	= 4 mm
Outer radius	r_2	= 6 mm
Yield strength	f_y	= 275 N/mm ²
Ultimate strength	f_u	= 410 N/mm ²

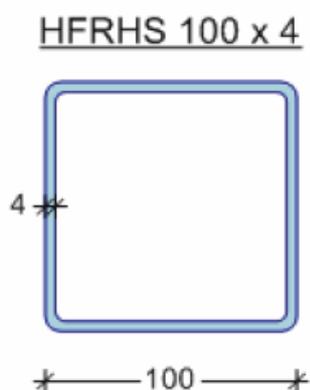
HFRHS 100 x 4



Project:
Client:Page 3 / 5
10/09/2013

2.1.4 Brace 2

Name	HFRHS 100 x 4, S275
Section height	$h = 100 \text{ mm}$
Section width	$b = 100 \text{ mm}$
Thickness	$t = 4 \text{ mm}$
Inner radius	$r1 = 4 \text{ mm}$
Outer radius	$r2 = 6 \text{ mm}$
Yield strength	$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$
Ultimate strength	$f_u = 410 \text{ N/mm}^2$



2.1.5 Welds

Weld size $a = 5 \text{ mm}$

2.2 Loading on joint 1

Table 1: Loading [Part 1/2]

No.	Name	$N_{0,Ed}$ [kN]	$M_{y,0,Ed}$ [kNm]	$M_{z,0,Ed}$ [kNm]	$N_{1,Ed}$ [kN]
1	Construction state (steel joint only)	-464,1	0	0	-258,3

Table 1: Loading [Part 2/2]

$M_{\phi,1,Ed}$ [kNm]	$M_{\phi,1,Ed}$ [kNm]	$N_{2,Ed}$ [kN]	$M_{\phi,2,Ed}$ [kNm]	$M_{\phi,2,Ed}$ [kNm]
0	0	176,4	0	0

2.3 Results for joint 1

Remark: Member checks according to EN 1993-1-1 are not part of this calculation note.



Project:
Client:Page 4 / 5
10/09/2013

2.3.1 Normal force

2.3.1.1 Chord

Chord shear failure $N_{0,CSF} = 1852 \text{ kN}$

2.3.1.2 Brace 1

Chord face failure $N_{1,OFF} = 573,8 \text{ kN}$ Chord shear failure $N_{1,CSF} = 954,5 \text{ kN}$ Brace failure $N_{1,BF} = 422,4 \text{ kN}$ Punshing shear failure $N_{1,PSF} = 983,3 \text{ kN}$

2.3.1.3 Brace 2

Chord face failure $N_{2,OFF} = 573,8 \text{ kN}$ Chord shear failure $N_{2,CSF} = 954,5 \text{ kN}$ Brace failure $N_{2,BF} = 422,4 \text{ kN}$ Punshing shear failure $N_{2,PSF} = 983,3 \text{ kN}$

2.3.1.4 Summary

Resistance $N_{0,Rd} = 1852 \text{ kN}$ Resistance $N_{1,LRd} = 422,4 \text{ kN}$ Resistance $N_{1,CRd} = 422,4 \text{ kN}$ Resistance $N_{2,LRd} = 422,4 \text{ kN}$ Resistance $N_{2,CRd} = 422,4 \text{ kN}$

2.3.2 Check of welds

Thickness $t = 0 \text{ mm}$ Correlation factor $\beta_w = 0,85$ Yield strength $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$ Ultimate strength $f_u = 410 \text{ N/mm}^2$ Weld size $a = 5 \text{ mm}$ Required weld size $a_{req} = 4,031 \text{ mm}$ Check of required weld size $a \geq a_{req} = \sqrt{2} \cdot f_y / f_u \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} / \gamma_{M0} \cdot t_i$
Check OK

2.3.3 Joint checks

Table 2: Normal force in chord

LC	$N_{0,Ed}$	$N_{0,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	-464,1 kN	1852 kN	0,2506	OK

Table 3: Normal force in brace 1

LC	$N_{1,Ed}$	$N_{1,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	-258,3 kN	422,4 kN	0,6115	OK



Project:
Client:

Page 5 / 5
10/09/2013

Table 4: Normal force in brace 2

LC	$N_{2,Ed}$	$N_{2,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	176,4 kN	422,4 kN	0,4175	OK

3 References

- [1] CEN: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, December 2010
- [2] CEN: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, EN 1993-1-8:2005 + AC:2009, December 2010
- [3] CEN: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1994-1-1:2004, December 2004
- [4] Steel and composite building frames: sway response under conventional loading and development of membrane effects in beams further to an exceptional action, Jean-Francois Demonceau, PhD thesis, University of Liege, Belgium, 2008
- [5] European recommendations for the design of simple joints in steel structures, ECCS Technical committee 10 Structural connections, ECCS No. 126, 2009

4 Acknowledgements

This software - especially the part concerning lattice girder hollow section joints - is supported by:

Vallourec&Mannesmann Tubes
Theodorstr. 90
D-40472 Düsseldorf



C.2 INFORME RESULTADOS NUDO N°11

Project:
Client:

Page 1 / 5
03/09/2013

Design of joints

1 General

Project name
Project number
Comment

Client name
Client address

Company
Company address
Designer

Calculation in accordance with CEN EN 1993-1-8

Note: In the following calculations references to the Eurocodes are given. If the relevant part of Eurocode is not specified reference is made to EN 1993-1-8.

2 Description of joint configuration

Name: Lattice girder K/N-joint configuration (1)
 Comment:
 Configuration: Lattice girder K/N-joint configuration
 Connection type: Welded connection (lattice girder joint)
 Position number:
 Position name:
 Braced structure: No
 Ratio K_b/K_c greater or equal 0.1: Yes
 Global design procedure: Elastic

2.1 Data for joint 1

2.1.1 Safety factors

Safety factor γ_{MO} = 1
 Safety factor γ_{M5} = 1

2.1.2 Chord

Name HFRHS 120 x 8, S355
 Section height h = 120 mm
 Section width b = 120 mm
 Thickness t = 8 mm
 Inner radius r_1 = 8 mm

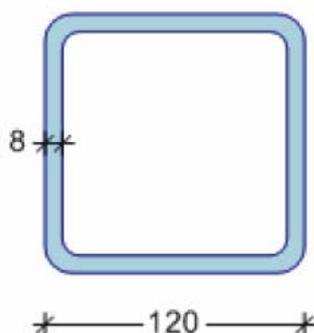


Project:
Client:

Page 2 / 5
03/09/2013

Outer radius	r_2	= 12 mm
Yield strength	f_y	= 355 N/mm ²
Ultimate strength	f_u	= 470 N/mm ²

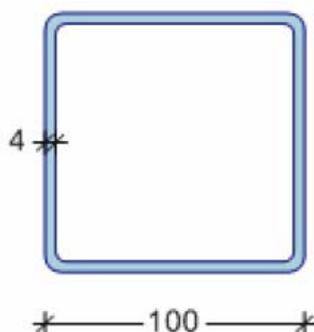
HFRHS 120 x 8



2.1.3 Brace 1

Name	HFRHS 100 x 4, S275	
Section height	h	= 100 mm
Section width	b	= 100 mm
Thickness	t	= 4 mm
Inner radius	r_1	= 4 mm
Outer radius	r_2	= 6 mm
Yield strength	f_y	= 275 N/mm ²
Ultimate strength	f_u	= 410 N/mm ²

HFRHS 100 x 4



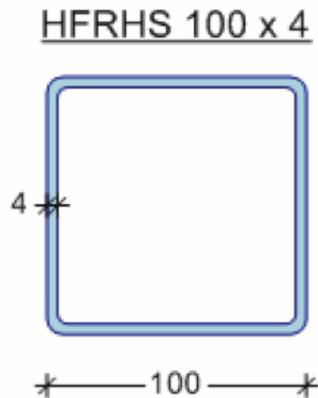
2.1.4 Brace 2

Name	HFRHS 100 x 4, S275	
Section height	h	= 100 mm



Project:
Client:Page 3 / 5
03/09/2013

Section width	b	=	100 mm
Thickness	t	=	4 mm
Inner radius	r1	=	4 mm
Outer radius	r2	=	6 mm
Yield strength	f _y	=	275 N/mm ²
Ultimate strength	f _u	=	410 N/mm ²



2.1.5 Welds

Weld size $a = 6 \text{ mm}$

2.2 Loading on joint 1

Table 1: Loading [Part 1/2]

No.	Name	N _{0,Ed} [kN]	M _{y,0,Ed} [kNm]	M _{z,0,Ed} [kNm]
1	Construction state (design state for steel joint only)	-313,5	0	0

Table 1: Loading [Part 2/2]

N _{1,Ed} [kN]	M _{p,1,Ed} [kNm]	M _{op,1,Ed} [kNm]	N _{2,Ed} [kN]	M _{p,2,Ed} [kNm]	M _{op,2,Ed} [kNm]
-258,3	0	0	258,7	0	0

2.3 Results for joint 1

Remark: Member checks according to EN 1993-1-1 are not part of this calculation note.

2.3.1 Normal force

2.3.1.1 Chord

Chord shear failure $N_{0,CSF} = 1179 \text{ kN}$



Project:
Client:Page 4 / 5
03/09/2013

2.3.1.2 Brace 1

Chord face failure	$N_{1,CFF}$	=	641,5 kN
Chord shear failure	$N_{1,CSF}$	=	636,1 kN
Brace failure	$N_{1,BF}$	=	422,4 kN
Punshing shear failure	$N_{1,PSF}$	=	1014 kN

2.3.1.3 Brace 2

Chord face failure	$N_{2,CFF}$	=	641,5 kN
Chord shear failure	$N_{2,CSF}$	=	636,1 kN
Brace failure	$N_{2,BF}$	=	422,4 kN
Punshing shear failure	$N_{2,PSF}$	=	1014 kN

2.3.1.4 Summary

Resistance	$N_{0,Rd}$	=	1179 kN
Resistance	$N_{1,L,Rd}$	=	422,4 kN
Resistance	$N_{1,c,Rd}$	=	422,4 kN
Resistance	$N_{2,l,Rd}$	=	422,4 kN
Resistance	$N_{2,c,Rd}$	=	422,4 kN

2.3.2 Check of welds

Thickness	t	=	0 mm
Correlation factor	β_w	=	0,85
Yield strength	f_y	=	275 N/mm ²
Ultimate strength	f_u	=	410 N/mm ²
Weld size	a	=	6 mm
Required weld size	a_{req}	=	4,031 mm
Check of required weld size	$a \geq a_{req} = \sqrt{2} \cdot f_y / f_u \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} / \gamma_{MO} \cdot t_s$		
	Check OK		

2.3.3 Joint checks

Table 2: Normal force in chord

LC	$N_{0,Ed}$	$N_{0,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	-313,5 kN	1179 kN	0,2658	OK

Table 3: Normal force in brace 1

LC	$N_{1,Ed}$	$N_{1,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	-258,3 kN	422,4 kN	0,6115	OK

Table 4: Normal force in brace 2

LC	$N_{2,Ed}$	$N_{2,Rd}$	Utilization factor	Design check
0	258,7 kN	422,4 kN	0,6125	OK



3 References

- [1] CEN: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, December 2010
- [2] CEN: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, EN 1993-1-8:2005 + AC:2009, December 2010
- [3] CEN: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1994-1-1:2004, December 2004
- [4] Steel and composite building frames: sway response under conventional loading and developmet of membrane effects in beams further to an exceptional action, Jean-Francois Demonceau, PhD thesis, University of Liege, Belgium, 2008
- [5] European recommendations for the design of simple joints in steel structures, ECCS Technical committee 10 Structural connections, ECCS No. 126, 2009

4 Acknowledgements

This software - especially the part concerning lattice girder hollow section joints - is supported by:

Vallourec&Mannesmann Tubes
Theodorstr. 90
D-40472 Düsseldorf



Anejo D

Informe de resultados de Autodesk Robot

D.1 INFORME RESULTADOS NUDO N°2

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011
Autor :
Dirección :
Archivo : PFC-2.rtd
Proyecto : PFC-2

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Cálculo de la unión en el nudo de la celosía
EN 1993-1-8:2005/AC:2009

OK
Ratio
0,61

B1 - GRD 100x4
B2 - GRD 100x4
M - RND 200x150x8

GENERAL

Unión N.º: 1
Nombre de la unión: Nudo de celosía de tubos

GEOMETRÍA

BARRAS

Fecha : 03/09/13
Página : 1

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Autor :

Dirección :

Archivo : PFC-2.rtd

Proyecto : PFC-2

		Cordón	Diagonal 1	Diagonal 2	Poste	
Perfil:		RHS 200X150X8	SHS 100X4	SHS 100X4		
	h	200	100	100		mm
	b_f	150	100	100		mm
	t_w	8	4	4		mm
	t_f	8	4	4		mm
	r	0	0	0		mm
Material:		S 355	S 275	S 275		
	f_y	355,00	275,00	275,00		MPa
	f_u	470,00	410,00	410,00		MPa
Angulo	θ	0,0	46,0	46,0		Deg
Longitud	l	1000	2000	2000		mm

EXCENTRICIDAD $e_0 = 0$ [mm] Excentricidad**DISTANCIAS** $g_2 = 55$ [mm] Distancia de la diagonal 2**SOLDADURAS** $a_d = 5$ [mm] Espesor de la soldadura de las diagonales**CARGAS**

Caso: Cálculos manuales.

CORDÓN $N_{01,Ed} = -166,75$ [kN] Esfuerzo axial $M_{01,Ed} = 0,00$ [kN*m] Momento flector $Q_{01,Ed} = 0,00$ [kN] Esfuerzo cortante $N_{02,Ed} = -464,13$ [kN] Esfuerzo axial $M_{02,Ed} = 0,00$ [kN*m] Momento flector $Q_{02,Ed} = 0,00$ [kN] Esfuerzo cortante**DIAGONAL 1** $N_1 = -258,34$ [kN] Esfuerzo axial $M_1 = 0,00$ [kN*m] Momento flector

Fecha : 03/09/13

Página : 2

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011	Archivo : PFC-2.rtd
Autor :	Proyecto : PFC-2
Dirección :	

DIAGONAL 2

$N_2 = 176,37$ [kN] Esfuerzo axial
 $M_2 = 0,00$ [kN*m] Momento flector

RESULTADOS

COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA EUROCODE 3: EN 1993-1-8:2005

$\gamma_{M5} = 1,00$ Coeficiente de seguridad parcial [Tabla 2.1]

DIAGONAL 2

$\beta = 0,67$ Coeficiente dependiente de la geometría de las barras de la unión $\beta = (b_2 + h_2 + b_1 + h_1) / (4 * b_0)$ [1.5 (6)]
 $k_n = 1,00$ Coeficiente dependiente de las tensiones en la correa $k_n = 1.0$
 $\gamma = 9,38$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.12]

$N_{2,Rd} = 573,80$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{2,Rd} = 8.9 * k_n * f_0 * t_0^{2.5} * \sqrt{\gamma} / \sin(\theta_2) * \beta / \gamma_{M5}$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|176,37| < 573,80$ **verificado** (0,31)

DIAGONAL 1

$\beta = 0,67$ Coeficiente dependiente de la geometría de las barras de la unión $\beta = (b_2 + h_2 + b_1 + h_1) / (4 * b_0)$ [1.5 (6)]
 $k_n = 1,00$ Coeficiente dependiente de las tensiones en la correa $k_n = 1.0$
 $\gamma = 9,38$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.12]

$N_{1,Rd} = 573,80$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{1,Rd} = 8.9 * k_n * f_0 * t_0^{2.5} * \sqrt{\gamma} / \sin(\theta_1) * \beta / \gamma_{M5}$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ $|-258,34| < 573,80$ **verificado** (0,45)

DIAGONAL 2

$\gamma = 9,38$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.12]

$N_{2,Rd} = 983,26$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{2,Rd} = f_0 * t_0 / (\sqrt{3 * \sin(\theta_2)}) * [2 * h_2 / \sin(\theta_2) + b_2 + b_{e,p}]$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|176,37| < 983,26$ **verificado** (0,18)

DIAGONAL 1

$\gamma = 9,38$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Autor :

Archivo : PFC-2.rtd

Dirección :

Proyecto : PFC-2

[Tabla 7.12]

 $N_{1,Rd} = 983,26$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{1,Rd} = f_0 \cdot t_0 / (\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_1)) \cdot [2 \cdot h_1 / \sin(\theta_1) + b_1 + b_{e,p}]$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ $|-258,34| < 983,26$ **verificado** (0,26)
DIAGONAL 2
 $b_{eff} = 100$ [mm] Anchura eficaz en la unión diagonal-correa $b_{eff} = b_2$

[Tabla 7.12]

 $N_{2,Rd} = 422,40$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{2,Rd} = f_2 \cdot t_2 \cdot (2 \cdot h_2 - 4 \cdot t_2 + 2 \cdot b_{eff}) / \gamma_{M5}$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|176,37| < 422,40$ **verificado** (0,42)
DIAGONAL 1
 $b_{eff} = 100$ [mm] Anchura eficaz en la unión diagonal-correa $b_{eff} = b_1$

[Tabla 7.12]

 $N_{1,Rd} = 422,40$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{1,Rd} = f_1 \cdot t_1 \cdot (2 \cdot h_1 - 4 \cdot t_1 + 2 \cdot b_{eff}) / \gamma_{M5}$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ $|-258,34| < 422,40$ **verificado** (0,61)
DIAGONAL 2
 $A_V = 33,50$ [cm²] Área del cizallamiento de la correa $A_V = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$

[Tabla 7.12]

 $N_{2,Rd} = 954,50$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{2,Rd} = f_0 \cdot A_V / [\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_2)] / \gamma_{M5}$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|176,37| < 954,50$ **verificado** (0,18)
CORDÓN

[Tabla 7.12]

 $N_{0,Rd} = 1766,62$ [kN] Resistencia de la correa $N_{0,Rd} = [(A_0 - A_V) \cdot f_0 + A_V \cdot f_0 \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2}] / \gamma_{M5}$
 $|N_{01}| \leq N_{0,Rd}$ $|-464,13| < 1766,62$ **verificado** (0,26)
DIAGONAL 1
 $A_V = 33,50$ [cm²] Área del cizallamiento de la correa $A_V = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$

[Tabla 7.12]

 $N_{1,Rd} = 954,50$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{1,Rd} = f_0 \cdot A_V / [\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_1)] / \gamma_{M5}$

Fecha : 03/09/13

Página : 4

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011	Archivo : PFC-2.rtd
Autor :	Proyecto : PFC-2
Dirección :	

$ N_1 \leq N_{1,Rd}$	$ -258,34 < 954,50$	verificado	(0,27)
CORDÓN			
[Tabla 7.12]			
$N_{0,Rd} = 1766,62$ [kN]	Resistencia de la correa	$N_{0,Rd} = [(A_0 - A_V) \cdot f_0 + A_V \cdot f_0 \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2}] / \gamma_{M5}$	
$ N_{02} \leq N_{0,Rd}$	$ -166,75 < 1766,62$	verificado	(0,09)
<u>VERIFICACIÓN DE LAS SOLDADURAS</u>			
DIAGONAL 2			
$\beta_w = 0,82$	Coefficiente de correlación		[Tabla 4.1]
$\gamma_{M2} = 1,25$	Coefficiente de seguridad parcial		[Tabla 2.1]
Soldadura longitudinal			
$\sigma_{\perp} = 37,53$ [MPa]	Tensión normal en la soldadura		
$\tau_{\perp} = 37,53$ [MPa]	Tensión tangente perpendicular		
$\tau_{\parallel} = 51,26$ [MPa]	Tensión tangente		
$ \sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{M2}$	$ 37,53 < 328,00$	verificado	(0,11)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	$116,26 < 397,58$	verificado	(0,29)
Soldadura transversal interior			
$\sigma_{\perp} = 40,77$ [MPa]	Tensión normal en la soldadura		
$\tau_{\perp} = 1,68$ [MPa]	Tensión tangente perpendicular		
$\tau_{\parallel} = 0,00$ [MPa]	Tensión tangente		
$ \sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{M2}$	$ 40,77 < 328,00$	verificado	(0,12)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	$40,87 < 397,58$	verificado	(0,10)
Soldadura transversal exterior			
$\sigma_{\perp} = 1,68$ [MPa]	Tensión normal en la soldadura		
$\tau_{\perp} = 40,77$ [MPa]	Tensión tangente perpendicular		
$\tau_{\parallel} = 0,00$ [MPa]	Tensión tangente		
$ \sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{M2}$	$ 1,68 < 328,00$	verificado	(0,01)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	$70,63 < 397,58$	verificado	(0,18)
DIAGONAL 1			
$\beta_w = 0,82$	Coefficiente de correlación		[Tabla 4.1]
$\gamma_{M2} = 1,25$	Coefficiente de seguridad parcial		[Tabla 2.1]
Fecha : 03/09/13		Página : 5	

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Autor :

Archivo : PFC-2.rtd

Dirección :

Proyecto : PFC-2

Soldadura longitudinal

 $\sigma_{\perp} = -54,98$ [MPa] Tensión normal en la soldadura $\tau_{\perp} = -54,98$ [MPa] Tensión tangente perpendicular $\tau_{\parallel} = -75,08$ [MPa] Tensión tangente $|\sigma_{\perp}| \leq f_u/\gamma_{M2}$ $|-54,98| < 328,00$ **verificado** (0,17) $\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w * \gamma_{M2})$ $170,30 < 397,58$ **verificado** (0,43)

Soldadura transversal interior

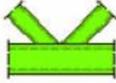
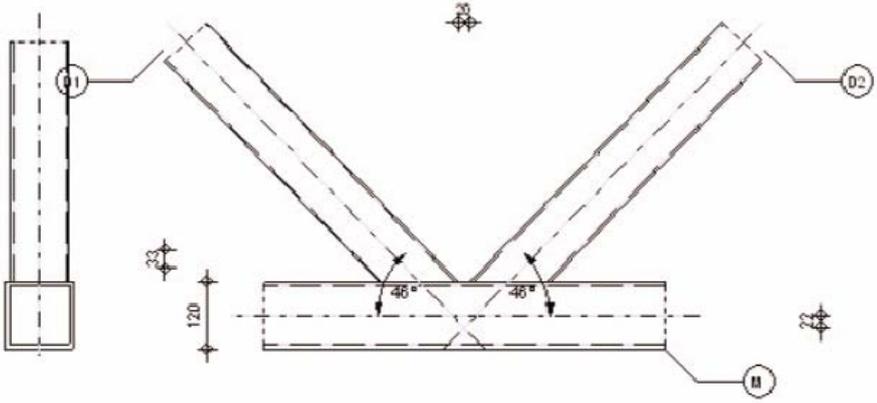
 $\sigma_{\perp} = -59,72$ [MPa] Tensión normal en la soldadura $\tau_{\perp} = -2,46$ [MPa] Tensión tangente perpendicular $\tau_{\parallel} = 0,00$ [MPa] Tensión tangente $|\sigma_{\perp}| \leq f_u/\gamma_{M2}$ $|-59,72| < 328,00$ **verificado** (0,18) $\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w * \gamma_{M2})$ $59,87 < 397,58$ **verificado** (0,15)

Soldadura transversal exterior

 $\sigma_{\perp} = -2,46$ [MPa] Tensión normal en la soldadura $\tau_{\perp} = -59,72$ [MPa] Tensión tangente perpendicular $\tau_{\parallel} = 0,00$ [MPa] Tensión tangente $|\sigma_{\perp}| \leq f_u/\gamma_{M2}$ $|-2,46| < 328,00$ **verificado** (0,01) $\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w * \gamma_{M2})$ $103,46 < 397,58$ **verificado** (0,26)**Unión conforme con la Norma****Ratio 0,61**

D.2 INFORME RESULTADOS NUDO N°11

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011	Archivo : PFC.rtd
Autor :	Proyecto : PFC
Dirección :	

	Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011	
Cálculo de la unión en el nudo de la celosía		Ratio
EN 1993-1-8:2005/AC:2009		0,43
<p>D1 - SHS 100x4 D2 - SHS 100x4 M - SHS 120x8</p> 		
GENERAL		
Unión N.º:	1	
Nombre de la unión:	Nudo de celosía de tubos	
GEOMETRÍA		
BARRAS		

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011
 Autor :
 Dirección :

Archivo : PFC.rtd
 Proyecto : PFC

		Cordón	Diagonal 1	Diagonal 2	Poste	
Perfil:		SHS 120X8	SHS 100X4	SHS 100X4		
	h	120	100	100		mm
	b_f	120	100	100		mm
	t_w	8	4	4		mm
	t_f	8	4	4		mm
	r	0	0	0		mm
Material:		S 355	S 275	S 275		
	f_y	355,00	275,00	275,00		MPa
	f_u	470,00	410,00	410,00		MPa
Angulo	θ	0,0	46,0	46,0		Deg
Longitud	l	1000	2000	2000		mm

EXCENTRICIDAD

$e_0 = 22$ [mm] Excentricidad

DISTANCIAS

$g_2 = 20$ [mm] Distancia de la diagonal 2

SOLDADURAS

$a_d = 5$ [mm] Espesor de la soldadura de las diagonales

CARGAS

Caso: Cálculos manuales.

CORDÓN

$N_{01,Ed} = -61,05$ [kN] Esfuerzo axial

$M_{01,Ed} = 0,00$ [kN*m] Momento flector

$Q_{01,Ed} = 0,00$ [kN] Esfuerzo cortante

$N_{02,Ed} = 313,46$ [kN] Esfuerzo axial

$M_{02,Ed} = 0,00$ [kN*m] Momento flector

$Q_{02,Ed} = 0,00$ [kN] Esfuerzo cortante

DIAGONAL 1

$N_1 = 258,74$ [kN] Esfuerzo axial

$M_1 = 0,00$ [kN*m] Momento flector

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011	Archivo : PFC.rtd
Autor :	Proyecto : PFC
Dirección :	

DIAGONAL 2

$N_2 = -258,34$ [kN] Esfuerzo axial
 $M_2 = 0,00$ [kN*m] Momento flector

RESULTADOS

COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA EUROCODE 3: EN 1993-1-8:2005

$\gamma_{M5} = 1,00$ Coeficiente de seguridad parcial [Tabla 2.1]

DIAGONAL 2

$\beta = 0,83$ Coeficiente dependiente de la geometría de las barras de la unión $\beta = (b_2 + b_1) / (2 * b_0)$ [1.5 (6)]
 $k_n = 1,00$ Coeficiente dependiente de las tensiones en la correa $k_n = 1.0$
 $\gamma = 7,50$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.10]

$N_{2,Rd} = 641,53$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{2,Rd} = 8.9 * k_n * f_0 * t_0^{2 * \sqrt{\gamma} / \sin(\theta_2)} * \beta$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|-258,34| < 641,53$ **verificado** (0,40)

DIAGONAL 1

$\beta = 0,83$ Coeficiente dependiente de la geometría de las barras de la unión $\beta = (b_2 + b_1) / (2 * b_0)$ [1.5 (6)]
 $k_n = 1,00$ Coeficiente dependiente de las tensiones en la correa $k_n = 1.0$
 $\gamma = 7,50$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.10]

$N_{1,Rd} = 641,53$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{1,Rd} = 8.9 * k_n * f_0 * t_0^{2 * \sqrt{\gamma} / \sin(\theta_1)} * \beta$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ $|258,74| < 641,53$ **verificado** (0,40)

DIAGONAL 2

$\gamma = 7,50$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

[Tabla 7.10]

$N_{2,Rd} = 1013,65$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{2,Rd} = f_0 * t_0 / (\sqrt{3 * \sin(\theta_2)}) * [2 * h_2 / \sin(\theta_2) + b_2 + b_{e,p}]$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ $|-258,34| < 1013,65$ **verificado** (0,25)

DIAGONAL 1

$\gamma = 7,50$ Coeficiente dependiente de la geometría de la correa $\gamma = b_0 / (2 * t_0)$ [1.5 (6)]

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Autor :

Archivo : PFC.rtd

Dirección :

Proyecto : PFC

[Tabla 7.10]

 $N_{1,Rd} = 1013,65$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{1,Rd} = f_0 \cdot t_0 / (\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_1)) \cdot [2 \cdot h_1 / \sin(\theta_1) + b_1 + b_{e,p}]$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ |258,74| < 1013,65 **verificado** (0,26)
DIAGONAL 2
 $A_V = 22,34$ [cm²] Área del cizallamiento de la correa $A_V = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$

[Tabla 7.12]

 $N_{2,Rd} = 636,59$ [kN] Resistencia a la compresión $N_{2,Rd} = f_0 \cdot A_V / [\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_2)] / \gamma_{M5}$
 $|N_2| \leq N_{2,Rd}$ |-258,34| < 636,59 **verificado** (0,41)
CORDÓN

[Tabla 7.12]

 $N_{0,Rd} = 941,81$ [kN] Resistencia de la correa $N_{0,Rd} = [(A_0 - A_V) \cdot f_0 + A_V \cdot f_0 \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2}] / \gamma_{M5}$
 $|N_{01}| \leq N_{0,Rd}$ |313,46| < 941,81 **verificado** (0,33)
DIAGONAL 1
 $A_V = 22,34$ [cm²] Área del cizallamiento de la correa $A_V = (2 \cdot h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$

[Tabla 7.12]

 $N_{1,Rd} = 636,59$ [kN] Resistencia a la tracción $N_{1,Rd} = f_0 \cdot A_V / [\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_1)] / \gamma_{M5}$
 $|N_1| \leq N_{1,Rd}$ |258,74| < 636,59 **verificado** (0,41)
CORDÓN

[Tabla 7.12]

 $N_{0,Rd} = 941,81$ [kN] Resistencia de la correa $N_{0,Rd} = [(A_0 - A_V) \cdot f_0 + A_V \cdot f_0 \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2}] / \gamma_{M5}$
 $|N_{02}| \leq N_{0,Rd}$ |-61,05| < 941,81 **verificado** (0,06)
VERIFICACIÓN DE LAS SOLDADURAS**DIAGONAL 2**
 $\beta_w = 0,82$ Coeficiente de correlación [Tabla 4.1]

 $\gamma_{M2} = 1,25$ Coeficiente de seguridad parcial [Tabla 2.1]

Soldadura longitudinal

Fecha : 03/09/13

Página : 4

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011

Autor :

Archivo : PFC.rtd

Dirección :

Proyecto : PFC

$\sigma_{\perp} =$	-54,98	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	-54,98	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	-75,08	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2}$	$ -54,98 < 328,00$	verificado	(0,17)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w*\gamma_{M2})$	$170,30 < 397,58$	verificado	(0,43)

Soldadura transversal interior

$\sigma_{\perp} =$	-59,72	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	-2,46	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	0,00	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2}$	$ -59,72 < 328,00$	verificado	(0,18)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w*\gamma_{M2})$	$59,87 < 397,58$	verificado	(0,15)

Soldadura transversal exterior

$\sigma_{\perp} =$	-2,46	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	-59,72	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	0,00	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2}$	$ -2,46 < 328,00$	verificado	(0,01)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w*\gamma_{M2})$	$103,46 < 397,58$	verificado	(0,26)

DIAGONAL 1

$\beta_w =$	0,82	Coefficiente de correlación	[Tabla 4.1]
$\gamma_{M2} =$	1,25	Coefficiente de seguridad parcial	[Tabla 2.1]

Soldadura longitudinal

$\sigma_{\perp} =$	55,06	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	55,06	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	75,20	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2}$	$ 55,06 < 328,00$	verificado	(0,17)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w*\gamma_{M2})$	$170,56 < 397,58$	verificado	(0,43)

Soldadura transversal interior

$\sigma_{\perp} =$	59,81	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	2,46	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	0,00	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2}$	$ 59,81 < 328,00$	verificado	(0,18)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3*(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u/(\beta_w*\gamma_{M2})$	$59,96 < 397,58$	verificado	(0,15)

Soldadura transversal exterior

Fecha : 03/09/13

Página : 5

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011
 Autor :
 Dirección :

Archivo : PFG.rtd
 Proyecto : PFC

$\sigma_{\perp} =$	2,46	[MPa]	Tensión normal en la soldadura
$\tau_{\perp} =$	59,81	[MPa]	Tensión tangente perpendicular
$\tau_{\parallel} =$	0,00	[MPa]	Tensión tangente
$ \sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{M2}$	2,46	< 328,00	verificado (0,01)
$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$	103,62	< 397,58	verificado (0,26)

NOTAS

La razón excentricidad de las barras / anchura del cordón es demasiado pequeña 0,08 < 0,08

Unión conforme con la Norma

Ratio 0,43