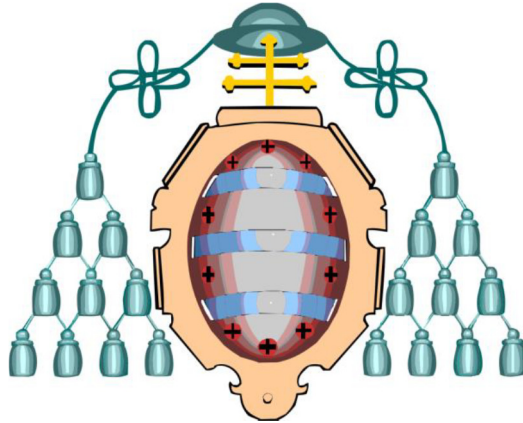


UNIVERSIDAD DE OVIEDO

TESIS DOCTORAL



**Programa de doctorado: Diseño, Construcción y
Fabricación en la Ingeniería**

**METODOLOGÍA EFICIENTE PARA OPTIMIZACIÓN DE
PÓRTICOS INDUSTRIALES EN VIGA ARMADA SEGÚN EC-3**

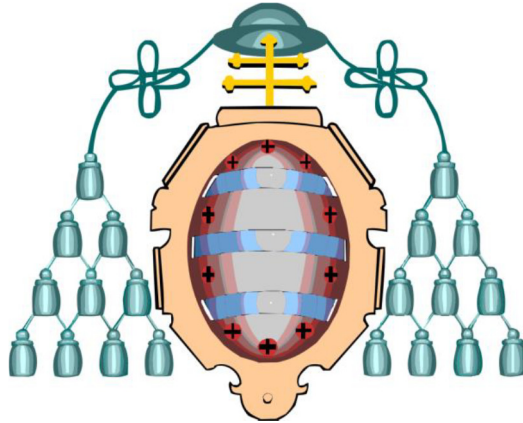
AUTOR

Francisco Javier González Blanco

Gijón 2015

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

TESIS DOCTORAL



**Programa de doctorado: Diseño, Construcción y
Fabricación en la Ingeniería**

**METODOLOGÍA EFICIENTE PARA OPTIMIZACIÓN DE
PÓRTICOS INDUSTRIALES EN VIGA ARMADA SEGÚN EC-3**

AUTOR

Fco Javier González Blanco

DIRECTORES

Juan José Del Coz Díaz

Felipe Pedro Álvarez Rabanal

Gijón 2015



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Metodología eficiente para optimización de pórticos industriales en viga armada según EC-3	Inglés: Efficient methodology for optimization of portal frames, made of welded profiles, according to EC-3
2.- Autor	
Nombre: Javier González Blanco	DNI/Pasaporte/NIE: -M
Programa de Doctorado: Diseño, Construcción y Fabricación en la Ingeniería	
Órgano responsable:	

RESUMEN (en español)

En la actualidad existe una amplia variedad de software informático que permite el cálculo, y en algunos casos la optimización, de perfiles metálicos laminados en caliente. Las herramientas más ampliamente difundidas y empleadas por los fabricantes de estructuras metálicas así como las Ingenierías especializadas en el diseño de estructuras metálicas son los programas de cálculo de estructuras, SAP2000, ROBOT, TRICALC, CYPE, POWER FRAME. No obstante, ninguno de los programas informáticos ni métodos de cálculo actuales resuelven de modo eficiente el diseño de pórticos industriales en viga armada. Ello es debido a que los pórticos industriales poseen unas características especiales, que una vez identificadas, permiten desarrollar una metodología eficiente para diseño de estas estructuras.

En la presente Tesis Doctoral, se aborda el estudio de un tipo particular de estructura: pórticos en viga armada, la cual es la tipología más empleada en las estructuras metálicas de naves industriales. El correcto diseño y optimización de estas estructuras permite ahorros de costes muy importantes. La mayor parte de los proyectistas no diseñan con este tipo de perfiles principalmente por una falta de conocimiento y metodología concreta de cálculo.

En esta tesis doctoral se abordan los tipos de secciones a usar y se hace un estudio comparativo de costes con el perfil comercial. También se desarrolla una tipología de pórticos y una metodología eficiente de cálculo y optimización.

Para conseguir este objetivo se ha diseñado una base de datos de perfiles armados de inercia tanto constante como variable. Se han estudiado las tipologías de pórticos industriales que mejor se adaptan a las cargas que solicitan a este tipo de construcción. Se ha desarrollado una interface gráfica de entrada de datos y un algoritmo eficiente de optimización basado en el cumplimiento de los ELS y ELU del código de aplicación.

El algoritmo de optimización tiene como función objetivo minimizar una función de coste del producto terminado. Como variables de diseño se han empleado variables discretas correspondientes a los espesores, anchos de chapa, cantos de perfil, etc. Para resolver la simulación numérica se ha desarrollado un procesador para elementos finitos tipo barra, en primer y segundo orden.

La solución encontrada por el algoritmo se ha contrastado con un modelo de elementos finitos tipo lámina realizado en ANSYS, observándose una excelente aproximación.

A continuación, una vez validado el procedimiento, se han resuelto una decena de casos



con diferentes tipologías de pórticos en viga armada, para una variedad de luces entre 20 y 80 m, con diferentes casos de carga, siendo estos casos suficientemente representativos del rango habitual de luces y cargas en el que desarrollan las instalaciones industriales.

Por último, se exponen las conclusiones y líneas futuras más importantes de esta Tesis Doctoral

RESUMEN (en Inglés)

At present, different computer software is used to analyze steel structures and, in some instances, do optimization. The tools most widely used by manufacturers of steel structures and engineers are the following programs: SAP2000, ROBOT, TRICALC, CYPE, POWER FRAME. However, neither the software is able to solve efficiently the design of portal frames made of welded profiles. This is due to the specific properties of portal frames.

In this Doctoral Thesis, the study of a specific structure configuration is discussed. The correct design and optimization of these structures allows a very significant cost savings. Most designers do not design this type of profiles mainly due to lack of knowledge and specific calculation methodology.

In this dissertation the cross section used is presented. Furthermore, a comparative cost is addressed with the hot rolled profile. A typology of portal frames and efficient methodology for calculation and optimization is also developed.

To achieve this goal a specific welded profiles database is developed, including both constant and variable inertia cross sections. We have also studied the physical models of portal frames more suitable of support dead and live loads. A graphical interface was developed for data entry and an efficient optimization algorithm based on the requirements of standard rules (both ULS and SLS).

The optimization algorithm aims to minimize an objective function based on the cost of the finished product. The following design variables have been used: thicknesses, plate width, plate high, and so on. To solve numerically the portal frame a beam finite element is developed, including first and second order effects.

The solution found by the algorithm has been compared with a shell finite element model developed in ANSYS program, showing an excellent approximation.

Then, once the procedures is validated, a dozen different geometrical models with different types of portal frames, with a span ranging from 20 to 80 meters and different loads are analyzed.

Finally, the most important conclusions and future trends of this Thesis are discussed

AGRADECIMIENTOS

A mi Director de Tesis y excelente persona, Juan José del Coz, por animarme a realizar el programa de doctorado tras ya de 18 años de profesión, y por haber sido siempre una fuente de inspiración profesional y personal.

A mi Director de Tesis Felipe Pedro Álvarez Rabanal por sus valiosas aportaciones.

A mi madre por su permanente sacrificio y por los constantes ánimos que siempre me dio para que pudiese obtener unos estudios y tener una vida mejor que la que a ella le tocó vivir.

A mi mujer y a mis hijos por las horas que no les he dedicado, los fines de semana de trabajo y por las escasas vacaciones que hemos pasado juntos nosotros cuatro y el ordenador que siempre nos acompaña.

A todos aquellos profesionales que me han apoyado y confiado en mí, y también a los que me han puesto obstáculos porque esos obstáculos me han motivado a esforzarme más para superarlos, en muchos casos me han inspirado y en todos los casos me han hecho aprender, ese aprendizaje siempre ha contribuido a realizar un trabajo mejor.

RESUMEN

En la actualidad existe una amplia variedad de software informático que permite el cálculo, y en algunos casos la optimización, de perfiles metálicos laminados en caliente. Las herramientas más ampliamente difundidas y empleadas por los fabricantes de estructuras metálicas, así como las Ingenierías especializadas en el diseño de estructuras metálicas, son los programas de cálculo de estructuras SAP2000, ROBOT, TRICALC, CYPE, POWER FRAME. No obstante, ninguno de los programas informáticos ni métodos de cálculo actuales resuelven de modo eficiente y construible el diseño de pórticos industriales en viga armada. Ello es debido a que los pórticos industriales poseen unas características especiales, que una vez identificadas, permiten desarrollar una metodología eficiente para el diseño de estas estructuras.

En la presente Tesis Doctoral se aborda el estudio de un tipo particular de estructura, pórticos en viga armada, la cual es la tipología más empleada en las estructuras metálicas de naves industriales. El correcto diseño y optimización de estas estructuras permite ahorros de costes muy importantes. La mayor parte de los proyectistas no diseñan con este tipo de perfiles principalmente por una falta de conocimiento y metodología concreta de cálculo. La metodología desarrollada en esta tesis es aplicable a pórticos simples, pórticos adosados, de la misma altura o de diferentes alturas, a un agua, dos aguas o múltiples aguas, con puente grúa o sin puente grúa.

En esta Tesis Doctoral se abordan los tipos de secciones armadas a usar. Se hace un estudio comparativo de costes con el perfil comercial estableciendo criterios para definir cuándo es más económico usar perfil comercial laminado en caliente o viga armada. También se desarrolla una tipología de pórticos y una metodología eficiente de cálculo y optimización. Se establecen criterios de vinculación entre el pórtico y la cimentación para minimizar también el coste de la cimentación.

Para conseguir este objetivo se ha diseñado una base de datos de perfiles armados de inercia tanto constante como variable. Se han estudiado las tipologías de pórticos industriales que mejor se adaptan a las cargas que solicitan a este tipo de construcción. Se ha desarrollado una interface gráfica de entrada de datos y un algoritmo eficiente de optimización basado en el cumplimiento de los ELS y ELU del código de aplicación.

El algoritmo de optimización tiene como función objetivo minimizar una función de coste del producto terminado. Como variables de diseño se han empleado variables discretas correspondientes a los espesores, anchos de chapa, cantos de perfil, etc. Para la introducción de datos y salida de resultados se ha diseñado una interface gráfica rápida de usar e intuitiva.

Para resolver la simulación numérica se ha desarrollado un procesador para elementos finitos tipo barra, en primer y segundo orden, usando seis grados de libertad por nodo. El procesador trata los casos de vigas de inercia constante y también de inercia variable.

La solución encontrada por el algoritmo se ha contrastado con un modelo de elementos finitos tipo lámina realizado en el programa de elementos finitos ANSYS, observándose una excelente aproximación.

A continuación, una vez validado el procedimiento, se han resuelto una decena de casos con diferentes tipologías de pórticos en viga armada, para una variedad de luces entre 20 y 80 m, con diferentes casos de carga, siendo estos casos suficientemente representativos del rango habitual de luces y cargas en el que desarrollan las instalaciones industriales.

Por último, se exponen las conclusiones y líneas futuras más importantes de esta Tesis Doctoral

INDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS DE LA TESIS	2
1.3	LA NECESIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DE PÓRTICOS INDUSTRIALES EN VIGA ARMADA.....	4
1.4	ESTRUCTURA DE LA TESIS	9
2.	ESTADO DEL ARTE	11
2.1	EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	11
2.2	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	12
2.2.1	<i>Algoritmos Evolutivos</i>	13
2.2.2	<i>Programación matemática</i>	16
2.3	SOFTWARE Y PROGRAMAS COMERCIALES DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	19
3.	OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	21
3.1	INTRODUCCIÓN.....	21
3.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	21
3.2.1	<i>Variables de diseño</i>	22
3.2.2	<i>Restricciones</i>	24
3.2.3	<i>Parámetros</i>	25
3.2.4	<i>Espacio de representación de diseño</i>	25
3.2.5	<i>Función objetivo</i>	26
3.2.6	<i>Formulación estándar</i>	26
3.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DISCRETOS.....	27
3.4	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	28
4.	ALGORITMO DE OPTIMIZACION HEURISTICO.....	29
4.1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	29
4.2	ESTABLECIMIENTO Y DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	29
4.2.1	<i>Introducción. Condiciones geométricas</i>	29
4.2.2	<i>Definición de la geometría del pórtico</i>	30
4.2.3	<i>Definición de las condiciones de apoyo</i>	37
4.2.4	<i>Definición de perfiles armados doble T. Secciones eficientes en viga armada</i>	39
4.2.5	<i>Definición de anchos de ala y cantos de alma</i>	45
4.2.6	<i>Definición de espesores</i>	46
4.2.7	<i>Definición de las variables de coste en fabricación</i>	50
4.3	CODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	82
4.4	PARÁMETROS DEL PROBLEMA Y RESTRICCIONES. INTERFACE DE ENTRADA	84
4.5	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	87
4.5.1	<i>Introducción</i>	87
4.5.2	<i>Descripción general del Algoritmo</i>	87
4.5.3	<i>Diagrama de Flujo del Algoritmo</i>	97
4.6	MÓDULO DE ENTRADA DE DATOS.....	99
4.7	CARGAS Y COMBINACIONES.....	104

4.7.1	<i>Hipótesis de Carga</i>	104
4.7.2	<i>Combinación de hipótesis</i>	107
4.8	CONTRASTE DE RESULTADOS	114
5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A DIFERENTES CASOS REALES	123
	CASO 1. NAVE DE 32M DE LUZ, 14M DE ALTURA AL ALERO, PUENTE GRÚA DE 20TM. UBICACIÓN EN BILBAO.	123
	CASO 2. NAVE DE 30M DE LUZ, 8.5M DE ALTURA AL ALERO. UBICACIÓN EN AVILÉS.	124
	CASO 3. NAVE DE 26M DE LUZ, 8M DE ALTURA AL ALERO. UBICACIÓN EN PONFERRADA.	126
	CASO 4. NAVE DE 80M DE LUZ, 10M DE ALTURA AL ALERO. UBICACIÓN EN AVILÉS.	127
	CASO 5. DOS PÓRTICOS ADOSADOS, UBICADOS EN SANTANDER, 14,45M AL ALERO, AMBOS CON PUENTE GRÚA DE 20TM.	128
	CASO 6. PÓRTICO EN PERFIL LAMINADO EN CALIENTE, UBICADO EN GIJÓN, 8M AL ALERO, LUZ 22M Y SIN PG.	131
	CASO 7. PÓRTICO EN PERFIL LAMINADO EN CALIENTE, UBICADO EN MADRID, 8M AL ALERO, LUZ 22M Y SIN PG.	132
	CASO 8. PÓRTICO EN VIGA ARMADA, UBICADO EN ASTURIAS, EN ENTORNO RURAL. 6.17M AL ALERO, LUZ 30.55M, PENDIENTE DE LA CUBIERTA 25%	133
	CASO 9. DOS PÓRTICOS ADOSADOS EN VIGA ARMADA, UBICADO EN GRAN CANARIA, EN ENTORNO RURAL. 10.60M AL ALERO, LUZ 36.876M, PENDIENTE DE LA CUBIERTA 8%	135
	CASO 10. PÓRTICO A UN AGUA EN VIGA ARMADA, UBICADO EN RUBIANA (LEÓN), EN ENTORNO INDUSTRIAL 9.0M AL ALERO, LUZ 32M, PENDIENTE DE LA CUBIERTA 10%	136
6	CONCLUSIONES	138
7	LINEAS FUTURAS	141
8	AGRADECIMIENTOS OFICIALES	144
9	BIBIOGRAFIA	145
	ANEXO I. ALGORITMO DE COMPROBACIÓN DE BARRAS SEGÚN EC-3.	149
	ANEXO II. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “REFINADINTELES”	151
	ANEXO III. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “REFINAPILARES”	152
	ANEXO IV. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “BUSCACANTONERAVARIABLE”	153

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARATIVA SOFTWARE COMERCIAL	20
TABLA 2. PERFILES ARMADOS EN DOBLE T. COMPARATIVA DE AHORRO EN PESO CON EQUIVALENTE COMERCIAL.....	42
TABLA 3. ALAS DE PERFILES ARMADOS	45
TABLA 4. CANTOS DE ALMAS CONSTANTES DE VIGA ARMADA	45
TABLA 5. CHAPA PLANA EN FORMATO COMERCIAL	46
TABLA 6. BOBINA EN FORMATO COMERCIAL	47
TABLA 7. FLEJE COMERCIAL	48
TABLA 8. ALMAS VARIABLES PARA FABRICACIÓN DE VIGA ARMADA	49
TABLA 9. RECURSOS PARA COLOCAR CHAPA EN BANCADA DE CORTE	55
TABLA 10. TIEMPO DE CICLO DE CORTE	56
TABLA 11. TIEMPOS DE EXTRACCIÓN DE CHAPAS CORTADAS.....	56
TABLA 12. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A 2 CARAS	59
TABLA 13. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A 2 CARAS (CONTINUACIÓN 1).....	60
TABLA 14. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A DOS CARAS (CONTINUACIÓN 2)	61
TABLA 15. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A DOS CARAS (CONTINUACIÓN 3).....	62
TABLA 16. COSTES DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA 4 SOLDADURAS.....	63
TABLA 17. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A UNA CARA.....	66
TABLA 18. ACTIVIDADES, RECURSOS Y TIEMPOS DE FABRICACIÓN VIGA ARMADA CON SOLDADURA A UNA CARA (CONTINUACIÓN).....	67
TABLA 19. COSTES DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA 2 SOLDADURAS.....	68
TABLA 20. ACTIVIDADES Y TIEMPOS DE EMPALME DE VIGAS A TOPE	75
TABLA 21. TIEMPOS DE EMPALME A TOPE EN FUNCIÓN DEL PESO DE LA VIGA POR METRO LINEAL	75
TABLA 22. COSTES DE CHAPA PARA FABRICACIÓN DE VIGA ARMADA [€/Tm]	77
TABLA 23. COSTE DE EMPALME DE PERFILES DOBLE T	78
TABLA 24. COSTE DE EMPALME DE PERFILES DOBLE T (CONTINUACIÓN)	79
TABLA 25. VALORES LÍMITE FLECHA ACTIVA VERTICAL	95
TABLA 26. VALORES LÍMITE FLECHA HORIZONTAL.....	95
TABLA 27. CONFIGURACIÓN DE LÍMITES DE FLECHA EN EL INTERFACE GRÁFICO DE ENTRADA DE DATOS.....	96
TABLA 28. COEFICIENTES DE PONDERACIÓN DE ACCIONES	109
TABLA 29. COEFICIENTES DE SIMULTANEIDAD DE ACCIONES	110
TABLA 30. COMBINACIONES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO	112
TABLA 31. COMBINACIONES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (CONTINUACIÓN)	113
TABLA 32. TABLA DE MEDICIONES DEL PÓRTICO DE COMPARACIÓN	115
TABLA 33. ENTRADA DE DATOS EN ANSYS	117
TABLA 34. COMPARATIVA DE RESULTADOS ANSYS FRENTE A RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	121
TABLA 35. COMPARATIVA DE RESULTADOS ANSYS FRENTE A RESULTADOS OBTENIDOS CON ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DESCONTANDO EL EFECTO DEL PANDEO	122
TABLA 36. RESULTADOS CASO 1	124
TABLA 37. RESULTADOS CASO 2	125
TABLA 38. NUEVOS RESULTADOS CASO 2.....	126
TABLA 39. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 3	126

TABLA 40. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 4	128
TABLA 41. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 5	129
TABLA 42. RESULTADOS OBTENIDOS, SEGUNDA OPCIÓN, CASO 5.....	130
TABLA 43. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 8.....	134
TABLA 44. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 9	136
TABLA 45. RESULTADOS OBTENIDOS CASO 10	137

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VISTA GENERAL MÁQUINA DE ARMADO	5
FIGURA 2. SALIDA DE LA PIEZA ARMADA.....	5
FIGURA 3. ENTRADA DE LA PIEZA Y ARCOS DE SOLDADURA	6
FIGURA 4. DOBLES T REALIZADAS CON SOLDADURA POR FUSIÓN SIN APORTE DE MATERIAL.....	7
FIGURA 5. MÉTRICAS DE CÓDIGO DEL PROGRAMA ELASTIK	10
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DE ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	13
FIGURA 7. ESPACIO BIDIMENSIONAL	27
FIGURA 8. PARTES DEL PÓRTICO EN VIGA ARMADA	31
FIGURA 9. DINTEL TIPO 1	31
FIGURA 10. DINTEL TIPO 2.....	32
FIGURA 11. DINTEL TIPO 4.....	33
FIGURA 12. PILAR TIPO 1	34
FIGURA 13. BASE DE PILAR TIPO 1	34
FIGURA 14. PILAR TIPO 2.....	35
FIGURA 15. PILAR TIPO 3	36
FIGURA 16. BASE TIPO PILAR EMPOTRADO EN CIMENTACIÓN	36
FIGURA 17. PÓRTICO ARTICULADO CONDICIONADO POR ELS	38
FIGURA 18. PÓRTICO EMPOTRADO CONDICIONADO POR ELU	38
FIGURA 19. RESULTADO DE COMPROBACIÓN DE VIGA ARMADA EFICIENTE	39
FIGURA 20. PROPIEDADES MECÁNICAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE VIGA ARMADA EFICIENTE	40
FIGURA 21. RESULTADO DE COMPROBACIÓN DE VIGA ARMADA NO EFICIENTE	40
FIGURA 22. PROPIEDADES MECÁNICAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE VIGA ARMADA NO EFICIENTE	41
FIGURA 23. CHAPA PLANA PARA FABRICACIÓN DE VIGA ARMADA	46
FIGURA 24. BOBINA PARA FABRICACIÓN DE VIGA ARMADA	47
FIGURA 25. ESQUEMA 1 PARA CORTE DE ALMAS PROCEDENTES DE CHAPA COMERCIAL	48
FIGURA 26. ESQUEMA 2 PARA CORTE DE ALMAS PROCEDENTES DE CHAPA COMERCIAL	49
FIGURA 27. APLICACIÓN DE VIGA DE INERCIA VARIABLE EN PÓRTICO ARMADO.	50
FIGURA 28. TUBO COMERCIAL	50
FIGURA 29. TUBO ARMADO	50
FIGURA 30. TUBO ARMADO FORMADO POR SOLDADURAS EN ÁNGULO	51
FIGURA 31. PERFIL LAMINADO EN CALIENTE	51
FIGURA 32. DOBLE T ARMADA SOLDADA A DOS CARAS	51
FIGURA 33. DOBLE T ARMADA A UNA CARA.....	52
FIGURA 34. REDUCCIÓN DE PERFIL.....	52
FIGURA 35. EMPALME DE PERFILES DE DIFERENTE CANTO CON CHAPA FRONTAL.....	53
FIGURA 36. OXICORTE CON MÚLTIPLES SOPLETES PARA CORTE SIMULTANEO	53
FIGURA 37. PLATABANDA PARA ALIMENTAR OXICORTE	54
FIGURA 38. COLOCACIÓN DE CHAPA EN BANCADA DE CORTE	55
FIGURA 39. DOBLE T ARMADA.....	57
FIGURA 40. MÁQUINA DE ARMADO DE VIGA ARMADA.....	58
FIGURA 41. SOLDADURA DE PIEZA EN MÁQUINA DE ARMADO	58
FIGURA 42. DOBLE T ARMADA 2 SOLDADURAS	65
FIGURA 43. SOLDADURA CON ARCO SUMERGIDO DE VIGA ARMADA.....	65
FIGURA 44. ESQUEMA DE EMPALME A TOPE DE VIGAS	73
FIGURA 45. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA SOLDADURA A TOPE	74
FIGURA 46. PARÁMETROS DE COSTE DE LA UNIÓN SOLDADA	81
FIGURA 47. ESQUEMA DE PARÁMETROS EN EL INTERFACE GRÁFICO DE ENTRADA DE DATOS	86
FIGURA 48. ELEMENTOS QUE COMPONEN EL PÓRTICO GENERAL	89

FIGURA 49. PARÁMETROS DE INTRODUCCIÓN DE CARGAS EN EL INTERFACE GRÁFICO. CARGA PERMANENTE	90
FIGURA 50. PARÁMETROS DE INTRODUCCIÓN DE CARGAS EN EL INTERFACE GRÁFICO. SOBRECARGA DE USO	91
FIGURA 51. PARÁMETROS DE INTRODUCCIÓN DE CARGAS EN EL INTERFACE GRÁFICO. SOBRECARGA DE VIENTO	92
FIGURA 52. DIAGRAMA DE FLUJO DE ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICO	98
FIGURA 53. INTERFACE GRÁFICO DE ENTRADA DE DATOS	99
FIGURA 54. MAPA PARA LA CAPTURA DE DATOS CLIMÁTICOS DE VIENTO	101
FIGURA 55. MAPA PARA LA CAPTURA DE DATOS CLIMÁTICOS DE NIEVE	101
FIGURA 56. PÓRTICO A 2 AGUAS CON UNA CRUJÍA	102
FIGURA 57. PÓRTICO A 2 AGUAS CON DOS CRUJÍAS	102
FIGURA 58. PÓRTICO MÚLTIPLE A DOS AGUAS Y DOS CRUJÍAS	102
FIGURA 59. RESULTADOS DE APROVECHAMIENTO OBTENIDO, PESOS POR PÓRTICO Y SUPERFICIE DE PINTURA	103
FIGURA 60. GRÁFICO DE APROVECHAMIENTO DE SECCIONES. REPRESENTACIÓN POR COLORES	104
FIGURA 61. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CARGA PERMANENTE DE CUBIERTA.....	104
FIGURA 62. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA SOBRECARGA EN CUBIERTA	105
FIGURA 63. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA HIPÓTESIS 4 DE VIENTO	105
FIGURA 64. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL VIENTO X-. OPCIÓN A	106
FIGURA 65. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL VIENTO X+. OPCIÓN B	106
FIGURA 66. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL VIENTO X-. OPCIÓN B.....	106
FIGURA 67. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CARGA DE TEMPERATURA.....	107
FIGURA 68. PÓRTICO RESULTANTE DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN. USADO PARA COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ANSYS.....	114
FIGURA 69. COMPROBACIÓN DETALLADA DE LA BARRA SITUADA EN LA PARTE SUPERIOR DEL PILAR	115
FIGURA 70. REPRESENTACIÓN, POR COLORES, DEL APROVECHAMIENTO DE BARRAS EN EL PÓRTICO DE COMPARACIÓN.....	116
FIGURA 71. REPRESENTACIÓN, POR COLORES, DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DEL PÓRTICO DE COMPARACIÓN	116
FIGURA 72. GEOMETRÍA INTRODUCIDA EN ANSYS	118
FIGURA 73. ESQUEMA DE DENSIDAD DE MALLA	118
FIGURA 74. REPRESENTACIÓN DE CARGAS.....	119
FIGURA 75. DEFORMADA OBTENIDA EN ANSYS.....	119
FIGURA 76. REPRESENTACIÓN DE TENSIONES EN ANSYS	120
FIGURA 77. DETALLE DE TENSIONES EN ANSYS.....	120
FIGURA 78. APROVECHAMIENTO DEBIDO A CARGA AXIL	121
FIGURA 79. ENTRADA DE DATOS CASO 1	123
FIGURA 80. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 1	123
FIGURA 81. ENTRADA DE DATOS CASO 2	124
FIGURA 82. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 2	124
FIGURA 83. NUEVA ENTRA DE DATOS CASO 2	125
FIGURA 84. NUEVO APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 2	125
FIGURA 85. ENTRADA DE DATOS CASO 3	126
FIGURA 86. ENTRADA DE DATOS CASO 4	127
FIGURA 87. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 4	127
FIGURA 88. ENTRADA DE DATOS CASO 5.....	128
FIGURA 89. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 5	128
FIGURA 90. ENTRADA DE DATOS, SEGUNDA OPCIÓN, CASO 5.....	129
FIGURA 91. APROVECHAMIENTO DE PERFILES, SEGUNDA OPCIÓN, CASO 5	129
FIGURA 92. ENTRADA DE DATOS CASO 6	131
FIGURA 93. PERFILES OBTENIDOS CASO 6.....	131
FIGURA 94. ENTRADA DE DATOS CASO 7.....	132
FIGURA 95. PERFILES OBTENIDOS CASO 7	132

FIGURA 96. ENTRADA DE DATOS CASO 8.....	133
FIGURA 97. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 8.....	133
FIGURA 98. ENTRADA DE DATOS CASO 9.....	135
FIGURA 99. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 9.....	135
FIGURA 100. ENTRADA DE DATOS CASO 10.....	136
FIGURA 101. APROVECHAMIENTO DE PERFILES CASO 10.....	137
FIGURA 102. DISEÑO DE PÓRTICO CON PILARES EN VIGA ARMADA Y DINTEL EN CELOSÍA.....	141
FIGURA 103. MONTAJE DEL PÓRTICO CON PILARE ARMADOS Y DINTEL EN CELOSÍA.....	142
FIGURA 104. PÓRTICO ARMADO PROVISTO CON ESTRUCTURA PARA TRIPPER PARA DISTRIBUCIÓN DE MATERIAL.....	142
FIGURA 105. MONTAJE DE PÓRTICO ARMADO CON ESTRUCTURA PARA TRIPPER.....	143
FIGURA 106. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “REFINADINTELES”.....	151
FIGURA 107. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “REFINAPILARES”.....	152
FIGURA 108. DIAGRAMA DE FLUJO ALGORITMO “BUSCACANTONERAVARIABLE”.....	153

INDICE DE GRAFICAS

GRAFICA 1. RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA 4 SOLDADURAS [M/H]	64
GRAFICA 2. COSTE DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA 4 SOLDADURAS [€/H]	64
GRAFICA 3. RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA [M/H]. 2 SOLDADURAS	69
GRAFICA 4. COSTE DE PRODUCCIÓN VIGA ARMADA 2 SOLDADURAS [€/H]	69
GRAFICA 5. COMPARATIVA COSTES VIGA ARMADA FRENTE A PERFIL LAMINADO EN CALIENTE	70
GRAFICA 6. COMPARATIVA COSTES VIGA ARMADA FRENTE A PERFIL LAMINADO EN CALIENTE (COSTE VS W)	71
GRAFICA 7. RENDIMIENTO EQUIVALENTE DE PRODUCCIÓN DE VIGA ARMADA EN KG/H	72
GRAFICA 8. COSTE DE EMPALME EN LONGITUD EQUIVALENTE DEL PERFIL EMPALMADO	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Esta tesis ha sido motivada con el propósito de establecer unos criterios y una metodología para el diseño y la optimización de pórticos industriales en viga armada. El diseño de pórticos industriales en viga armada conlleva a un importante ahorro de costes, para un determinado rango de cargas, respecto al diseño de pórticos industriales en perfil laminado en caliente. Con muchísima frecuencia nos encontramos con proyectos de estructuras diseñadas en perfil laminado en caliente en las que el diseño con viga armada hubiese llevado a un coste de construcción muy inferior. En otras ocasiones nos encontramos con pórticos diseñados en viga armada con criterios erróneos, bien en la selección de materiales, en la forma geométrica del pórtico, en las secciones transversales utilizadas o en las vinculaciones con la cimentación. En muchos casos, estos criterios erróneos simplemente acarrearán un incremento en el coste de la solución diseñada, pero en otras ocasiones llevan a diseños incorrectos que no cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa, bien por incumplimiento de los estados límites últimos o bien por incumplimiento de los estados límite de servicio.

El principal obstáculo con el que encuentra el proyectista a la hora de diseñar pórticos en viga armada frente al diseño con pórticos en perfil laminado en caliente es la falta de conocimiento sobre el ahorro que estas estructuras armadas pueden proporcionar al diseño de la estructura del proyecto, así como la falta de conocimiento sobre los criterios óptimos de diseño y, también y principalmente, a la falta de herramientas en el mercado que permitan el diseño fácil y seguro de pórticos en viga armada.

En el desarrollo de esta tesis se proporcionarán los criterios y se realizará una herramienta que permita diseñar pórticos seguros en viga armada con un esfuerzo mínimo del técnico. Se estudiarán las secciones armadas óptimas para su aplicación en pórticos industriales y se creará una base de datos de estas secciones. Se definirán geometrías y topologías concretas de pórticos para aplicar a diferentes casos de cargas y luces. Se estudiarán las geometrías más adecuadas para compatibilizar los diagramas de momentos con las disposiciones de los materiales comerciales, obteniendo el menor desperdicio posible de material. Se establecerá un método de cálculo de costes que permita comparar cuando es óptimo diseñar en viga armada o diseñar en perfil comercial laminado en caliente. Finalmente se desarrollará un algoritmo heurístico de optimización que permitirá al diseño de pórticos industriales en viga armada con un menor coste, y se implementará la herramienta informática que lo posibilite.

La herramienta informática se desarrollará para el sistema operativo Windows, con una interface gráfica que permita una fácil y rápida entrada de datos, incorporando un procesador matricial de cálculo y un postprocesador gráfico para la visualización de los resultados. La plataforma de programación elegida para el desarrollo del programa es “*Visual Studio*” de Microsoft y el lenguaje de programación principal será *Visual Basic*. Los módulos de representación gráfica se programarán en *OpenGL*.

1.2 Objetivos de la tesis

El desarrollo de esta Tesis tiene como objetivo principal construir una herramienta con la que el técnico sea capaz de diseñar, de un modo sencillo eficiente y seguro, pórticos industriales en viga armada. El desarrollo de la herramienta se realizará en base a que el diseño de esos pórticos sea construible, cumpla con los criterios de seguridad aplicables en el código de referencia, aproveche los materiales disponibles en el mercado y sea óptimo desde un punto de vista económico.

En base a esta meta se han establecido los siguientes objetivos:

OBJETIVO 1. Establecer una base de diseño de piezas armadas eficientes, de inercia constante y de inercia variable, en forma de doble T, construidas a partir de los productos planos en los formatos y espesores comercializados mundialmente. La base de diseño de estos perfiles debe cumplir con las siguientes condiciones.

- El módulo resistente de la pieza armada más pesada debe superar el módulo resistente correspondiente a la IPE1000.
- El cociente entre el módulo resistente y el peso de la sección armada diseñada será mayor que el cociente entre el módulo resistente y peso de la sección laminada en caliente para un peso dado.
- El valor del salto de peso que se produce al pasar de un tipo de perfil al inmediatamente posterior más pesado debe ser menor que el salto de pesos que se produce entre perfiles comerciales.
- Los perfiles de inercia variable deben tener, al menos en uno de sus extremos, el mismo canto que los perfiles de inercia constante con el fin de poder establecer continuidad de alas, para facilitar así la adaptación de la inercia del perfil al diagrama de momentos del pórtico.
- Las alas nunca serán de Clase 4, según EC-3, ni “Slender”, según el criterio de la AISC, ya que esto implicaría un desaprovechamiento de material al reducir la capacidad de la pieza.

OBJETIVO 2. Definir las tipologías y geometrías de pórticos industriales que mejor se adapten a las cargas solicitadas por este tipo de construcción, con el fin de poder establecer las variables que intervienen en el diseño del pórtico. Se considera que las cargas que solicitan el pórtico son:

- Climáticas.
- Cargas muertas procedentes de Instalaciones sobre cubierta ó colgadas en cubierta.
- Punte grúa.

Se creará una base de datos de puentes grúa con sus cargas y dimensiones de modo que estas sean automáticamente procesadas por el algoritmo de generación de la geometría estructural y la aplicación de cargas.

OBJETIVO 3. Establecer un método para determinar los costes de producción de las piezas armadas, identificando cada una de las variables que intervienen en dicho coste. Para ello se estudiarán cada uno de los procedimientos concretos de fabricación y se identificarán todas las variables que intervienen en el proceso. Se estudiarán también los costes de empalme de perfiles con el fin de identificar correctamente cuando el ahorro de materiales debido un cambio de sección compensa el coste de realizar el empalme.

OBJETIVO 4. Establecer un criterio en la construcción de pórticos industriales que permita identificar el punto de equilibrio a partir del cual el coste de la fabricación de una viga armada es menor que el coste de emplear perfiles comerciales laminados en caliente.

OBJETIVO 5. Diseñar un algoritmo de optimización de viga armada que diseñe el pórtico de manera global, incluyendo la vinculación con la cimentación, que cumpla con los criterios de seguridad establecidos en el EC-3 para los estados límite último y estado límites de servicio, así como con el criterio de coste total mínimo del producto terminado. Se incluirá en el concepto de coste total mínimo el coste de diseño, el de producción y el de materiales empleados.

OBJETIVO 6. Finalmente, generar una herramienta que permita la aplicación del algoritmo desarrollado, utilizando una Interface gráfica para la entrada de datos de modo rápido y simple, así como una interface gráfica de salida de datos que permita interpretar los resultados y medir el grado de cumplimiento de los objetivos buscados. Esta herramienta generará la geometría del pórtico y aplicará las cargas y las condiciones de contorno a partir de los datos introducidos en la interface gráfica. La herramienta debe disponer también de un interface que permita modificar las secciones a criterio del proyectista y pueda efectuar un recalcdo del pórtico.

1.3 La necesidad de la optimización de pórticos industriales en viga armada

Dada la actual situación de los mercados y la necesidad continua de las empresas por minimizar costes de producción ofreciendo cada vez una mayor y más rápida calidad de servicio prestado, se plantea una metodología que permita un diseño rápido, seguro y eficiente para la construcción de pórticos industriales en acero con una significativa reducción de costes, tanto de ingeniería como de producción.

Aunque en la actualidad no existe ninguna metodología desarrollada para el cálculo de pórticos industriales en viga armada, este tipo de análisis tiene una amplia aplicación, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

La utilización de la viga armada en los países desarrollados es muy eficiente, dado que en los pórticos industriales se puede obtener un ahorro de materiales superior al 30% para luces superiores a 20m. Esto reduce significativamente los costes del producto acabado puesto que el 50% del coste final de una estructura metálica está en su materia prima.

En los países desarrollados las máquinas de producción de viga armada están instaladas en su mayoría en los talleres metálicos, alcanzando producciones superiores a las 500Tm/mes. Estas máquinas automáticas sueldan la viga por arco sumergido con un rendimiento de unos 8 metros lineales de viga por hora de producción.

En las figuras Figura 1, Figura 2 y Figura 3 se muestran distintas fases del proceso de producción de una viga armada con soldadura por arco sumergido y sistema de enderezado de ala y de alma.



Figura 1. Vista general máquina de armado



Figura 2. Salida de la pieza armada



Figura 3. Entrada de la pieza y arcos de soldadura

Los países en vías de desarrollo no tienen fácil acceso para conseguir en sus mercados perfiles laminados en caliente (IPE, HEB, HEA, W), y cuando los obtienen los precios son elevados. En América del Sur el perfil laminado en caliente, con cantos inferiores a 300mm, está a un precio medio de 1\$USD/kg (Fecha de Mayo de 2012); en Europa y US este precio no supera los 0.80\$USD/kg (Fecha de Mayo de 2012).

En América del Sur, la mayor parte del perfil doble T empleado en construcción está formado por viga armada, incluso de cantos muy bajos (desde 140mm), debido a la suma de los dos problemas mencionados: la dificultad para conseguir perfil largo laminado en caliente y su elevado coste. Esto es debido a que en esos países las acerías tienen una producción cuantitativamente muy baja y la mayor parte del acero es importado. Sin embargo, la chapa plana para hacer viga armada se consigue con mucha mayor facilidad y a un precio medio de 0.76\$USD/kg, lo que permite formar el perfil doble T a medida a un precio competitivo respecto del perfil laminado en caliente.

Dado que en América del Sur se consume mucha perfilería de cantos bajos (inferior a 500mm), existen máquinas de fabricación continua de perfil armado en doble T. Estas máquinas de producción en continuo sueldan el perfil armado sin aportación de material, mediante fusión de frecuencia variable, y pueden llegar a producir hasta 40 m/min de viga armada con un canto máximo de 500mm y un espesor máximo de alas y alma de hasta 12mm.

La Figura 4 muestra vigas armadas doble T fabricadas en continuo y soldadas por fusión.



Figura 4. Dobles T realizadas con soldadura por fusión sin aporte de material

Las aplicaciones de la viga armada son muy amplias:

- En los países desarrollados se emplea básicamente con dos funciones:
 1. Aligerar peso. Con lo que con lo que se emplea menor cantidad de material para conseguir mejores propiedades resistentes que con una viga laminada en caliente.
 2. Obtener perfiles resistentes de alta capacidad, que cubran las necesidades estructurales que no alcanzan a cubrir los perfiles laminados en caliente.
- En los países en vías de desarrollo se usan, además de para aligerar peso y obtener perfiles resistentes de alta capacidad, también para cubrir la gama de perfiles doble T desde canto 140mm debido a la escasez de perfil laminado en caliente.

Con la situación descrita anteriormente, se hace necesario desarrollar una metodología eficiente para el diseño y optimización de pórticos en viga armada que complemente y apoye el desarrollo de este tipo de perfil, para el cual ya existen eficientes sistemas de producción.

En este punto, los métodos de simulación numérica para el estudio del comportamiento estructural y los cada vez mayores avances en tecnología computacional han permitido la aplicación en ciencia e ingeniería de métodos numéricos para la simulación de fenómenos físicos. En la actualidad, el más utilizado es el Método de los Elementos Finitos (FEM), dentro del cual se han desarrollado modelos para la optimización de estructuras con perfil laminado en caliente, pero no se ha presentado aún ningún modelo para la optimización de estructuras en viga armada.

En esta tesis se desarrolla un algoritmo de optimización de pórticos en viga armada que contempla el diseño y propone una estructura optimizada en su coste final, no solo desde el punto de vista del gasto de material, sino también del coste de fabricación. Para ello se han considerado como variables discretas del problema los materiales comerciales de chapa de acero que permiten finalmente la construcción con viga armada. Se han considerado también las restricciones que imponen la compatibilidad de secciones y la facilidad de ejecución. Se ha diseñado un módulo de entrada de datos que permite definir la geometría, las cargas y las combinaciones sin realizar ningún cálculo numérico, con lo que finalmente se ha optimizado también el coste de ingeniería.

1.4 Estructura de la tesis

En este apartado se describen de forma resumida las tareas que han sido necesarias realizar para la consecución de los objetivos establecidos en el apartado anterior.

Dichas tareas quedan enmarcadas en los distintos capítulos, que proporcionan al documento la siguiente estructura:

Capítulo 1 "Introducción": En el presente capítulo se expone en primer lugar la motivación que origina el desarrollo de esta tesis. En segundo lugar se plantea la meta del proyecto y los objetivos a conseguir en el desarrollo de la tesis. En tercer lugar se documenta el porqué de la necesidad de establecer una metodología y unos criterios de optimización de pórticos industriales con perfiles en viga armada. Finalmente se resume la estructura de la tesis.

Capítulo 2 "Estado del Arte": En este capítulo, se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Breve exposición histórica de los inicios de la optimización estructural.
- Descripción de los fundamentos teóricos necesarios para el posterior desarrollo del algoritmo de optimización.
- Exponer y analizar las principales técnicas de optimización empleadas en la actualidad.
- Análisis de los principales programas comerciales que tratan el problema de la optimización estructural en pórticos industriales.

Capítulo 3 "Optimización estructural": En este capítulo se plantea la formulación del problema de optimización con variables discretas y se definen las variables de diseño así como los parámetros de diseño y las restricciones. También se define la función objetivo.

Capítulo 4 "Algoritmo de optimización Heurístico": En este capítulo se establecen y definen los condicionantes que deben cumplir las variables de diseño geométricas. Se definen las partes que componen el pórtico y se establecen los condicionantes geométricos de sus elementos. Se definen las vinculaciones entre elementos y entre el pórtico y la cimentación. Se desarrolla la base de datos de secciones en viga armada, se definen los materiales comerciales a utilizar en dichas secciones y se establecen las variables de coste de fabricación de las piezas armadas. Se estudian y se parametrizan los procedimientos de fabricación para obtener tiempos y costes de producción, se estudian los rendimientos y se obtiene el punto de equilibrio de costes comparando el coste de producción de la viga armada con el coste del perfil comercial laminado en caliente. Se obtienen las ecuaciones que expresan la producción de la viga en función de su peso por metro lineal.

Se codifican las variables de diseño, los parámetros del problema y sus restricciones.

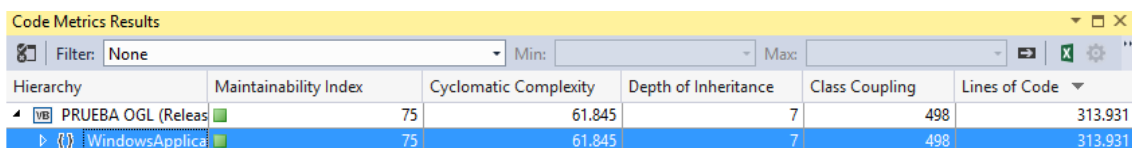
Se desarrolla el algoritmo de optimización, el módulo de entrada de datos, módulo de aplicación de cargas y combinaciones. Finalmente se contrastan los resultados obtenidos con un modelo de elementos finitos tipo lámina realizado en ANSYS.

Capítulo 5 "Aplicación de la metodología a diferentes casos reales": Se aplica metodología desarrollada en esta tesis utilizando la herramienta de software implementada, con la que se han resuelto una decena de casos con diferentes tipologías de pórticos en viga armada para una variedad de luces entre 20 y 80 m, y con diferentes casos de carga. Los casos estudiados se consideran suficientemente representativos del rango habitual de luces y cargas en el que desarrollan las instalaciones industriales.

Capítulo 6 "Conclusiones": Se describen las principales aportaciones realizadas en esta tesis y se resumen otras conclusiones extraídas del trabajo realizado.

Capítulo 7 "Líneas futuras": Se describen las futuras líneas de investigación que pueden surgir del presente trabajo.

Anexos: Los diferentes anexos profundizan en los procedimientos principales desarrollados para la herramienta creada con la metodología desarrollada en esta tesis. No se aporta el código desarrollado ya que su extensión supera a la propia tesis. En la siguiente figura se puede ver la métrica del código total incluyendo la herramienta gráfica desarrollada. El número total de líneas de código es de 313931.



Hierarchy	Maintainability Index	Cyclomatic Complexity	Depth of Inheritance	Class Coupling	Lines of Code
PRUEBA OGL (Releas	75	61.845	7	498	313.931
WindowsApplica	75	61.845	7	498	313.931

Figura 5. Métricas de código del programa ElastiK

El autor pone a disposición del que lo solicite el código fuente de los algoritmos implicados en el trabajo de esta tesis a través del correo electrónico jgonzalez@pronabi.com.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Evolución Histórica

En los tiempos antiguos el diseño estructural se basaba en reglas empíricas obtenidas de la propia experiencia en base al método de “ensayo-error” o en base a las proporciones observadas en las estructuras creadas por la naturaleza.

El primer trabajo documentado sobre optimización estructural fue llevado a cabo por Galileo Galilei en su libro titulado “*Discorsi e dimonstrazioni matematiche, intorno, a due nuove scienze attenenti alla meccanica et i movimenti local*” [1] donde con su estudio permitió abordar racionalmente la obtención de la forma óptima en vigas de canto variable.

En 1904 Michell, apoyándose en la teoría de Maxwell de 1890, construye la primera metodología aplicable a estructuras articuladas bidimensionales sometidas a un único estado de carga, que permite hallar el peso mínimo considerando el valor de la tensión máxima admisible en las barras.

Durante la II guerra mundial, en base a las investigaciones en aeronáutica y armamento, se impulsaron las técnicas de optimización. Durante esta época es característico considerar que el problema de optimización estaba determinado por una sola variable de diseño a la que se le asocia una única restricción, normalmente relacionada con la resistencia a compresión de la pieza.

Entre 1955 y 1960 se hacen los primeros planteamientos modernos de la optimización estructural haciendo un planteamiento general del problema, integrando el análisis estructural en el problema de optimización y aprovechando el desarrollo de los elementos finitos. En 1955 Klein, es el primero en plantear el problema de optimización como un problema estándar de programación no lineal en términos de minimización de una función objetivo (bien de peso estructural, bien de coste...).

En las últimas décadas diferentes equipos de trabajo, numerosos autores y cientos de tesis doctorales han tratado el tema de la optimización estructural. El desarrollo de las técnicas de optimización ha ido paralelo al desarrollo de la potencia de los ordenadores.

Los *Algoritmos genéticos (GA)* cuya técnica fue desarrollada por John Henry Holland y sus colaboradores [2] [3] [4] a finales de los 60 y comienzo de los 70 han sido fuente de un gran número de desarrollos y variantes que han motivado cientos de tesis doctorales.

Los algoritmos de *estrategias evolutivas (ES)*, que son una variación de los algoritmos genéticos, también han dado lugar a trabajos reseñables [5] [6] [7].

La técnica denominada *Optimización de Enjambre de Partículas (PSO)* ha sido ampliamente estudiada durante los últimos diez años, y entre los trabajos más destacados constan las referencias [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] y [17].

La técnica denominada *Optimización por colonia de Hormigas (ACO)*, desarrollada por Marco Dorigo en sus tesis doctoral [18] también ha sido motivo de numerosos estudios en los últimos años.

Otras técnicas que también han tenido un gran desarrollo en los últimos años son

- La técnica denominada *Scatter Search (SS)*, conocida en castellano como *Busqueda Dispersa*, cuyos principios fueron formulados inicialmente por Fred Glover en 1977, se ha utilizado con éxito en numerosos problemas. Pertenece a la familia de los denominados *Algoritmos Evolutivos* [19].
- La *técnica* metaheurística denominada *Recocido Simulado (SA)*, formulada por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983.
- El procedimiento metaheurístico denominado *GRASP* (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), fue formulado inicialmente por T.A.Feo y M.G.C. Resende en 1989 y posteriormente desarrollado y evolucionado por diversos autores.

Otra rama muy importante de los algoritmos de optimización son los denominados *Algoritmos Heurísticos*, que en la última década ha dado origen a números trabajos [20] [21] [22] [23], los cuales han sido utilizados con gran éxito en problemas en los que intervienen un gran número de variables de diseño. El algoritmo desarrollado en esta tesis está dentro del marco de los *Algoritmos Heurísticos*.

2.2 Técnicas de optimización Estructural

Las herramientas de optimización estructural pasan necesariamente por sucesivos pasos de análisis de la estructura para comprobar la validez del diseño. En cada paso se obtienen los esfuerzos aplicando un cálculo matricial basado en elementos finitos [24] [25] y una comprobación tensional o comprobación de aprovechamiento de la pieza basándose en el código que sea de aplicación, Eurocódigos, AISC, [26] [27] [28] [29] [30] [31], en los que por sucesivas iteraciones se aproxima la solución usando una u otra técnica de optimización.

El siguiente diagrama de flujo muestra, de modo esquemático, el método de optimización utilizado en este trabajo y que, por otra parte, es común a los procesos de optimización de estructuras.

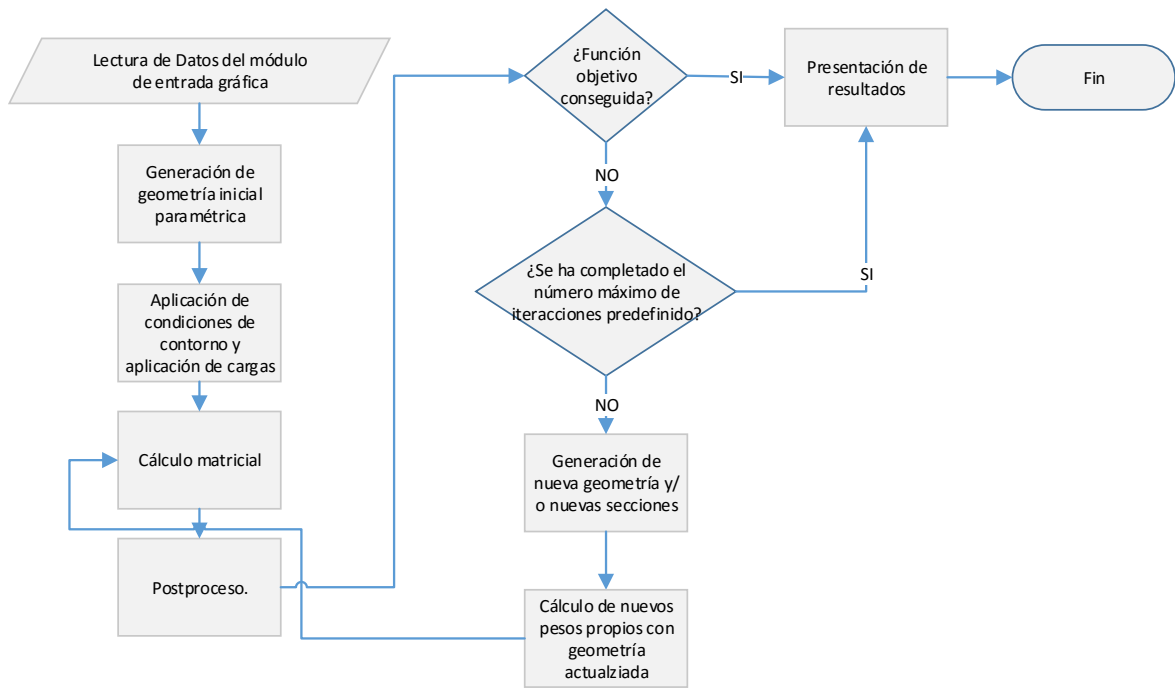


Figura 6. Esquema general de algoritmo de optimización estructural

A continuación se relacionan las técnicas de optimización de estructuras más empleadas en los últimos años, si bien no se realiza una descripción exhaustiva de cada una de ellas ya que no es el cometido de esta tesis.

2.2.1 Algoritmos Evolutivos

Los primeros tipos Algoritmos Evolutivos desarrollados fueron los Algoritmos Genéticos. Inicialmente desarrollados por John Henry Holland a finales de los años 60, comenzaron a utilizarse de forma práctica a mediados de los 70 y principios de los 80. David Goldber publicó en 1989 el primer libro de referencia sobre los Algoritmos Genéticos [32].

Los Algoritmos Genéticos trabajan con poblaciones de individuos (soluciones) y se basan en los conceptos Darwinianos de supervivencia de los individuos más aptos. Los diseños se representan en forma de cadenas numéricas generalmente llamadas cromosomas donde cada elemento de la cadena recibe en nombre de gen. Los cromosomas son generados y modificados siguiendo los mecanismos naturales de la evolución: la reproducción, el cruce y la mutación. Después de varias generaciones (ciclos de cálculo), los diseños representados por los individuos más aptos representan los diseños óptimos.

Los Algoritmos Genéticos han sido utilizados con gran éxito en problemas de optimización en un amplio rango de ramas de la ciencia, no solo en el campo de la optimización estructural, ya que son capaces de encontrar soluciones en entornos de elevada complejidad en pocos segundos.

En el planteamiento de los problemas de optimización de estructuras con este tipo de algoritmos, se realiza la optimización simultánea del tamaño y topología de las mismas.

De modo general, los Algoritmos Genéticos funcionan de la siguiente manera. Inicialmente se parte de una población inicial de “n” individuos (soluciones) que por medio de una serie de transformaciones, en cada generación, vayan evolucionando hacia una solución óptima del problema. Estos algoritmos se diferencian tres etapas:

- Selección
- Reproducción
- Reemplazo

En la **etapa de selección**, el algoritmo genético estudia la población inicial y selecciona los individuos con mejores opciones, que serán elegidos como *progenitores*. En esta etapa no solo se seleccionan los mejores individuos, sino que también se seleccionan candidatos de otros grupos para evitar caer un máximo local. El modo de selección depende del tipo de algoritmo genético utilizado.

Una vez hecha la primera selección se aplica la **etapa de reproducción**, aplicando a los individuos seleccionados unos operadores que dan lugar a unos nuevos individuos a partir de la selección inicial. La nueva descendencia “s” se une ahora a la población inicial. Los operadores encargados de realizar la reproducción son los denominados operadores de cruce y de mutación. El operador de cruce explora las buenas características de las que dispone la población actual, y el operador de mutación busca las mejores soluciones al problema planteado. El operador de mutación actúa sobre cromosomas individuales.

Tras la etapa anterior, la población actual está formada por los individuos originales más los individuos descendientes “n”+“s”.

En la nueva etapa, denominada **etapa de reemplazo**, se selecciona una nueva población de individuos “n₁”. Existen diferentes técnicas de reemplazo y estas son características propias que caracterizan al algoritmo genético.

El algoritmo genético finaliza tras un número máximo preestablecido de generaciones o bien cuando se ha alcanzado el óptimo buscado con un criterio de tolerancia admisible.

A continuación se citan algunos de los trabajos más relevantes relacionados con el trabajo que se desarrolla en esta tesis.

En 1993 Grierson y Pak [33] emplearon un algoritmo genético binario para optimizar el tamaño y la topología de diversos pórticos, siendo uno de los primeros trabajos en analizar estructuras con elementos de viga.

En el año 2000, Erbatur et al. [34] aplicaron un algoritmo genético binario al diseño de estructuras de barras y vigas, al que denominaron *GAOS*, empleando una base de datos con los perfiles normalizados AISC. El algoritmo se utilizó para la optimización de la estructura metálica de una nave industrial.

En 2002 Belén Prendes Gero [35] desarrolla y aplica en su tesis doctoral un *Algoritmo Genético Elitista* a la Optimización de edificios metálicos, utilizando un operador de cruce por fenotipo.

Posteriormente, en 2012, Samuel Sánchez Caballero [36] aplica en su tesis doctoral un algoritmo genético a la optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas, donde emplea operadores genéticos avanzados e incorpora un operador de migración combinado con uno de renacimiento completo. Una de las principales aportaciones de la tesis es que el problema de optimización de estructuras se realiza sin más restricciones que los puntos de aplicación de las cargas, los puntos de aplicación de las reacciones y las limitaciones de tensión y deformación, sin ningún tipo de restricción en la geometría inicial.

Dos de los principales problemas que puede encontrarse en estos algoritmos es el de caer en un óptimo local que haga que el óptimo global esté muy alejado, o bien en proporcionar soluciones que no sean construibles en el caso de la optimización de estructuras.

2.2.1.1 Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Los Algoritmos de Optimización basados en *enjambre de partículas* están inspirados en comportamientos sociales de grupos de animales como los bancos de peces, enjambres de insectos o bandadas de pájaros.

El algoritmo está formado por una serie de partículas que forman el enjambre, las cuales son inicializadas aleatoriamente dentro del espacio de búsqueda de la función objetivo. Cada partícula representa una posible solución del problema. Las partículas se mueven por el espacio de búsqueda atraídas por la posición de mayor aptitud lograda por la partícula (óptimo local), así como la mejor aptitud lograda en todo el enjambre (óptimo global) durante cada iteración del algoritmo, de modo similar al de un enjambre.

2.2.1.2 Optimización por colonia de hormigas (ACO)

Estos algoritmos están inspirados en el comportamiento natural de las colonias de hormigas o abejas. La población de la colonia está formada por individuos encargados de realizar tareas específicas e interacciona con el resto de individuos de la colonia.

El primer ACO desarrollado se inspiró en la forma en que las hormigas sortean los obstáculos a la hora de transportar comida. Cuando una hormiga encuentra la forma de sortear el obstáculo, en poco tiempo toda la colonia sabe qué camino tomar gracias al sistema de transmisión de información basado en las feromonas marcadoras de pistas que estas poseen. El autor aplicó este mismo mecanismo al problema del viajante de comercio que debe recorrer m ciudades distintas, que deben ser recorridas una sola vez por el viajero y no debe dejarse ninguna sin recorrer. Además, el recorrido debe ser cerrado de modo que se comienza y finaliza en la misma ciudad. Dicho recorrido debe de hacerse con el menor coste posible.

2.2.2 Programación matemática

La programación matemática es otra técnica de optimización que, si bien se usa de modo general en el proceso de toma de decisiones, también es ampliamente utilizada en el proceso de optimización estructural. Consiste en la selección del mejor elemento dentro de un conjunto de elementos disponibles, estableciendo una función objetivo que, según el tipo de planteamiento, debe de maximizarse o de minimizarse. El máximo ó mínimo de la función será la solución óptima. De forma general se plantea una función objetivo la cual debe de minimizarse.

Tres son los procesos principales que llevan al diseño de un modelo de optimización. El primero y más decisivo consiste en la identificación de las posibles decisiones que pueden tomarse en el sistema y su representación en forma de variables: las variables de decisión. Normalmente estas variables son de carácter cuantitativo, aunque también son posibles variables cualitativas que determinan una elección entre varias posibles. El segundo proceso consiste en la especificación del conjunto de valores de las variables de decisión que resultan admisibles en el sistema, es decir, el conjunto de restricciones que deben cumplir dichas variables. Este se determina teniendo presente la naturaleza física de los elementos del sistema y sus interrelaciones. El tercer proceso consiste en desarrollar un modelo de costes del sistema, es decir, determinar el coste/beneficio asociado a cada decisión admisible. Esto supone diseñar una función objetivo que asigne a cada conjunto posible de valores de las variables de decisión su valor de coste/beneficio. Los tres procesos anteriores junto con los datos concretos del sistema dan lugar al modelo de optimización.

Las técnicas **Heurísticas y Metaheurísticas** son subcampos de la programación matemática en los que se han basado una gran cantidad de algoritmos de optimización estructural. Estas técnicas hacen suposiciones sobre el problema que está siendo optimizado con el fin de restringir el ámbito de búsqueda. Usualmente, las heurísticas no garantizan que cualquier solución óptima necesita ser encontrada. Luego, las heurísticas son usadas para encontrar soluciones aproximadas para muchos problemas de optimización complicados. Es precisamente esta técnica en el que se desarrolla el trabajo de esta tesis.

En el trabajo realizado por Dorn, Gomory y Greenberg en 1964 [37] se demostró que el tamaño de la malla tenía un efecto significativo en la reducción de peso y la topología final de la estructura a optimizar. Para evitar este inconveniente procedieron a incorporar las coordenadas nodales dentro de las variables de diseño en el proceso de optimización estableciendo un nuevo camino en la optimización geométrica de la estructura. A partir de este trabajo se establecieron tres grupos dentro de las técnicas de programación matemática aplicadas en la optimización estructural:

1. Técnicas basadas en una malla de puntos, denominadas *técnicas de Ground Structure*, donde se eliminan barras de la estructura.
2. Técnicas donde las coordenadas y las propiedades de las secciones se introducen como variables de diseño, denominadas *Técnicas Geométricas*, que serán las utilizadas en esta tesis.
3. Los *Métodos Híbridos*, en los que se realizan ambas tareas a la vez.

Las **técnicas basadas en Ground Structure** pueden enfocarse a través de diferentes planteamientos. El más sencillo es el método de nominado *Fully Stressed Design Stress-Ratio*, donde en cada iteración las secciones de los elementos estructurales son redimensionados en base a la proporción entre la tensión que soporta cada miembro y su tensión admisible. Mediante esta aproximación, cuando la sección de una barra de la estructura se reduce a cero, con un margen de tolerancia, se procede a eliminarla. Topping [38] demostró que los resultados obtenidos con *Fully Stressed Design Stress-Ratio* no son siempre óptimos. En 1992, Kirsch [39] demuestra que cuando la sección se aproxima a cero las restricciones de tensión desaparecen repentinamente generándose soluciones factibles degeneradas. Se demostró pues que es difícil obtener una solución óptima, ya que estas soluciones degeneradas pueden activar o desactivar las restricciones de tensión de forma abrupta, dificultando el proceso de optimización. En 2009, Hagishita y Ohsaki [40] propusieron una variación del método al que llamaron *Growing Ground Structure Method*, donde se añaden o eliminan barras en base a cinco estrategias propuestas.

Las **Técnicas Geométricas** están caracterizadas por el hecho de que las coordenadas de los nodos se introducen como variables de diseño, con lo que su posición puede variar dentro de unas condiciones establecidas por las restricciones del problema. En 1970 Pedersen [41] publica una técnica iterativa basada en la programación lineal para el diseño de estructuras planas sometidas a un estado de carga simple, donde las áreas de los elementos y las coordenadas nodales fueron empleadas como variables de diseño. Al emplear un solo estado de cargas las soluciones obtenidas fueron estáticamente determinadas. El método empleaba un análisis de sensibilidad de las derivadas parciales con respecto a las áreas, considerando también el peso propio, así como restricciones de tensión pandeo. En 1972 extendió su trabajo añadiendo múltiples estados de carga. En 1977, Thomas y Brown [42] emplearon una función de penalización combinada con una técnica de optimización secuencial no restringida para optimizar varios tipos de tejado. Los elementos que se aproximaban a la mínima tensión admisible eran eliminados, excepto los necesarios para mantener la estabilidad de la estructura. Una vez que el elemento era eliminado, la estructura era reoptimizada y se volvía a estudiar la posibilidad de eliminar nuevos elementos.

Las **Técnicas Híbridas** están caracterizadas por una combinación de las dos anteriores. En 1968 Sved y Ginos publican un trabajo [43] donde demuestran que con el diseño simultáneo de la topología, la búsqueda de un óptimo global entrañaba grandes dificultades. A partir de este trabajo, diferentes autores han separado las variables de diseño en dos espacios de diseño diferentes o en intervalos alternos del proceso de diseño. En 1972, Vanderplaats y Moses [44] desarrollaron una técnica aplicada a estructuras sometidas a múltiples estados de carga donde emplearon el método del *Fully Stressed Design Stress-Ratio* para dimensionar la estructura mientras mantenía la topología fija, aplicando posteriormente el método de la máxima pendiente para desplazar las coordenadas de los nudos hacia una posición óptima.

Como conclusión a su trabajo, afirmaron que el empleo de dos espacios de diseño, separados pero independientes, reducían sensiblemente el número de variables de diseño.

En 1975, Spillers y Friedland [45] [46] [47] desarrollaron otra serie de técnicas para estructuras determinadas e indeterminadas estáticamente. Derivaron un conjunto de expresiones basadas en el gradiente de la función objetivo respecto a las coordenadas nodales y las áreas de los elementos de la estructura empleando un esquema iterativo basado en el método de Newton y las condiciones de Kuhn-Tucker en el que se mantenían dos espacios de diseño separados.

En 1981, Lev [48] planteó un enfoque heurístico al problema de optimización geométrica. Sugirió que en la optimización de estructuras sometidas a un único estado de cargas, primero se debía optimizar la topología empleando *Fully Stressed Design Stress-Ratio*. También sugirió que para estructuras sometidas a estados de carga múltiples, la topología inicial debía estar compuesta de una combinación de las topologías óptimas para los diferentes estados de carga simples.

Por el contrario otros autores han optado utilizar una malla de puntos en sus algoritmos alternando la optimización del tamaño y la topología. En 1970, Reinschmidt y Russell [49] [50] [51] utilizaron una malla de puntos sobre la que aplicaron diversas técnicas de programación lineal y el *Fully Stressed Design Stress-Ratio* de forma sucesiva, asegurando así el cumplimiento de las restricciones de tensión y desplazamiento y obteniendo resultados más satisfactorios que con el empleo del *Fully Stressed Design Stress-Ratio* únicamente.

La técnica denominada **Recocido Simulado (SA)** es otra técnica metaheurística basada en imitar el proceso de enfriamiento lento de un metal líquido hasta su estado sólido. La técnica se desarrolla tomando un diseño de prueba, generado de modo más o menos aleatorio, y se evalúa la función objetivo para ese diseño. Si el diseño de prueba no es factible este es descartado y se genera un nuevo diseño. Si el punto de prueba es factible y la función objetivo proporciona un resultado mejor que el mejor resultado obtenido hasta el momento, el diseño es aceptado y se anota el resultado como nuevo record. Si el diseño de prueba es factible pero la función objetivo arroja un resultado peor que el mejor resultado obtenido, entonces el diseño es aceptado o rechazado en función de un criterio probabilístico que estima si el diseño puede mejorar en las siguientes iteraciones. El cálculo de la probabilidad de aceptación se realiza en función de un parámetro denominado *Temperatura*, por analogía con el citado proceso. Esta *temperatura* establece el umbral de aceptación, e inicialmente toma un valor grande decreciendo conforme avanza el proceso iterativo, siguiendo una ley similar a la ley de enfriamiento del metal. De este modo la probabilidad de selección decrece con la temperatura hasta hacerse nula. Esta técnica ha sido aplicada a la optimización de estructuras y su eficacia ha quedado demostrada en los trabajos de Balling [52] y Bennage y Dhingra [53].

En este mismo año 2002, Chen y Su [54] apuntaron que la técnica tradicional SA requiere de demasiados análisis para converger hasta el diseño óptimo. Con el fin de mitigar el inconveniente propusieron mejoras a la formulación clásica.

En 2008, Lamberti [55] emplea una variación del método denominada *Corrected Multi-Level and Multi-Point Simulated Annealing (CMLPSA)*.

En 2011, Noilublao y Bureerat [56] aplicaron una variación del método denominada *Archived Multiobjective Simulated Annealing (AMOS)* a una torre esbelta tridimensional así como a otros casos más sencillos.

Sin embargo el excesivo coste computacional del método SA está haciendo que, en los últimos años, el interés sobre esta técnica haya ido disminuyendo.

2.3 Software y programas comerciales de optimización estructural

Otra rama de estudio que se ha investigado en esta tesis son los programas comerciales de cálculo de estructuras que incorporan algoritmos de optimización estructural.

En la actualidad existe una amplia variedad de software informático que permite el cálculo, y en algunos casos la optimización con perfil laminado en caliente, de estructuras metálicas. Las herramientas más ampliamente empleadas por los fabricantes de estructuras metálicas así como las Ingenierías especializadas en el diseño de estructuras metálicas son los programas de cálculo de estructuras, *SAP2000*, *ETABS*, *ROBOT*, *TRICALC*, *CYPE*, *CONSTEEL*, *STAAD PRO*, *STRAP*. Estos programas han sido analizados en relación a la optimización de pórticos en viga armada, siendo solo uno de ellos el que permite la posibilidad de generar pórticos industriales de diferentes topologías, incluyendo la posibilidad de introducir puentes grúa y con posibilidad también de optimizar en viga armada.

En la siguiente tabla se han recogido las características principales de las que disponen los programas de cálculo de estructuras en relación a la generación y optimización de pórticos en viga armada.

La tabla recoge específicamente la característica de poder generar pórticos con puentes grúas ya que el puente grúa es el medio más empleado para el movimiento de cargas pesadas en las naves industriales.

NOMBRE COMERCIAL DEL PROGRAMA	GENERADOR DE GEOMETRIAS DE PORTICOS	GENERADOR INTEGRADO DE CARGAS	INTEGRACIÓN DE BASE DE DATOS DE PUNTES GRÚA	OPTIMIZACIÓN EN VIGA ARMADA
<i>CYPE</i>	Si. Restringido sin integrar puentes grúa	Si	No	No
<i>TRICALC</i>	Si. Restringido sin integrar puentes grúa	Si	No	No
<i>ROBOT</i>	Si. Restringido sin integrar puentes grúa	Si	No	No
<i>CONSTEEL</i>	No	Si	No	No
<i>STAAD.Pro</i>	Si. Restringido sin integrar puentes grúa	SI	No	No
<i>SAP</i>	No	No	No	No
<i>MBS</i>	Si	Si	No	Si

Tabla 1. Comparativa software comercial

MBS es el único programa de los relacionados capaz de optimizar pórticos en viga armada. Sin embargo, los criterios de diseño que emplea en la optimización no consideran el coste de fabricación y empalme de las piezas de viga armada, pues únicamente se guía por el objetivo de minimizar el peso total, lo que en ocasiones no es necesariamente la solución de menor coste.

3. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

3.1 Introducción

En los problemas de optimización estructural se busca generalmente minimizar el peso de la estructura bajo ciertas restricciones impuestas por los Estados límite. Debido a la ejecución práctica de las estructuras, los elementos estructurales se dividen en grupos con las mismas variables de diseño (áreas de inercia, momentos resistentes, secciones laterales). Esta agrupación de elementos resulta un compromiso entre el uso de más material y la necesidad de simetría y uniformidad debido a consideraciones prácticas. Además, se ha de considerar que debido a las limitaciones de fabricación, las variables de diseño no son continuas sino discretas.

Debido a ello, desde finales de la década de 1960 y comienzos de la siguiente, ha ido creciendo el interés hacia los problemas de optimización de variables discretas. De cualquier modo, en ese tiempo todavía estaban en proceso de desarrollo los problemas de programación no lineal de variables continuas. En los años 1970 y 1980 se produjo un mayor esfuerzo en el desarrollo y en la evaluación de dichos algoritmos discretos. El estudio en esta área aún continúa para desarrollar mejores métodos, especialmente para problemas a gran escala. En años recientes, el enfoque se ha dirigido hacia aplicaciones de problemas prácticos que naturalmente usan variables discretas.

El objetivo de minimizar peso de la estructura no es necesariamente el mismo objetivo que optimizar coste de la estructura. En la última década han surgido muchas publicaciones cuyo objetivo es minimizar el coste de la estructura [20] [22] [21], no el peso de la estructura, aunque ambos parámetros tienen relación.

3.2 Formulación del problema de optimización

El problema de optimización se formula en términos de parámetros, variables de diseño y restricciones, las cuales pueden ser geométricas, de contorno y estructurales. Los parámetros son las variables elegidas para describir el diseño de una estructura, y se conocen como *variables de diseño* aquellas variables que se utilizan para definir completamente la solución del diseño, mientras que las restricciones se conocen como las *condiciones límite* que condicionan la evolución de las variables de diseño.

En la optimización estructural es fundamental el aprovechamiento de los materiales y racionalización de los medios de producción. No se dispone de una gama ilimitada de materiales para fabricar cualquier cosa que se diseñe, por lo que el diseño debe de tener en cuenta los productos de los que dispone el mercado.

Para la fabricación en viga armada se dispone de material en bobina, chapa plana o pletinas comerciales. Estos productos formarán parte de nuestras *variables de diseño* discretas.

Los estados límite últimos y de servicio impuestos por la normativa o por una especificación técnica, serán nuestras *condiciones límite estructurales o condiciones de seguridad* que también deben de ser verificadas. Los límites de las variables de diseño, espesor, anchos de chapa, etc. serán *condiciones límite geométricas*. Las restricciones de contorno son el tipo de vinculación entre los pilares y la cimentación (articulados, empotrados, semirrígidos).

3.2.1 Variables de diseño

La noción de optimización de una estructura implica el cambio de ciertos elementos de diseño que se denominan *variables*, por lo tanto, se pueden definir las *variables de diseño* como aquellos valores que se modifican durante el proceso de optimización para obtener la geometría de la estructura optimizada. Dichas variables pueden ser tanto continuas como discretas. Una variable continua es la que toma un valor dentro del rango de variación en una región. Una variable discreta es la que toma sólo valores puntuales, generalmente de una lista de valores permisibles por catálogo.

Las variables de diseño pueden ser expresadas como un vector X con sus componentes x_i

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Y sus valores permitidos se moverán dentro de un rango o serán elegidos, de modo discreto, dentro de un catálogo de opciones.

$$x_i \in D_j$$

$$D_j = (d_1, d_2, \dots, d_n)$$

Siendo D_j los valores del catálogo.

Variables geométricas

Estas variables de diseño, que definen la geometría del pórtico, son discretas en su mayoría.

- Variables de diseño para los dinteles:
 - Tipo de dintel
 - Dintel tipo 1: dt_1
 - Dintel tipo 2: dt_2
 - Dintel tipo 3: dt_3
 - Dintel tipo 4: dt_4

Cada uno de estos tipos de dintel tendrá, a su vez, variables de diseño que definen su geometría.

- Dintel tipo 1: espesor de ala y alma (tf , tw), anchura de ala (B), canto inicial $H1$ y canto final $H2$ del alma.
 - Dintel tipo 2: espesor de ala y alma en tramo 1 (tf_{i1} , tw_{i1}), anchura de ala en tramo 1 B_{i1} , canto inicial y canto final del alma en tramo 1 ($H1$ y $H2$), espesor de ala y alma en tramo 2 (tf_{i2} , tw_{i2}), ancho del ala en tramo 2 B_{i2} .
 - Dintel tipo 3: espesor de ala y alma (tf , tw), anchura de ala B y canto de alma H .
 - Dintel tipo 4: espesor de ala y alma en tramo 1 (tf_{i1} , tw_{i1}), anchura de ala en tramo 1 B_{i1} , canto inicial y canto final del alma en tramo 1 ($H1$ y $H2$), espesor de ala y alma en tramo 2 (tf_{i2} , tw_{i2}), ancho del ala en tramo 2 B_{i2} , espesor de ala y alma en tramo 3 (tf_{i3} , tw_{i3}), anchura de ala en tramo 3 B_{i3} , canto final del alma en tramo 3 $H3$.
- Variables de diseño para los pilares:
 - Tipo de pilar
 - Pilar tipo 1: pt_1
 - Pilar tipo 2: pt_2
 - Pilar tipo 3: pt_3

Cada uno de estos tipos de dintel tendrá, a su vez, variables de diseño que lo definen.

- Pilar tipo 1: espesor de ala y alma (tf , tw), anchura de ala (B), canto inicial $H1$ y canto final $H2$ del alma.
- Pilar tipo 2: espesor de ala y alma en tramo 1 (tf_{i1} , tw_{i1}), anchura de ala en tramo 1 B_{i1} , canto inicial y canto final del alma en tramo 1 ($H1$ y $H2$), espesor de ala y alma en tramo 2 (tf_{i2} , tw_{i2}), ancho del ala en tramo 2 B_{i2} . Espesor de ala y alma en tramo 3 (tf_{i3} , tw_{i3}), ancho del ala en tramo 3 B_{i3} .

Variables de contorno

Otra variable que se cambia durante el proceso de optimización es la rigidez de la unión de la base del pilar a la cimentación. Esta condición de vinculación puede ser:

- Articulada.
- Empotrada.
- Flexible (rigidez variable).

3.2.2 Restricciones

Las restricciones son los límites dentro de los cuales deben de estar situados los valores de las variables de diseño o las variables de control del problema. En nuestro caso tendemos dos tipos de restricciones, *Restricciones de las variables de diseño* y *Restricciones estructurales o de seguridad*. Las restricciones de las *variables de diseño* vienen dadas por los límites superiores e inferiores que fijan el intervalo de movimiento de estas variables, así como por la propia naturaleza discreta de las variables de diseño definidas. Las restricciones estructurales o de seguridad *vienen* determinadas por los estados límites de servicio y estados límites últimos impuestos en la normativa seleccionada para su cumplimiento.

Restricciones de las variables de diseño

Los límites impuestos a las variables de diseño se conocen como restricciones de las variables de diseño.

$$\frac{G_s(x)}{\tilde{G}_s(x)} \leq 1 \quad ; s=1,2,\dots,S^s$$

Donde:

$G_s(x)$ es el valor calculado de la restricción

$\tilde{G}_s(x)$ es el valor limitado de la restricción

S^s es el número de funciones de desigualdad.

Para cada una de las variables de diseño se tienen en cuenta las siguientes restricciones:

- Respecto de las Variables geométricas.
 - Espesores de alma $t_w [mm] \in (4,15)$
 - Espesores de ala $t_f [mm] \in (8,30)$
 - Anchos de ala $B [mm] \in (150,500)$
 - Cantos de alma $H [mm] \in (250,2000)$

Restricciones estructurales o de seguridad

Son los estados límite que debe de cumplir la estructura. Previo a verificar estados límite, el diseñador debe calcular envolventes de tensiones y desplazamientos así como aprovechamiento de las secciones y de las piezas que componen la estructura. Los esfuerzos y los desplazamientos son obtenidos por medio del cálculo matricial lineal, empleando seis grados de libertad por nodo, incluyendo en la matriz los términos de deformación por cortante. En esta tesis doctoral las restricciones estructurales seguidas son las indicadas en el Eurocódigo 1 [57] y Eurocódigo 3 [26]. No afectando al diseño del algoritmo el empleo de cualquier otro código estructural [27] [30] [28].

3.2.3 Parámetros

Se denominan parámetros a todos aquellos datos que son necesarios para realizar la optimización. Mientras que las variables de diseño se van cambiando en el proceso de optimización, los parámetros son datos de entrada que no cambian su valor. Los parámetros son todos aquellos valores tomados como dato proporcionado por el usuario o por los códigos de aplicación. Serán parámetros del problema los siguientes:

- Luz del pórtico, Luz_p .
- Altura del pórtico, H_p .
- Número de crujías, n_vanos .
- Pendiente de la cubierta, p .
- Tipo de pórtico (a dos aguas, múltiple).
- Separación de pórticos, S_p .
- Valor de las cargas permanentes y variables (G, Q).
- Coeficientes de seguridad de acciones ($\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_m...$).
- Coeficientes de simultaneidad de combinaciones (ψ_0, ψ_1, ψ_2).
- Características de los materiales ($E, G, f_y, f_{yd}, f_u...$).
- Criterios de pandeo (longitudes de pandeo y establecimiento de puntos fijos).
- Precios de chapas en función de su espesor, C_{ch} .
- Coste de mano de obra, C_{mo} .

3.2.4 Espacio de representación de diseño

El espacio de representación de diseño está formado por las variables de diseño y los parámetros del problema. Las variables de diseño son las magnitudes sujetas a optimización, mientras que los parámetros son todos aquellos datos necesarios para calcular el pórtico. Los parámetros se mantienen constantes durante el proceso de optimización.

3.2.5 Función objetivo

A la función usada como medida de la eficiencia del diseño, se denomina función objetivo, función mérito o función coste. Esta función puede ser formulada a partir de un objetivo simple, $f_1(x)$, o a partir de objetivos múltiples:

$$F(x) = \{f_1(x), f_2(x) \dots f_n(x)\}$$

En esta Tesis Doctoral, la función es de objetivo único, minimizar es una función de coste de producto terminado $f_1(x)$, sometido a las restricciones de las variables de diseño y a las restricciones de seguridad impuestas por el cumplimiento de Estados Límites de Servicio y Estados Límites Últimos $\frac{G_s(x)}{\bar{G}_s(x)} \leq 1$.

3.2.6 Formulación estándar

La formulación del problema de optimización puede ser matemáticamente expresada del siguiente modo.

- Minimizar $F(x)$
- Restricciones $\frac{G_s(x)}{\bar{G}_s(x)} \leq 1$; $s=1,2,\dots,S^s$
- Dominio $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
 $x_i \in D_j$
 $D_j = (d_1, d_2, \dots, d_n)$

El problema no lineal puede representarse gráficamente como se muestra en la siguiente figura, en función de las variables x_1 y x_2 .

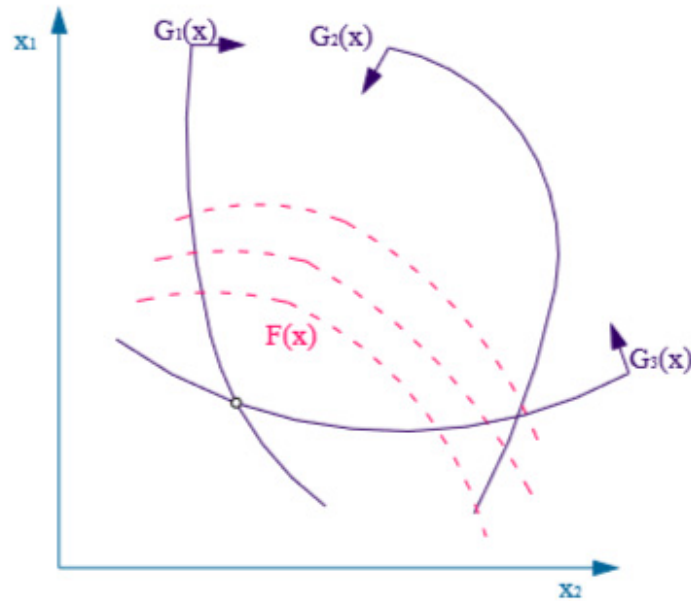


Figura 7. Espacio bidimensional

3.3 Características de los problemas de optimización discretos

En el caso planteado en esta Tesis Doctoral, el problema de optimización discreto no lineal presenta las siguientes características:

- NO existe un criterio simple para terminar el proceso iterativo ya que, dependiendo de los parámetros de entrada, puede no obtenerse una solución que cumpla las restricciones. En cuyo caso se sale del proceso iterativo aún sin cumplir las restricciones del problema.
- El tamaño de desratización de elementos tipo barra, se realiza en función de la geometría de la pieza. En el caso de elementos de inercia variable el tamaño máximo es inferior a 0.25 m.
- El problema de diseño es no lineal debido a la naturaleza de las variables de diseño.
- Las restricciones tienen diferentes formulaciones para diferentes miembros de la estructura (dinteles tipo 1 a 4 y pilares tipo 1 a 3).
- El esfuerzo computacional necesario para obtener resultados satisfactorios con el algoritmo desarrollado, no es una variable crítica en la solución final.

3.4 Técnicas de optimización estructural

El desarrollo de métodos robustos y eficientes para el diseño estructural es uno de los campos de mayor actividad en la ingeniería estructural. Durante las últimas décadas ha habido un crecimiento interesante en los sistemas de resolución de problemas de optimización con algoritmos basados en procesos naturales. Entre éstos cabe destacar programación genética. Estos métodos tienen el inconveniente de que el número de veces que el problema tiene que ser resuelto se incrementa exponencialmente con el número de variables y, además, puede quedar bloqueado en óptimos locales.

Otra interesante técnica que sigue los procesos naturales y, en particular, las funciones del cerebro humano, son las redes neuronales artificiales que simulan la estructura de las redes neuronales. La principal ventaja de una red neuronal bien entrenada es que requiere un esfuerzo computacional bajo para producir una solución aproximada aceptable. No obstante necesitan un periodo de entrenamiento grande y proporcionan resultados aproximados.

Por otro lado los métodos de análisis probabilístico son muy eficientes desde el punto de vista computacional y, entre ellos, las metodologías más robustas están basadas en las técnicas del diseño de experimentos y superficies de respuesta.

En cuanto a las técnicas heurísticas, en los últimos años el número de trabajos de técnicas de optimización empleando estos métodos, han aumentado de forma considerable. Como muestra, solamente en los años 2012 a 2014 aparecen en Sciencedirect aparecen más de 265 artículos. Muchas de estas publicaciones van encaminadas a reducir, no el peso de la estructura, sino su coste. En este mismo sentido se desarrolla el algoritmo planteado en esta tesis doctoral.

Los algoritmos heurísticos están basados en una serie de reglas, algunas de las cuales se apoyan en la experiencia, estas reglas eliminan opciones o posibilidades que a priori ya se sabe que no lograrán el objetivo deseado, de esta manera se obtiene la solución de un modo más rápido. Una de las características de los algoritmos heurísticos es que en ciertos casos no encuentran la solución o se abandona una de los objetivos para seguir cumpliendo con el resto.

En esta Tesis Doctoral se desarrollará un algoritmo de optimización empleando una técnica heurística, basada en el conocimiento y la experiencia acumulados por el Doctorando en el ejercicio de la profesión durante 18 años en el diseño y cálculo de estructuras. Gran parte de las reglas empleadas en el algoritmo se han sacado de la experiencia profesional, tanto reglas que conducen a la solución como reglas que hacen que el algoritmo abandone uno de los objetivos o reduzca su importancia, para seguir cumpliendo con el resto. El algoritmo aquí desarrollado se caracteriza porque termina el proceso aunque no haya sido posible encontrar la función objetivo, en este caso se detecta dicha situación, y emite un aviso al usuario, indicando que la solución obtenida no es la solución objetivo, pero será una aproximación a la solución dentro de las restricciones y variables que presenta el problema.

4. ALGORITMO DE OPTIMIZACION HEURISTICO

4.1 Introducción y objetivos

El empleo de algoritmos heurísticos, para obtener el mínimo coste en el diseño de elementos estructurales, ha ido en aumento en estos últimos años [20] [22] [21] . Las reglas avaladas por la práctica a la hora del establecimiento de reglas y criterios para la optimización estructural, permiten llegar a una solución con menos variables e iteraciones que otro tipo de algoritmos.

En esta Tesis se desarrolla un algoritmo de optimización heurístico que, implementado en un programa realizado en .NET, permita una entrada rápida de todos los parámetros que definen el problema así como una rápida obtención de un diseño de pórtico optimizado.

El algoritmo se diseña para cumplir las restricciones de las variables de diseño y las variables de seguridad estructural, de modo que la condición de salida será cuando se cumpla la función objetivo sometido a todas las restricciones. No obstante también se diseña una condición de salida para los casos en los que exista incompatibilidad entre las restricciones de las variables de diseño y las restricciones estructurales o de seguridad.

El algoritmo así desarrollado obtendrá, como solución, un pórtico en viga armada que verificará los siguientes puntos.

1. Cumplimiento del EC-3 [26] basándose en criterios de aprovechamiento máximo de materiales en ELU y en ELS (siempre que no haya conflicto con las variables de diseño).
2. Diseño con mínimo coste de producto terminado, considerando para ello criterios de consumo de materiales y de costes de fabricación.
3. Empleo de perfiles y chapas comerciales.
4. Mínimo costo de diseño en ingeniería.
5. Repetitividad y homogeneidad de resultados.

4.2 Establecimiento y definición de las variables de diseño

4.2.1 Introducción. Condiciones geométricas

El pórtico en viga armada debe de cumplir una serie de condicionantes que limitan su diseño. Dichos condicionantes, en su mayor parte, vienen determinados por:

- Los sistemas de fabricación y aprovechamiento de materiales.
- Los cerramientos de cubierta y de fachada.
- Los puentes grúa y limitaciones de espacio interiores.
- Capacidad portante del terreno.

Idealmente el diseño del pórtico debería adaptarse a la envolvente del diagrama de momentos, pero esta opción no es viable dado que:

- Se desaprovecharía mucho material.
- Se complicaría la fabricación excesivamente. Lo que encarecería el producto.
- Se tendría una geometría interior del edificio no compatible con la funcionalidad del edificio industrial. Por ejemplo en un pórtico empotrado en su base, tendría más canto en la base que en la ménsula con lo que el gancho del puente grúa pegaría con el pilar.

Por lo tanto se deben establecer una serie de geometrías, que adaptándose en lo posible al diagrama de momentos, cumpla los siguientes criterios:

- Sea compatible con los sistemas constructivos.
- Con bajo coste de fabricación.
- Usando materiales comerciales y yendo a su máximo aprovechamiento.
- Sea transportable.
- Sea fácilmente montable.

4.2.2 Definición de la geometría del pórtico

El pórtico está formado por dinteles, pilares y ménsulas. Han sido definidos 4 diferentes geometrías de dintel, lo que se han denominado “tipos de dintel” y se han numerado del 1 a 4. Asimismo se han definido tres tipos de pilar numerados del 1 a 3.

Cada dintel se divide en 6 tramos (3 para el agua izquierda y 3 para el agua derecha).

Cada pilar se divide en 3 tramos (uno desde cumbre hasta la ménsula y dos más desde la ménsula hasta su placa base).

Todos los tramos tienen un inicio y un final. Cada inicio de tramo se caracteriza porque es el tramo de la pieza más alto, el otro extremo es el final del tramo.

La siguiente figura indica la descomposición de un pórtico tipo en pilares y dinteles con sus tramos correspondientes. El número rojo rodeado por un círculo indica el tramo de pieza dentro del dintel o pilar. Las letras “I”, “F”, indican inicio y final de tramo.

Las longitudes de los tramos del dintel son:

Tramos 1 y 6: $0.2 \cdot \text{luz del pórtico}$

Tramos 2 y 5: $0.20 \cdot \text{luz del pórtico}$

Tramo 3 y 4: $0.1 \cdot \text{luz del pórtico}$

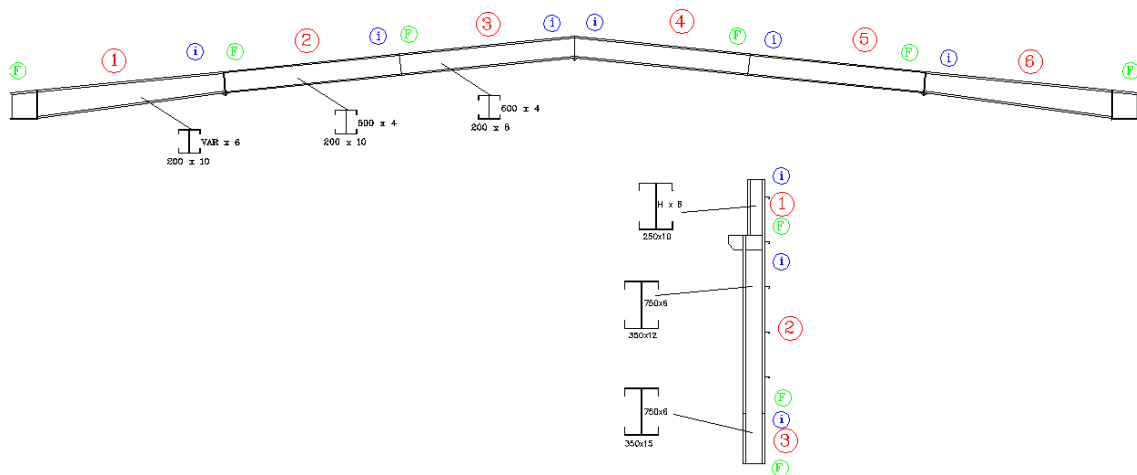


Figura 8. Partes del pórtico en viga armada

Geometrías de dinteles

El dintel del pórtico será de una de las siguientes geometrías:

- Dintel tipo 1.
 - Atornillado.
 - Variable, con su canto máximo en cabeza de pilar y con su canto mínimo en cumbrera.
 - Unido con el pilar por su cara inferior.
 - Con longitud máxima 12.5m para que sea transportable.
 - Con canto mínimo no menor que el ancho del ala. Para que sea soldable por máquinas automáticas.
 - Que la suma del canto máximo + canto mínimo, se obtengan de una chapa comercial, o de un submúltiplo, para no desperdiciar material.



Figura 9. Dintel tipo 1

- Dintel tipo 2.
 - Atornillado.
 - Formado por dos tramos cada agua. El primer tramo es de inercia variable y el segundo de inercia constante.
 - Unido con el pilar por su cara inferior. y con unión atornillada, en el punto de mínimo momento, entre el tramo variable y constante. El tramo variable tiene de longitud el 20% de la luz del pórtico.
 - Se emplea en naves de más de 25m de luz donde el dintel tipo 1 pasaría de 12.5m de longitud.
 - El canto de la parte del dintel de inercia constante, debe ser el mismo con el que comienza la pieza variable del dintel. La pieza variable puede tener diferente ancho de ala y diferente espesor que la parte constante. Por supuesto también tendrá casi siempre diferente espesor de alma.
 - La parte variable del dintel también cumplirá que la suma del canto máximo + canto mínimo, se obtengan de una chapa comercial, o de un submúltiplo, para no desperdiciar material.

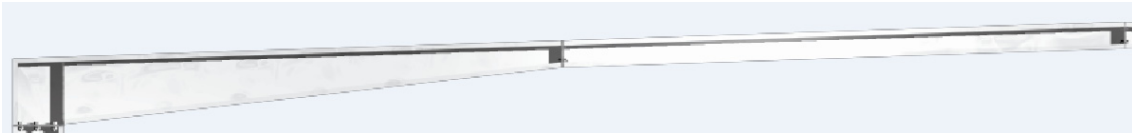


Figura 10. Dintel tipo 2

- Dintel tipo 3.
 - Atornillado.
 - Formado por un solo tramo de inercia constante. También unido con el pilar por su cara inferior.
 - Se emplea en naves de menos de 8m de luz, donde no compensa hacer el dintel variable.

- Dintel tipo 4.
 - Atornillado.
 - Formado por tres tramos cada agua. El primer tramo es de inercia variable, el segundo de inercia constante y el tercero de inercia variable.
 - Unido con el pilar por su cara inferior. y con unión atornillada, en el punto de mínimo momento, entre el tramo variable y constante. El tramo primer tramo variable tiene de longitud el 20% de la luz del pórtico.
 - Se emplea en naves de más de 30m de luz donde en la cumbre se tiene un aumento de momento. No es un caso muy frecuente.
 - El canto de la parte del dintel de inercia constante, debe ser el mismo con el que comienzan ambos tramos variables. Las piezas variables puede tener diferente ancho de ala y diferente espesor que la parte constante. Por supuesto también tendrá casi siempre diferente espesor de alma.
 - La parte variable del dintel también cumplirá que la suma del canto máximo + canto mínimo, se obtengan de una chapa comercial, o de un submúltiplo, para no desperdiciar material.



Figura 11. Dintel tipo 4

Vinculaciones entre los tramos de los dinteles

DINTEL TIPO 1

Tramos 1, 2 y 3

- Mismo espesor del alma.
- Mismo ancho de ala.
- Mismo espesor de ala.
- El canto del inicio del tramo 3 debe ser el mismo que el inicio del tramo 4.

Tramos 4, 5 y 6

- Mismo espesor del alma.
- Mismo ancho de ala.
- Mismo espesor de ala.
- El canto del inicio del tramo 4 debe ser el mismo que el inicio del tramo 3.

DINTEL TIPO 2

- Tramo 1. Inicia con mismo canto que finaliza tramo 2.
- Tramo 3. Igual a tramo 2.
- Tramo 4. Mismo canto y mismo ancho de ala que tramo 3. Igual a tramo 5.
- Tramo 6. Inicia con mismo canto que finaliza tramo 5.

DINTEL TIPO 3

Tramos 1, 2 y 3

- Mismo espesor del alma.
- Mismo ancho de ala.
- Mismo espesor de ala.
- Mismo canto.

Tramos 4, 5 y 6

- Mismo espesor del alma.
- Mismo ancho de ala.
- Mismo espesor de ala.
- Mismo canto.

DINTEL TIPO 4

- Tramo 1. Inicia con mismo canto que finaliza tramo 2.
- Tramo3. Finaliza con mismo canto que inicia tramo2.
- Tramo4. Inicia con mismo canto que inicia tramo 3. Finaliza con mismo canto que tramo 5.
- Tramo 6. Inicia con mismo canto que finaliza tramo 5.

Las vinculaciones entre tramos es necesario tenerlas en cuenta en establecimiento de las secciones de las barras.

Geometrías de pilares

Los pilares del pórtico serán de una de las siguientes geometrías:

- Pilar tipo 1.
 - Atornillado en la base con 4 pernos para materializar articulación. Unido atornillado al dintel. Alma de inercia variable. Alas constantes en ancho y espesor. Canto en la base igual al ancho del ala. Canto superior similar al canto del dintel al que se une.
 - Se emplea en naves articuladas en su base. Normalmente sin puente grúa o con puente grúa inferior a 5Tm para poder controlar el desplazamiento horizontal del pórtico. Dado que se puede anclar con 4 pernos a la cimentación (y así se recomienda para facilitar el montaje), debe también de aprovecharse este pequeño empotramiento de la base para considerar un muelle en el apoyo que descarga de esfuerzos el nodo superior del pórtico y reduce desplazamientos, punto crítico de los pórticos articulados.



Figura 12. Pilar tipo 1

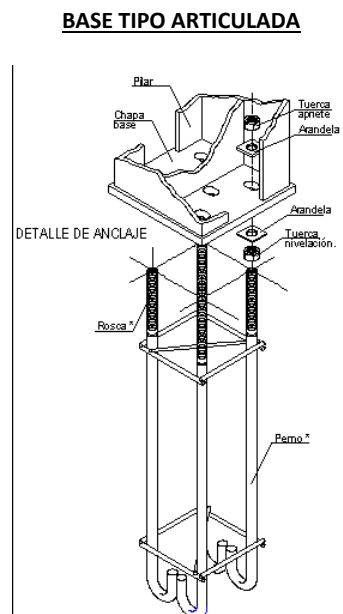


Figura 13. Base de pilar tipo 1

- Pilar tipo 2.
 - Empotrado. Se utiliza para controlar los desplazamientos, tanto horizontales como verticales, del pórtico. Tiene el inconveniente que la cimentación sale mucho más costosa. Bien es cierto que el pórtico empotrado sale del mismo peso o ligeramente inferior a su equivalente en articulado.
 - Es de aplicación en naves sin puente grúa o con puente grúa inferior a 5Tm y con alturas superiores a 8m, donde compense hacer el cambio de sección. No es un pilar muy habitual. Se transporta en una pieza y la unión entre zona variable y zona constante se realiza soldada o atornillada.

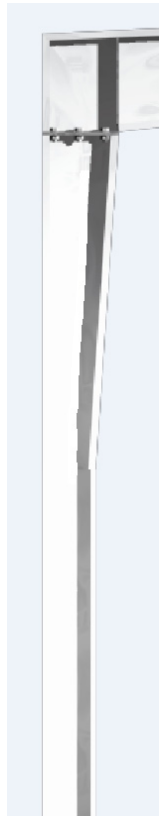


Figura 14. Pilar tipo 2

- Pilar tipo 3.
 - Empotrado. De sección recta, aunque puede variar su canto por encima de la ménsula así como el ala y el espesor. También puede cambiar el espesor del alma y de ala en la zona del empotramiento (pero no cambia el canto ni el ancho de ala). Este tipo de pilares se utiliza en pórticos altos (superiores a 12m) y en pórticos con puente grúa superior a 5Tm.



BASE TIPO EMPOTRADA

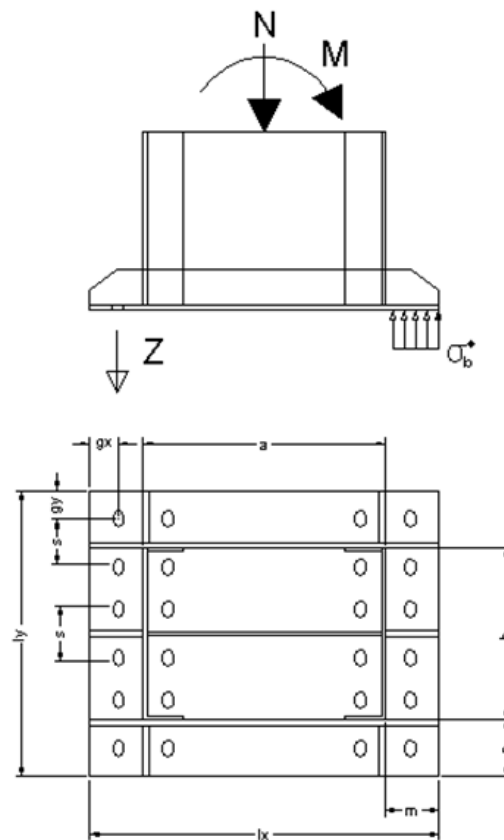


Figura 15. Pilar tipo 3

Figura 16. Base tipo pilar empotrado en cimentación

Vinculaciones entre los tramos de los pilares

PILAR TIPO 1.

- Mismo espesor del alma.
- Mismo ancho de ala.
- Mismo espesor de ala.

PILAR TIPO 2.

- Tramo 1. Canto no mayor que Tramo2, ancho ala no mayor que Tramo 2.
- Tramo2. Mismo canto y mismo ancho de ala que tramo 3.

PILAR TIPO 3.

- Tramo 1. Mismo canto y mismo ancho de ala que tramo 2.
- Tramo2. Mismo canto y mismo ancho de ala que tramo 3.

Los tipos de pilar y de dintel serán variables de diseño.

4.2.3 Definición de las condiciones de apoyo

Otra de las variables de diseño que debe definir el algoritmo es el tipo de vinculación con la cimentación. Las uniones de las bases de los pilares del pórtico a la cimentación pueden ser:

- Articuladas.
- Parcialmente empotradas.
- Empotradas.

Las uniones articuladas transmiten a la cimentación reacciones verticales y horizontales, pero no transmiten momentos.

Las uniones parcialmente empotradas transmiten una parte del momento a la cimentación.

Las uniones empotradas transmiten a la cimentación la totalidad del momento que llega a la base del pilar.

Ninguna condición práctica de ejecución de la unión entre la cimentación y la base será perfectamente articulada ni perfectamente empotrada, pero cada solución se acercará más a uno u otro extremo.

La decisión de tomar una base empotrada o articulada no es siempre evidente, debe de tenerse en cuenta criterios de minimización de costes y cumplimiento de desplazamientos horizontales.

Un pórtico con bases articuladas presenta muy poca rigidez en el plano del pórtico con lo que los desplazamientos horizontales son muy grandes y el reducir estos desplazamientos conlleva gastar mucho acero. A cambio se obtiene una cimentación más económica.

Los apoyos articulados se utilizarán en casos en los que por alguna circunstancia no se pueda transmitir grandes cargas al apoyo, por ejemplo, terrenos con reducida capacidad portante, apoyos sobre muros, apoyos sobre forjados.... O en naves bajas y sin puente grúa donde el criterio de desplazamiento horizontal es $u \leq \frac{H}{150}$, siendo H la altura del pórtico.

Cuando la altura del pórtico supera los 8m y/o el puente grúa es de 5Tm ó más, los desplazamientos horizontales no es posible controlarlos, de un modo económico, haciendo bases articuladas. Por eso en todos esos casos las bases deben ser empotradas. También serán empotradas todas las bases de los pilares interiores de los pórticos adosados ya que es una solución más económica.

Los siguientes ejemplos apoyan estas afirmaciones.

La siguiente imagen muestra el resultado del cálculo de las dos naves adosadas de 26m de luz y 8m de altura en un entorno de viento tipo 4. Con apoyos articulados

Como puede verse, para cumplir los ELU el pórtico pesaría 5907kg, sin embargo para cumplir con los desplazamientos, en especial los horizontales, el peso de acero es necesario subirlo a 8494kg, un 44% más, lo que hace el pórtico antieconómico.

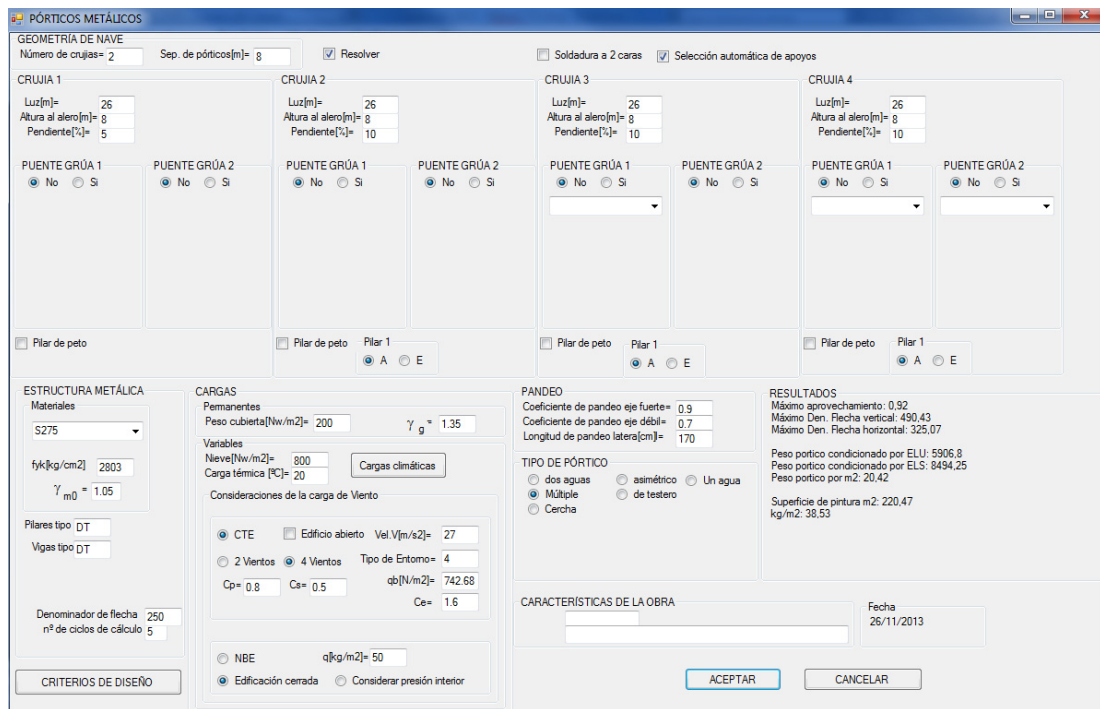


Figura 17. Pórtico articulado condicionado por ELS

La siguiente imagen muestra el mismo pórtico pero optimizado para apoyos empotrados. Como puede verse, la misma solución cumple con ELU y ELS, con un peso de 6059kg. Un 29% menos de peso que la solución anterior.

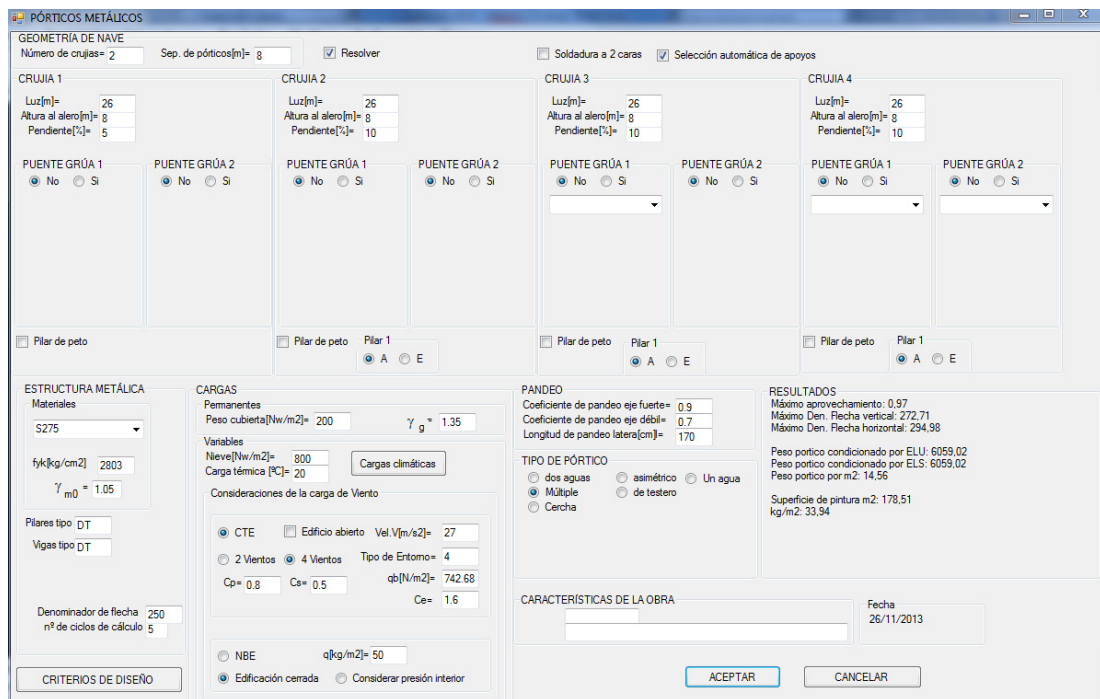


Figura 18. Pórtico empotrado condicionado por ELU

El algoritmo seleccionará, de partida, entre apoyos articulados o empotrados. En el caso de apoyos articulados, aumentará la rigidez del apoyo si es necesario reducir desplazamientos horizontales. Esta rigidez se limitará a un valor tal que no se alcance plastificación en la sección de la base ni tampoco se perjudique el coste de la cimentación.

4.2.4 Definición de perfiles armados doble T. Secciones eficientes en viga armada.

En este apartado se definen las secciones en doble T que forman parte de las variables de diseño.

Los perfiles de pórticos en viga armada funcionan predominantemente a flexión. Por lo que el primer objetivo que nos fijamos es buscar secciones eficientes en viga armada. Es decir que tengan una relación alta entre Módulo resistente y peso de la sección. Interese que las alas, sean al menos clase 3 para poder aprovechar toda su capacidad. Respecto al alma, debe de tener capacidad suficiente para soportar el cortante y no abollar. Normalmente interesa tener almas en clase 4 cuya área eficaz no sea inferior al 80% del área neta.

A continuación se compara el comportamiento, en una viga a flexión de 10m de longitud, de una sección con alma y alas en clase 3 con otra sección con las mismas alas y alma en clase 4. La siguiente salida de resultados muestra una viga armada de acero S275 con alas de 200x8 y alma de 500x4. El aprovechamiento de la viga, trabajando a flexión es de 0.42.

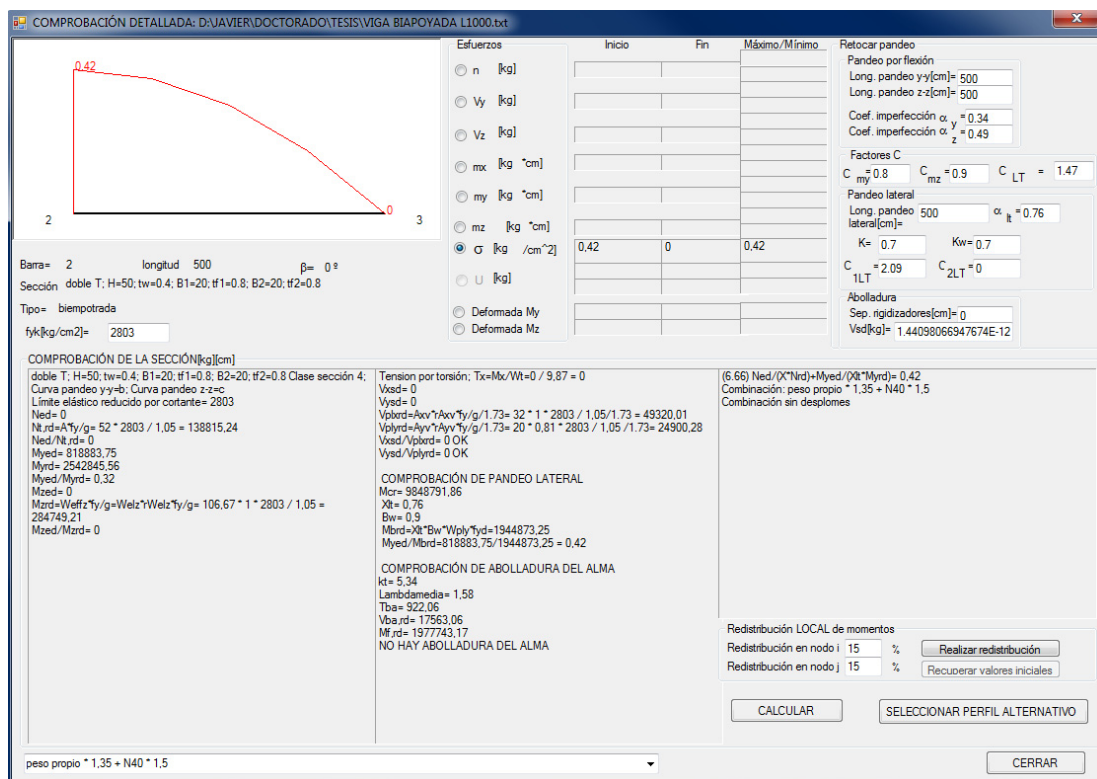


Figura 19. Resultado de comprobación de viga armada eficiente

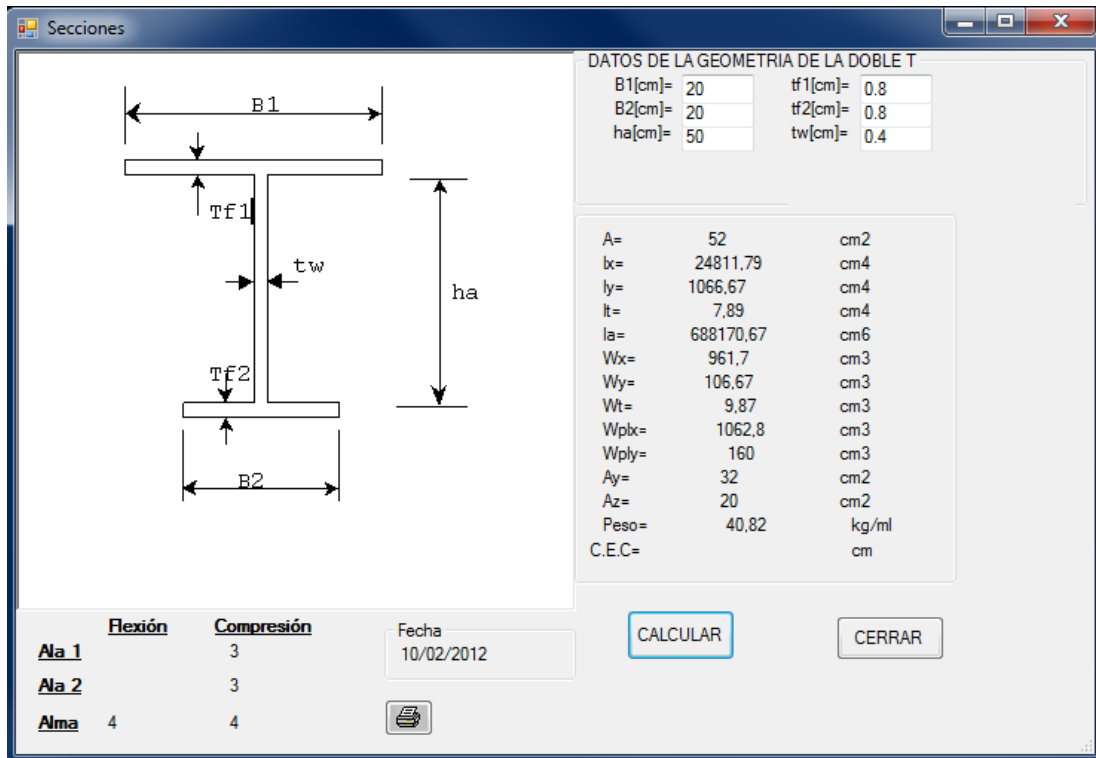


Figura 20. Propiedades mecánicas de sección transversal de viga armada eficiente

El siguiente resultado muestra una viga armada de acero S275 con alas de 200x8 y alma de 500x5. El aprovechamiento de la viga, trabajando a flexión es de 0.41. Prácticamente el mismo que en el caso anterior pero con un 9.63% más de peso.

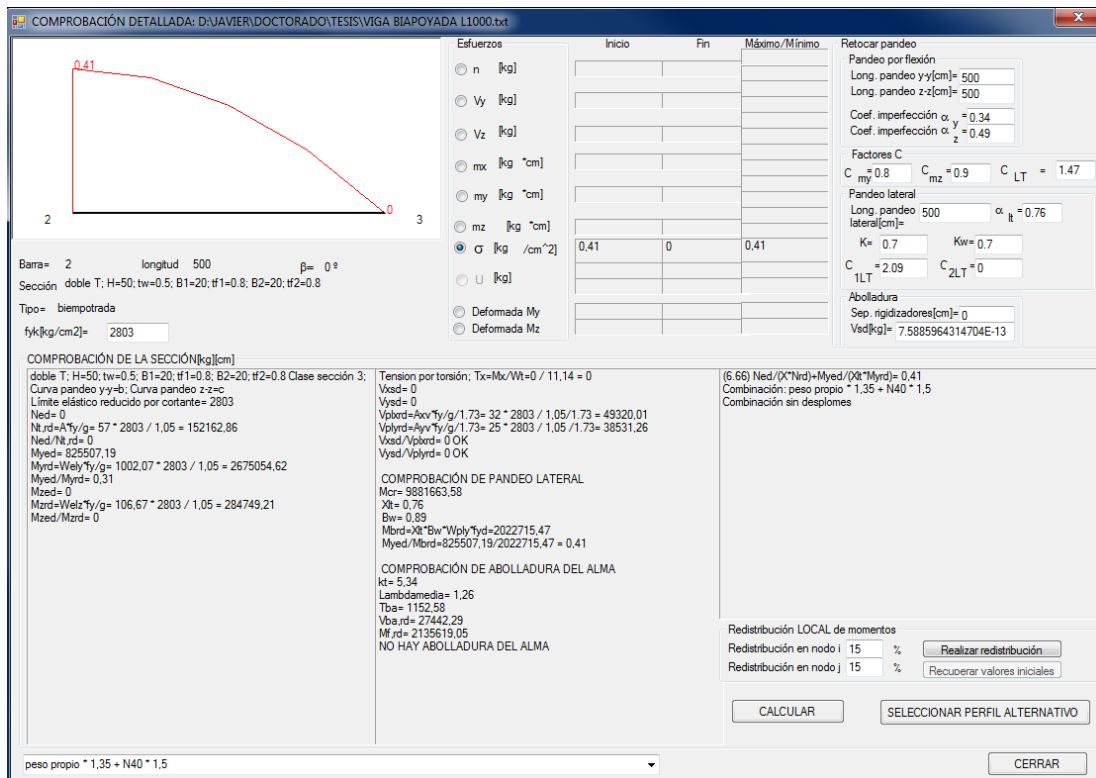


Figura 21. Resultado de comprobación de viga armada NO eficiente

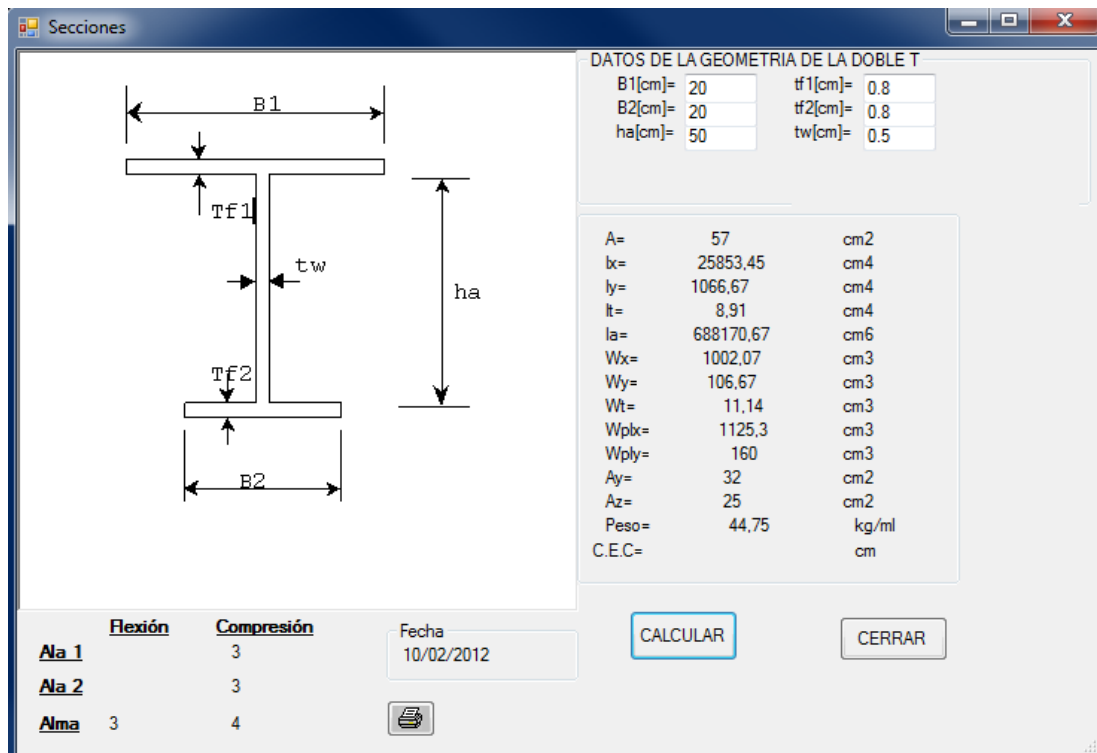


Figura 22. Propiedades mecánicas de sección transversal de viga armada NO eficiente

El incremento de peso con alma clase 3 respecto a la de alma con clase 4 es 9.63% mientras que el incremento en resistencia es de solo un 3%. Cuanto mayor sea el canto de la pieza mayor es el ahorro que se obtiene diseñando el alma en clase 4.

Como límite máximo a la esbeltez del alma se propone $0.006 (tw/h)$, valor con el que se limitaba en la anterior EA-95.

A continuación se propone una lista de secciones para viga armada. Las que están marcadas en rojo son secciones que no son eficientes en el sentido que existe otra viga armada de mayor canto, con el mismo peso y mayor módulo resistente. Pero se mantienen dentro de la lista porque pueden ser necesarias por motivos constructivos (por mantener un canto dado).

En la tabla siguiente el canto, el ancho de ala y los espesores están expresados en mm. Dicha tabla es la base con la que se ha generado la variable de diseño de **Perfiles doble T**, codificada como **dt(1),dt(2),...dt(i)**.

<u>CANTO</u> <u>(h)</u>	<u>ANCHO</u> <u>ALA (B)</u>	<u>ESP.ALA</u> <u>(tf)</u>	<u>ESP.ALMA</u> <u>(tw)</u>	<u>Wyel</u> <u>[cm³]</u>	<u>Wzel</u> <u>[cm³]</u>	<u>PESO</u> <u>[kg]</u>	<u>Relación</u> <u>Wy/peso</u>	<u>IPE con W</u> <u>similar</u>	<u>[kg/m]</u> <u>de</u> <u>Ahorro</u> <u>en V.A</u>
250	150	8	3	329.66	60	24.73	13.33	IPE240	6.39
250	150	10	3	404.49	75	29.44	13.74	IPEA270	3.92
250	200	8	3	429.76	106.67	31.01	13.86	IPE270	5.14
250	200	10	3	529.68	133.3	37.29	14.20	IPEA300	2.50
250	200	12	3	629.77	160	43.57	14.45	IPEA330	-0.31
375	150	8	3	540.11	60	30.62	17.64	IPEA300	9.12
375	150	10	4	651.88	75	35.33	18.45	IPEA330	9.07
375	200	8	4	690.18	106.67	36.9	18.70	IPEA330	9.53
375	200	10	4	836.51	133.33	43.18	19.37	IPEA360	8.29
375	200	12	4	988.98	160	49.46	20.00	IPE360	11.89
375	250	10	4	1027.14	208.33	51.03	20.13	IPEA400	6.63
375	250	12	4	1214.19	250	58.88	20.62	IPE400	10.05
375	300	12	4	1439.41	360	68.3	21.07	IPEA450	4.04
416	150	8	4	610.48	60	31.9	19.14	IPE300	13.09
416	150	10	4	734.42	75	36.61	20.06	IPE330	13.56
416	200	8	4	776.93	106.67	38.18	20.35	IPE330	14.06
416	200	10	4	942.54	133.33	44.46	21.20	IPE360	14.46
416	200	12	4	1108.26	160	50.74	21.84	IPEA400	10.61
416	250	10	4	1150.65	208.33	52.31	22.00	IPEA400	10.94
416	250	12	4	1358.06	250	60.16	22.57	IPEA450	8.24
500	150	10	4	910.54	75	39.25	23.20	IPE360	18.13
500	200	8	4	961.7	106.67	40.82	23.56	IPE360	18.73
500	200	10	4	1160.64	133.33	47.1	24.64	IPE400	19.23
500	200	12	4	1359.69	160	53.38	25.47	IPEA450	14.95
500	250	10	4	1410.74	208.33	54.95	25.67	IPEA450	15.36

Tabla 2. Perfiles armados en doble T. Comparativa de ahorro en peso con equivalente comercial

CANTO (h)	ANCHO ALA (B)	ESP.ALA (tf)	ESP.ALMA (tw)	Wyel [cm³]	Wzel [cm³]	PESO [kg]	Relación Wy/peso	IPE con W similar	[kg/m] de Ahorro en V.A
625	150	8	5	1067.52	60	43.37	24.61	IPEA400	15.88
625	150	10	5	1253.16	75	48.08	26.06	IPE400	21.79
625	200	8	5	1317.56	106.67	49.65	26.54	IPE400	22.59
625	200	10	5	1565.74	133.33	55.93	27.99	IPE450	24.02
625	200	12	5	1814.02	160	62.21	29.16	IPEA500	20.14
625	250	10	5	1878.31	208.33	63.78	29.45	IPEA500	20.72
625	250	12	5	2189.15	250	71.63	30.56	IPE500	27.55
750	150	8	6	1450.85	60	54.17	26.78	IPEA450	17.50
750	150	10	6	1673.08	75	58.88	28.42	IPE450	24.81
750	200	8	6	1750.88	106.67	60.45	28.96	IPEA500	19.74
750	200	10	6	2048.15	133.33	66.73	30.69	IPE500	27.82
750	200	12	6	2345.5	160	73.01	32.13	IPEA550	23.84
750	250	10	6	2423.21	208.33	74.58	32.49	IPEA550	24.61
750	250	12	6	2795.62	250	82.43	33.92	IPEA600	26.09
750	300	12	6	3245.73	360	91.85	35.34	IPE600	35.12
1000	200	8	8	2912.44	106.67	87.92	33.13	IPEA600	24.14
1000	200	10	8	3307.39	133.33	94.2	35.11	IPE600	34.56
1000	200	12	8	3702.42	160	100.48	36.85	IPE600	38.68
1000	250	10	8	3807.43	208.33	102.05	37.31	IPE600	39.72
1000	250	12	8	4302.51	250	109.9	39.15	IPE750X137	28.54
1000	300	12	8	4902.59	360	119.32	41.09	IPE750X147	39.64
1000	250	15	8	5045.32	312.5	121.675	41.47	IPE750X147	40.62
1000	300	15	8	5795.48	450	133.45	43.43	IPE750X173	48.61
1000	416	12	8	6222.78	672.4	141.174	44.08	IPE750X173	50.45
1000	350	15	8	6545.65	612.5	145.225	45.07	IPE750X196	57.53
1000	350	16	8	6893.38	653.33	150.72	45.74	IPE750X196	59.54
1000	350	20	8	8284.74	816.67	172.7	47.97	IPE750X196	65.90

Tabla 2 (continuación 1). Perfiles armados en doble T. Comparativa de ahorro en peso con equivalente comercial

<u>CANTO</u> <u>(h)</u>	<u>ANCHO</u> <u>ALA (B)</u>	<u>ESP.ALA</u> <u>(tf)</u>	<u>ESP.ALMA</u> <u>(tw)</u>	<u>Wyel</u> <u>[cm³]</u>	<u>Wzel</u> <u>[cm³]</u>	<u>PESO</u> <u>[kg]</u>	<u>Relación</u> <u>Wy/peso</u>	<u>IPE con W</u> <u>similar</u>	<u>[kg/m]</u> <u>de</u> <u>Ahorro</u> <u>en V.A</u>
1250	300	12	10	7055	360	154.645	45.62	IPE750X196	59.20
1250	250	15	10	7231.29	312.5	157	46.06	IPE750X196	60.50
1250	300	15	10	8168.92	450	168.775	48.40	IPE750X196	67.06
1250	416	12	10	8705.66	672.4	176.499	49.32	IPE750X196	69.47
1250	350	15	10	9106.55	612.5	180.55	50.44	IPE750X196	72.26
1250	350	16	10	9540.28	653.33	186.045	51.28	IPE750X196	74.29
1250	350	20	10	11275.6	816.67	208.025	54.20	IPE750X196	80.86
1250	416	18	10	11758.1	1008.6	215.687	54.51	IPE750X196	81.52
1250	416	20	10	12776	1120.67	228.749	55.85	IPE750X196	84.26
1250	416	22	10	13794	1232.73	241.811	57.04	IPE750X196	86.59
1250	416	25	10	15321.4	1400.83	261.405	58.61	IPE750X196	89.52
1500	416	12	12	11809.6	672.4	219.674	53.76	IPE750X196	79.91
1500	350	15	12	12287.5	612.5	223.725	54.92	IPE750X196	82.37
1500	350	16	12	12806.9	653.33	229.22	55.87	IPE750X196	84.30
1500	350	20	12	14884.9	816.67	251.2	59.26	IPE750X196	90.68
1500	416	18	12	15466.1	1008.6	258.862	59.75	IPE750X196	91.54
1500	416	20	12	16685.3	1120.67	271.924	61.36	IPE750X196	94.29
1500	416	22	12	17904.6	1232.73	284.986	62.83	IPE750X196	96.66
1500	416	25	12	19734	1400.83	304.58	64.79	IPE750X196	99.67
1500	416	25	15	20822.7	1400.83	339.905	61.26	IPE750X196	94.12
1500	500	25	12	23106.9	2083.33	337.55	68.45	IPE750X196	104.83

Tabla 2(continuación 2). Perfiles armados en doble T. Comparativa de ahorro en peso con equivalente comercial

La Tabla 2 refleja, en la columna de la derecha, el ahorro por metro lineal de la viga armada con respecto a un perfil comercial laminado en caliente con un módulo resistente muy similar. Como puede verse, a mayor peso del perfil mayor ahorro en material. Sin embargo el ahorro de material no significa necesariamente un ahorro de coste dado que la fabricación de la viga armada en un taller metálico también tiene su coste.

En los siguientes apartados se estudian los costes de fabricación de la viga armada y se obtiene el coste total del perfil. El objetivo es buscar a partir de que canto o de que modulo resistente es más económico diseñar con viga armada que con perfil laminado en caliente.

4.2.5 Definición de anchos de ala y cantos de alma

Dado que el material a usar debe ser comercial y de una amplitud limitada, se usará el siguiente material para componer los perfiles armados.

Alas de los perfiles armados

PESO DE ALAS CLASE 3 EN COMPRESIÓN		
ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	PESO (kg/m)
150	8	9.42
150	10	11.775
200	8	12.56
200	10	15.7
200	12	18.84
250	10	19.625
250	12	23.55
250	15	29.4375
300	12	28.26
300	15	35.325
333	12	31.3686
350	15	41.2125
350	16	43.96
350	20	54.95
416	12	39.1872
416	18	58.7808
416	20	65.312
500	20	78.5
500	25	98.125

Tabla 3. Alas de perfiles armados

Almas de los perfiles armados

Las siguientes tablas representan los cantos, en mm, de las almas empleadas en los perfiles de viga armada. Todos los valores se corresponden con anchos comerciales.

ALMAS CONSTANTES
250
375
416
500
625
750
1000
1250
1500
2000
2500

Tabla 4. Cantos de Almas constantes de viga armada

Con las alas y almas mencionadas, se forman las geometrías que configuran el pórtico.

4.2.6 Definición de espesores

Los espesores de alma y alas serán otra variable de diseño que se depende del material comercial que proporcionan las siderúrgicas. La chapa se puede obtener en formato plano o en formato de bobina.

La laminación de chapa en formato plano se realiza con las relaciones indicadas en la siguiente tabla.

CHAPA PLANA EN FORMATO COMERCIAL	
ESPESOR	DIMENSIONES
Desde 12mm hasta 40mm	12000mm X 2500mm
45mm	11000mm X 2500mm
50mm	10000mm X 2500mm

Tabla 5. Chapa plana en formato comercial

La longitud del formato de chapa plana se va acortando a medida que va subiendo el espesor puesto que hay una limitación de 9.5Tm como peso máximo de chapa que se puede laminar.

Ocasionalmente puede haber en el mercado otras dimensiones de chapa. También se pueden conseguir las dimensiones que se necesiten bajo pedido a medida a siderúrgica, pero esto conlleva plazos de espera y cantidades que a veces son inasumibles para el proyecto que se desarrolla.



Figura 23. Chapa plana para fabricación de viga armada

A la hora de diseñar debe tenerse presente estos condicionantes, puesto que realizar empalmes por soldadura a tope en chapas de gran espesor (más de 20mm), para conseguir una chapa más largas, es costoso y debe realizarse siempre con inspección 100% de la longitud del cordón de soldadura para garantizar que no existen defectos (falta de penetración, faltas de fusión, impurezas...).

La bobina se suministra enrollada con el ancho determinado en la siguiente tabla, y con un peso que puede llegar hasta las 20Tm.

BOBINA COMERCIAL	
ESPESOR	ANCHO
Desde 2mm hasta 15mm	1000mm
Desde 2mm hasta 15mm	1250mm
Desde 2mm hasta 15mm	1500mm
Desde 2mm hasta 15mm	2000mm

Tabla 6. Bobina en formato comercial

En este caso la longitud no será un factor determinante a la hora de diseñar piezas, pues podríamos hacer una pieza continua, de gran longitud, sin empalmes (el problema sería el transporte).

La bobina es necesario aplanarla para obtener la chapa plana de la que se formará la pieza. Actualmente existen en el mercado aplanadoras que llegan hasta 20mm con lo que en ocasiones también es posible conseguir la chapa de 20mm a medida.



Figura 24. Bobina para fabricación de viga armada

El “Fleje” se obtiene de eslitar (cortar longitudinalmente la bobina y volver a enrollarla) una bobina comercial. Con lo que el ancho del fleje siempre es un submúltiplo del ancho de bobina.

FLEJE		
ESPESOR	ANCHO	PROCEDE DE BOBINA DE ANCHO
Desde 2mm hasta 15mm	150mm	1500mm
Desde 2mm hasta 15mm	200mm	1000mm
Desde 2mm hasta 15mm	250mm	1000mm ó 1500mm
Desde 2mm hasta 15mm	333mm	1000mm
Desde 2mm hasta 15mm	375mm	1500mm
Desde 2mm hasta 15mm	416mm	1250mm
Desde 2mm hasta 15mm	500mm	1000mm ó 1500mm
Desde 2mm hasta 15mm	625mm	1250mm
Desde 2mm hasta 15mm	750mm	1500mm

Tabla 7. Fleje comercial

El fleje se suministra enrollado, al igual que la bobina, y es necesario aplanarlo para fabricar las piezas. El fleje se obtiene de subdivisiones de la bobina. La columna de la derecha de la tabla anterior indica el ancho de bobina del que se obtiene el fleje.

Las almas, ya sean de inercia constante (almas rectas) o de inercia variable (con distinto canto en un extremo que en el otro), se obtienen normalmente de bobina o fleje. Cuando las almas son de inercia variable se diseñarán de modo tal que la suma del canto máximo más el canto mínimo del ancho de una bobina (1000mm, 1250mm, 1500mm ó 2000mm) para que sea posible sacar dos piezas de un ancho de bobina con el máximo aprovechamiento. Esto se puede ver en las siguientes figuras.

$$h_1 + h_2 = \{1000, 1250, 1500 \text{ ó } 2000 \text{ mm}\}$$

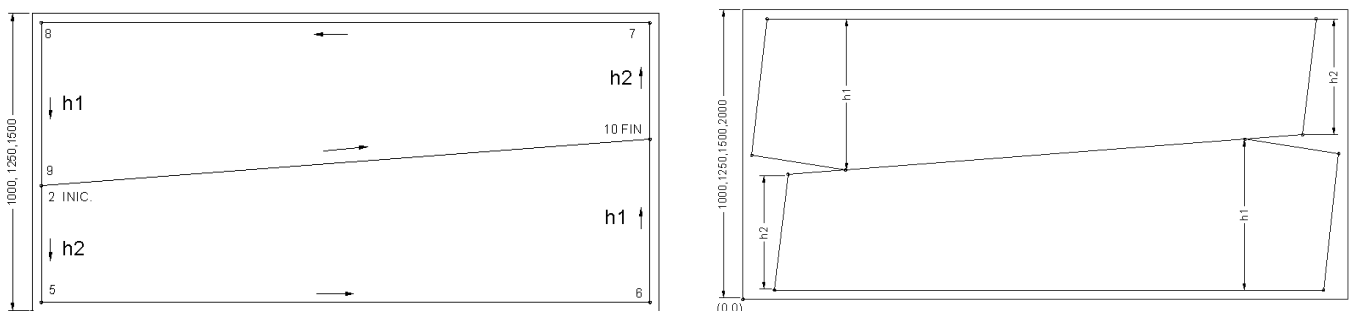


Figura 25. Esquema 1 para corte de almas procedentes de chapa comercial

Si el ancho de las piezas supera el ancho de la bobina en pocos milímetros, es posible desplazar una pieza sobre la otra, como se muestra en la siguiente figura, para ganar la diferencia. A cambio saldrá una chapa más larga, los recortes se aprovechan para rigidizadores y soportes.

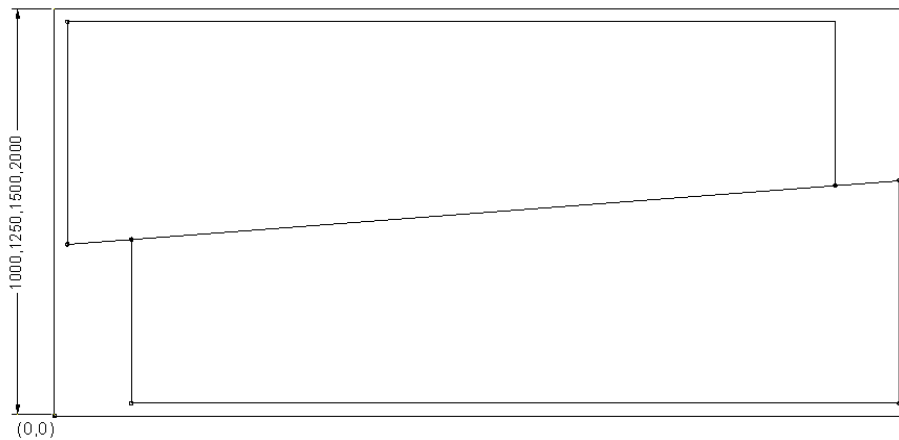


Figura 26. Esquema 2 para corte de almas procedentes de chapa comercial

Ejemplos típicos de almas variables para adaptarse a una distribución variable de momentos son los indicados en la siguiente tabla.

ALMAS VARIABLES			
ANCHO DE BOBINA[mm]	h1[mm]	h2[mm]	Espesor[mm]
Formato 2500	2000(*)	1500	15 ó superior
1500	1500(*)	1250	12 ó superior
1500	1200	300	10 ó superior
1500	1000(*)	500	8 ó superior
1500	875(*)	625	8 ó superior
1500	1200	300	10 ó superior
1250	1250(*)	1000	10 ó superior
1250	1000	250	8 ó superior
1250	834(*)	416	7 ó superior
1250	950	300	8 ó superior
1250	750(*)	500	6 ó superior
1000	1000(*)	750	8 ó superior
1000	700	300	6 ó superior
1000	750	250	6 ó superior
1000	584(*)	416	5 ó superior

Tabla 8. Almas variables para fabricación de viga armada

(*) Estas piezas son normalmente utilizadas en como refuerzo de un dintel de inercia constante en las proximidades del pilar, conectando por su parte estrecha (h_2) con la parte de dintel de inercia constante y por la parte más ancha (h_1) con el pilar del pórtico. Esta pieza se indica en la siguiente figura.

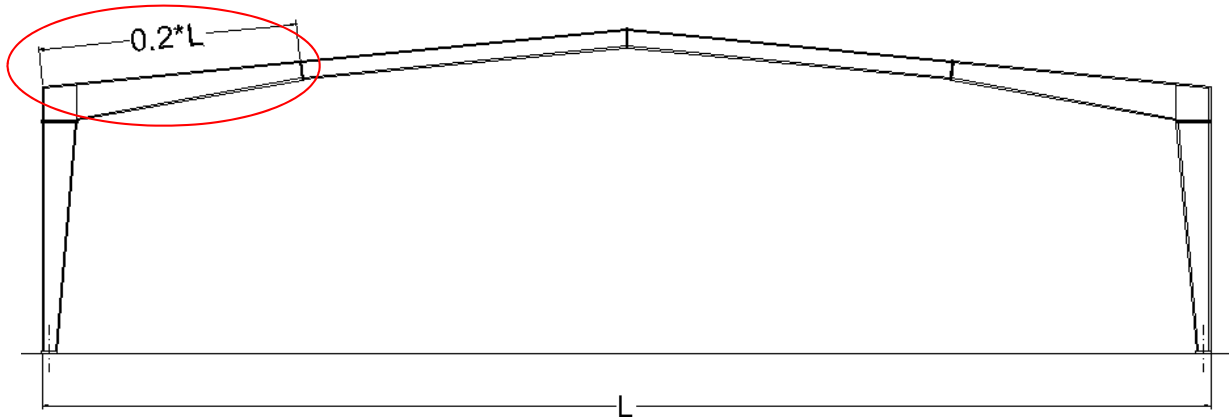


Figura 27. Aplicación de viga de inercia variable en pórtico armado.

4.2.7 Definición de las variables de coste en fabricación.

El conocimiento y estudio de los rendimientos de fabricación se realizan en este apartado con el fin de obtener unas variables de diseño que cuantifiquen los costes de fabricación del pórtico.

4.2.7.1 Introducción

La optimización estructural no está ligada únicamente al máximo aprovechamiento de los materiales, juega un papel fundamental y muy determinante los costes asociados a la fabricación de la estructura, es evidente que no tiene el mismo coste de fabricación un tubo laminado en caliente, por ejemplo un RHS 200X200X10 que ese mismo perfil realizado por soldadura a partir de 4 platabandas de 200x10.

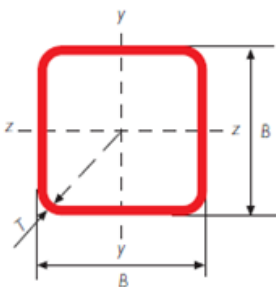


Figura 28. Tubo comercial

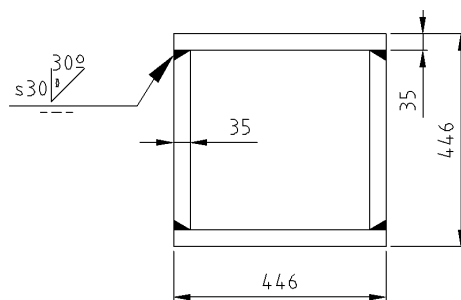


Figura 29. Tubo armado

Asimismo no es lo mismo hacer las soldaduras en ángulo sin preparación de bordes, que a tope con preparación de bordes.

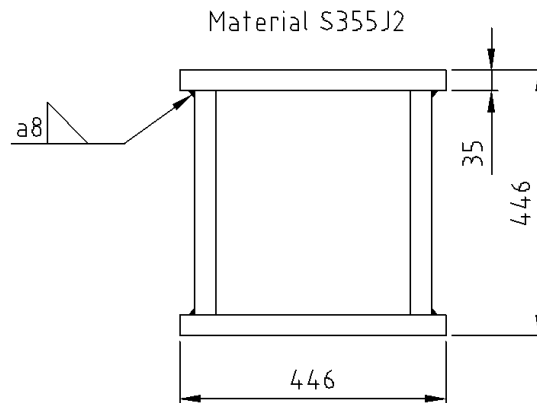


Figura 30. Tubo armado formado por soldaduras en ángulo

El tubo comercial de la Figura 28 no tiene fabricación en taller, mientras que el tubo de la Figura 29 tiene mucha más coste de fabricación que el de la Figura 30.

El perfil IPE laminado en caliente de la Figura 31 no tiene fabricación en taller y la viga armada de la Figura 31 tiene un coste de fabricación superior al de la Figura 33, ya que lleva el doble de soldadura.

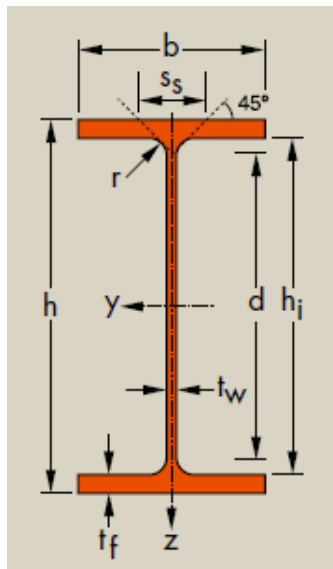


Figura 31. Perfil laminado en caliente

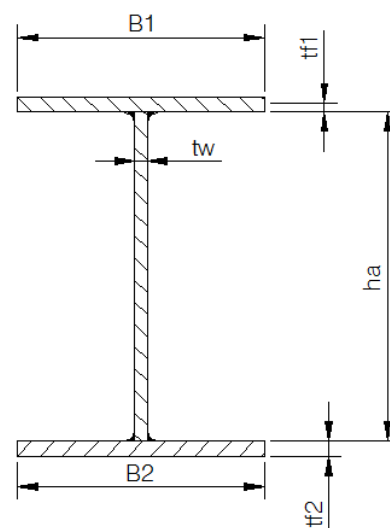


Figura 32. Doble T armada soldada a dos caras

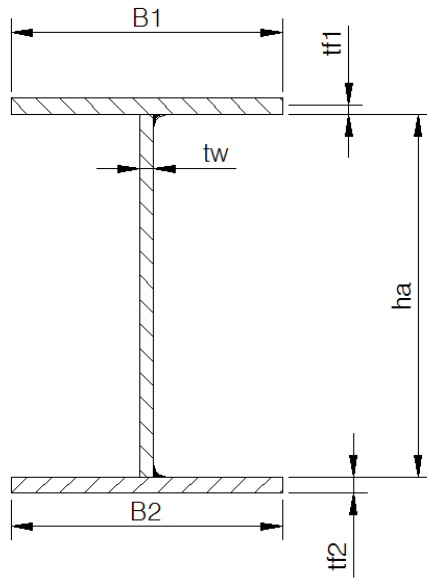


Figura 33. Doble T armada a una cara

Deben de considerarse también los costes de empalmar perfiles, bien a tope (con o sin reducción) bien con chapa frontal. En muchas ocasiones el coste de la reducción del perfil y su empalme puede ser superior al ahorro del material.

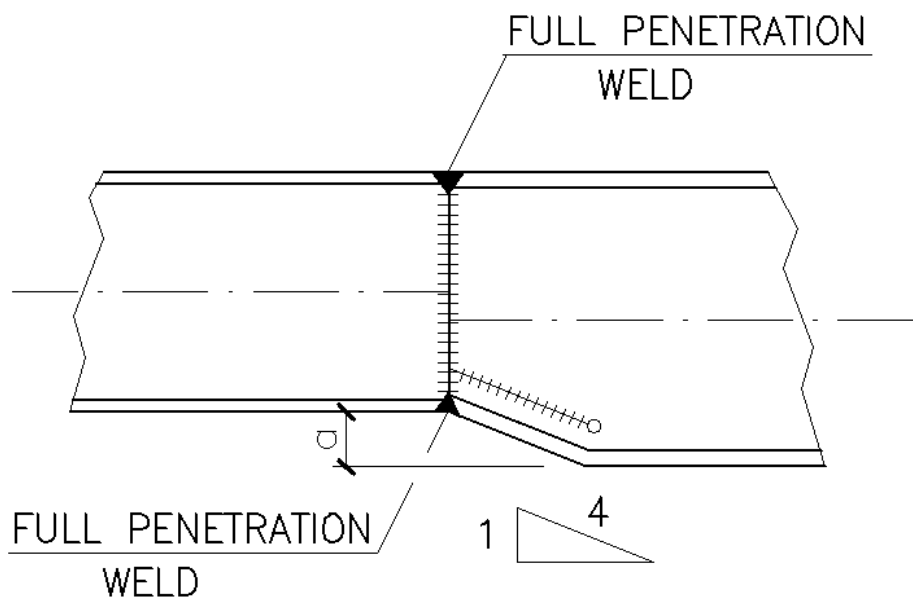


Figura 34. Reducción de perfil

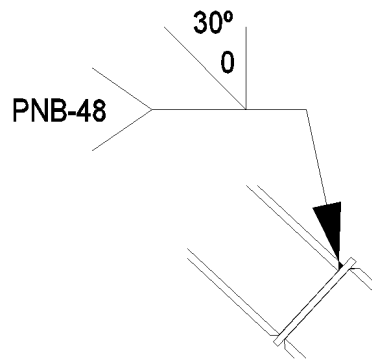


Figura 35. Empalme de perfiles de diferente canto con chapa frontal

A la hora de hacer la optimización estructural deben de considerarse los costes del material y los de su elaboración. Los costes de mano producción no son solo importantes por su coste propiamente, sino también por su plazo y calidad. A más mano de obra, más coste, pero también más plazo de entrega y más intensidad del nivel de control de calidad. *Los diseños deben ir encaminados a reducir coste, plazo y riesgo de fallo.*

El algoritmo que se plantea en esta tesis considera los costes de materiales pero también los costes de fabricación de la estructura a la hora de realizar la optimización estructural. Para considerar estos costes se han elaborado fórmulas que consideran los tiempos y los materiales de fabricación, estas fórmulas han sido, y siguen siendo, abaladas por la práctica y uso diario.

4.2.7.2 Estudio de rendimientos de fabricación

4.2.7.2.1 Costes de fabricación de viga armada

Las alas y el alma se forman a partir de chapa “en formato” de 12000x2500. Esta chapa debe de cortarse en los anchos del alma y las alas. La operación de corte se realiza normalmente con oxicorte o plasma. En la siguiente imagen se muestra un pantógrafo cortando a oxicorte con 5 sopletes simultáneos.



Figura 36. Oxicorte con múltiples sopletes para corte simultaneo

El plasma es más rápido que el oxicorte, mientras que el plasma puede cortar a una velocidad de 4m/min, el oxicorte corta a una velocidad de 0.5m/min. Para grandes espesores, mayores de 30mm, con el oxicorte se obtienen mejores calidades de acabado ya que el corte por plasma da conicidad a la sección cortada. Por otra parte con el plasma se obtiene una menor deformación de la pieza al ser cortada ya que aporta menos calor, y mas localizado, que el oxicorte.

Con el plasma se reducen mucho los tiempos de corte, con respecto al oxicorte, cuando hay que hacer agujeros, ya que el plasma corta nada mas encenderse mientras que con el oxicorte tiene que calentar la pieza para iniciar el corte. De ese modo cuando la máquina se traslada para hacer un agujero, hay que calentar puntualmente la zona hasta que el oxicorte comienza a cortar. El corte por plasma es mas limpio que el oxicorte, el oxicorte al fundir, por el lado de abajo deja mucha escoria que es necesario limpiar, en cambio el plasma deja muy pocos restos.

No es recomendable hacer los agujeros para las uniones entre piezas mediante oxicorte ya que la aportación de calor afecta mucho a la estructura del acero. Tampoco es recomendable hacerlo con plasma dado que, aunque el calor aportado afecta menos a la estructura molecular, la conicidad del agujero y el inicio y final de corte se notan mucho dejando un agujero no redondo, como se muestra en la siguiente figura.

La diferencia de diámetros, en una chapa de 20mm, puede llegar a ser de 2mm, siendo el agujero 2mm mas pequeño que el nominal en la cara de salida del chorro de plasma.

Actualmente existen plasmas que incorporan una tecnología específica que reducen la conicidad del agujero y el defecto de entrada y salida del plasma. Por ejemplo la tecnología "True Hole" implementada por la marca mas conocida de máquinas de plasma.

Oxicorte automático

A continuación se estudia la operación de corte de alas y alma parte de un formato de dimensiones L, A.

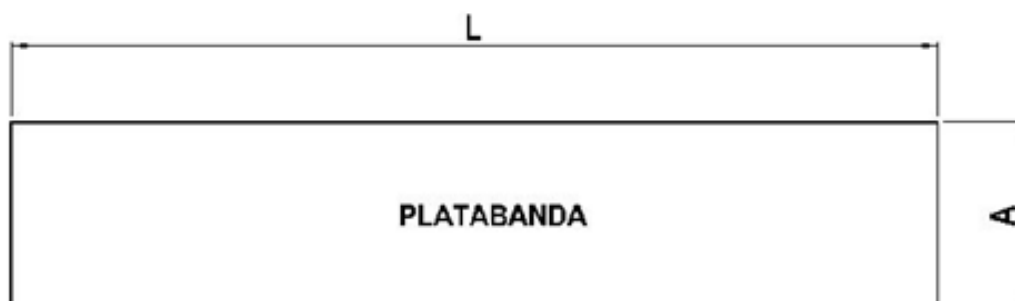


Figura 37. Platabanda para alimentar oxicorte

El tiempo considerado para esta operación contempla desde que se toman las chapas dispuestas próximas a las máquinas, hasta que las piezas ya cortadas se depositan en un lugar cercano a las máquinas de corte.

Llamamos ciclo de corte a una actuación completa de uno o varios sopletes. En cada ciclo de corte se pueden cortar "n" piezas, pudiendo ser $n=1$. Si una pieza no tiene cortes paralelos necesitará dos ciclos de corte para ser cortada en cuyo caso $n=0.5$.

Datos:

L: Longitud de la chapa, en mm.

w: Ancho de chapa, en mm.

t: Espesor de la chapa, en mm.

n: número de piezas cortadas por ciclo de corte.

m: nº de piezas cortadas en una chapa.

Colocar chapa sobre bancada de máquina

Longitud de chapa L	Recursos
$L \leq 12m$	1 PG con electroimanes + 1 hombre 20min
$12 < L \leq 25m$	2 PG con electroimanes + 2 hombre 25min
$L > 25m$	3 PG con electroimanes + 3 hombre 30min

Tabla 9. Recursos para colocar chapa en bancada de corte

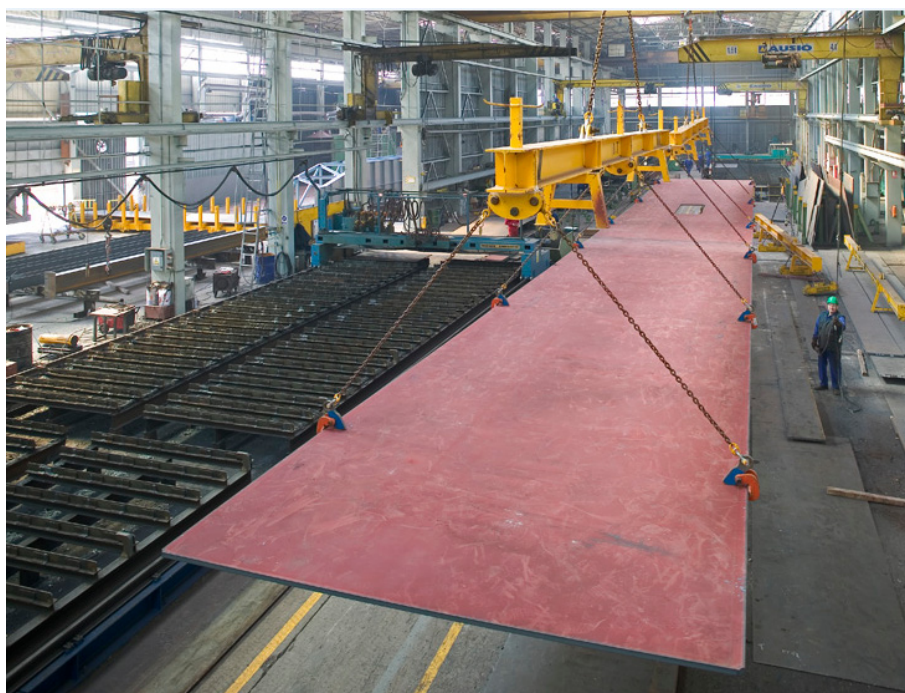


Figura 38. Colocación de chapa en bancada de corte

1. Ciclo de corte

El ciclo de corte engloba

- Ajustar parámetros máquina y situarla en el empuje del corte. Ajustar los sopletes.
- Precalentamiento e inicio de perforación.
- Tiempo máquina [t1] en minutos. Se cortan n piezas al mismo tiempo (con n sopletes). Con un soplete el perímetro de corte de una pieza (por ejemplo un ala) sería 2L+2A. Con varios sopletes y suponiendo corte común el perímetro sería L+2A.

Tiempo de ciclo de máquina [t1] con un soplete, expresado en minutos	
t≤50mm	50mm <t≤100mm
$t_1 = \frac{1.2 \sum \text{perímetros}}{644 - 54.43\sqrt{t}}$	$t_1 = \frac{1.2 \sum \text{perímetros}}{661.5 - 60.42\sqrt{t} + 0.01427 \cdot t^2}$

Tabla 10. Tiempo de ciclo de corte

Si el corte es por plasma, los tiempos obtenidos mediante las fórmulas de la Tabla 10 pueden dividirse por 9.

EXTRACCIÓN DE CHAPAS CORTADAS, MARCADO DE LA PIEZA Y RETIRADA DE SOBRANTES

Longitud de chapa L	Recursos
L≤12m	1PG +1 hombre; 15'x pieza
12<L≤25m	2PG +2 hombres; 20'x pieza (total 40' por pieza)
L>25m	3PG +3 hombres 30'x pieza (total 90' por pieza)

Tabla 11. Tiempos de extracción de chapas cortadas

Armado y soldadura

Las vigas armadas se fabrican con máquinas específicas que posicionan el alma y las alas, sueldan y corrigen deformaciones. Estas máquinas son capaces de aportar más de 21Kgs/h de soldadura y al mismo tiempo hace el armado de las vigas. Alrededor de ella pueden trabajar 4-5 hombres. Trabajan con dos pistolas de soldadura una a cada lado, y cada una de las pistolas puede llevar dos hilos (twin arc). Es interesante utilizar bobinas de hilo de mucho peso para tener que evitar cambiarlas con frecuencia, un buen peso para cada bobina es de 400kg. La soldadura se realiza mediante arco sumergido. La garganta obtenida está entre 6 y 6.5mm. En caso de necesitar más garganta debe de hacerse un recrecido posterior a la fabricación de la doble T.

Estas máquinas tienen limitaciones en cuanto a los cantos y anchos máximos y mínimos a fabricar así como limitaciones en el espesor de las piezas.

Doble T con 4 soldaduras

Se trata de armar una pieza como la mostrada en la siguiente figura:

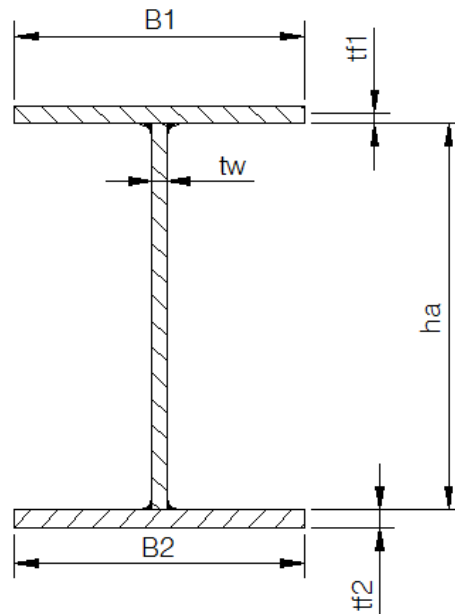


Figura 39. Doble T armada

Se forma un equipo de trabajo compuesto de 2 hombres manejando máquina y otros dos realizando tareas auxiliares, incluyendo el enderezado de las platabandas. Cuando las vigas tienen más de 15m de longitud el número de personas en tareas auxiliares pasa a 3 personas por la dificultad de manejar chapas tan largas, (en total 5 personas).

La máquina que se muestra en la siguiente figura está limitada a una altura mínima del alma 450mm. Siempre que el ala tenga menos de 300mm; canto máximo de la viga 3390mm; ancho máximo del ala 1000mm. El espesor máximo del ala es de 40mm. Se pueden usar mayores espesores, anulando el uso de los rodillos enderezadores de ala. El peso máximo que arrastra la máquina es de 14Tm. Aunque puede llegarse hacer vigas de hasta 40m de longitud, por diversas razones no interesa pasar de 24metros, siendo preferible empalmar por soldadura manual dos tramos de viga fabricados independientemente.



Figura 40. Máquina de armado de viga armada



Figura 41. Soldadura de pieza en máquina de armado

En la siguiente tabla se describen las actividades que forman parte del proceso de construcción de la viga armada con 4 soldaduras, indicando también los recursos necesarios y el tiempo empleado en cada actividad. La letra "L" representa la longitud de la viga **en metros**.

ACTIVIDADES DE MAQUINA		ACTIVIDADES AUXILIARES	
DESCRIPCIÓN	t[min]	DESCRIPCIÓN	t[min]
Colocar ala inferior en bancada de máquina. Se usan banderolas con cadenas. 2 Banderolas hasta 15m y 3 a partir de 15m	4 si $L \leq 7m$ 6 si $7 < L \leq 14m$ 10 si $L > 14m$	Las alas que han sido depositadas en el suelo hay que esmerilarlas en su parte central para limpiar la zona que va a ser soldada (2 alas por viga) velocidad esmerilado 1.2m/minuto	2*L
Ajustar topes horizontales de las alas	3	Depositar en bancada Máquina las alas esmeriladas (2 alas por viga)	8 si $L \leq 14m$ 16 si $L > 14m$
Colocar alma Vertical. Se usan banderolas con ranas. 1 Banderola hasta 7m, 2 hasta 15m y 3 a partir de 15m	8 si $L \leq 7m$ 12 si $7 < L \leq 14m$ 20 si $L > 14m$	Ayuda que sea necesaria a los dos hombres que están en la Máquina, en las operaciones de carga de ala inferior, en cargas banderolas con el alma y mantenimiento de la misma. (2 ó 3 hombres, según $L < 14$ ó $L > 14m$)	22 si $L \leq 14m$ 42 si $L > 14m$
Centrar alma, igualar alma y ala, puntear inicio de alma y ala, comprobar escuadra. Ajustar brazos laterales para soporte de alma	5 si $L \leq 7m$ 8 si $7 < L \leq 14m$ 12 si $L > 14m$	Quitar rebabas de oxicorte de ala y alma en el momento adecuado	9 si $L \leq 14m$ 15 si $L > 14m$

Tabla 12. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a 2 caras

ACTIVIDADES DE MAQUINA	ACTIVIDADES AUXILIARES		
DESCRIPCIÓN	t[min]	DESCRIPCIÓN	t[min]
Avanzar ala-alma hasta pistolas de soldar, ajustar pistolas de soldar y sensores de seguimiento, ajustar rodillos de enderezado, encender antorcha de precalentamiento (si procede).	12		
<i>Primer tiempo de máquina: Se empieza la soldadura con pistolas dos hilos (twin arc) a cada lado. El cordón que sale oscila de 5-7mm. Para chapa de alma de 10mm, se usaran 500-600 A de corriente, y para almas más gruesa 800 A o más. El voltaje será unos 25V. Avance unos 550mm/minuto.</i> <i>Al mismo tiempo se va quitando cascarilla y señalando los defectos si los hubiere.</i>	$t1=2*2.2*L$		
Una vez soldada y hecha la T invertida , se avanza unos 2.5m. Se retiran pistolas y sensores. Quitar travesaño presión. Se retiran y bajan los brazos laterales. Se saca la pieza.	8		

Tabla 13. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a 2 caras (continuación 1)

ACTIVIDADES DE MAQUINA	ACTIVIDADES AUXILIARES		
DESCRIPCIÓN	t[<i>min</i>]	DESCRIPCIÓN	t[<i>min</i>]
Colocar la otra ala en bancada de máquina. Se usan banderolas con cadenas. 2 Banderolas hasta 15m y 3 a partir de 15m.	4 si $L \leq 7m$ 6 si $7 < L \leq 14m$ 10 si $L > 14m$		
Ajustar topes horizontales de las alas.	3		
La T ya fabricada hay que tumbarla y se voltearla con tijeras. Hasta 12-14m con una grúa. Hasta 24m con dos grúas. La T que se tome tiene que estar ya fría. La T se deposita sobre el ala ya colocada. Sin soltar grúas se ajustan brazos laterales de soporte alma. Se igualan T y ala en el primer extremo y se puntea con soldadura. Se comprueba la escuadra.	14 si $L \leq 7m$ 20 si $7 < L \leq 14m$ 24 si $L > 14m$		

Tabla 14. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a dos caras (continuación 2)

ACTIVIDADES DE MAQUINA	ACTIVIDADES AUXILIARES		
DESCRIPCIÓN	t[min]	DESCRIPCIÓN	t[min]
Avanzar ala-alma hasta pistolas de soldar, ajustar las pistolas de soldar y sensores de seguimiento, ajustar rodillos de enderezado, encender antorcha de precalentamiento (si procede).	12		
<i>Segundo tiempo de máquina: Se empieza la soldadura con pistolas dos hilos (twin arc) a cada lado. El cordón que sale oscila de 5-7mm. Para chapa de alma de 10mm, se usaran los mismos parámetros que en el primer tiempo de máquina. Avance unos 550mm/minuto.</i> <i>Al mismo tiempo se va quitando cascarilla y señalando los defectos si los hubiere.</i>	$t_2=2*2.2*L$		
<i>Terminada la soldadura, se retiran pistolas y sensores. Se avanza la viga unos 2.5m. Se retiran y bajan brazos laterales, se levanta travesaño de presión.</i> <i>Antes de retirar la viga terminada y simultáneamente se coloca el ala inferior de la siguiente viga.</i> <i>Hacen falta puentes-grúas.</i>	8		

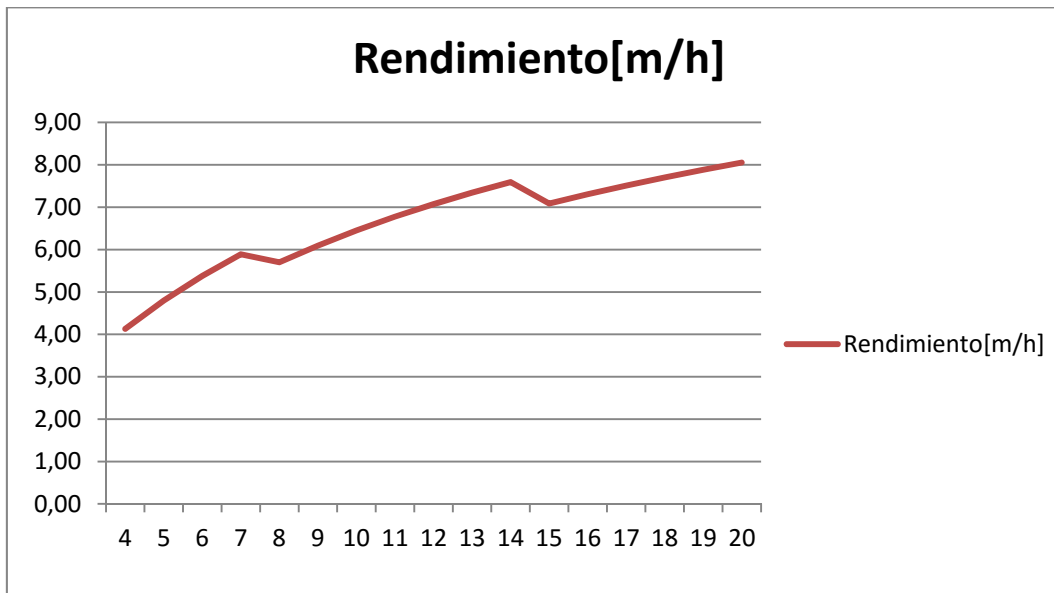
Tabla 15. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a dos caras (Continuación 3)

A continuación se calcula el coste de armado y soldadura por metro de viga producida. Para ello se considera el coste de la soldadura por arco sumergido y el coste de mano de obra, no se tiene en cuenta amortización de fábrica y equipos de producción.

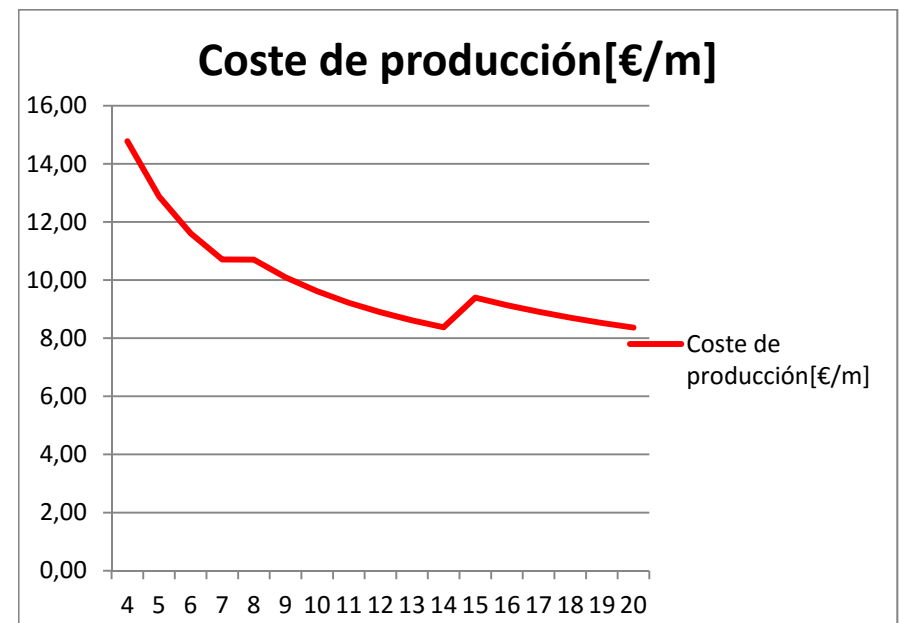
Asumiendo un coste de mano de obra directa + indirecta (repercusión de encargados de taller) de 19€/h, se tiene un coste de producción que se refleja en la siguiente tabla:

L[m]=	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Coste de Armado y soldadura[€/m]	14.78	12.88	11.61	10.70	10.70	10.10	9.61	9.22	8.89	8.61	8.38	9.39	9.14	8.91	8.71	8.53	8.36
Coste de consumibles[€/m]=	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86
Coste de M.O[€/m]=	12.92	11.02	9.75	8.85	8.84	8.24	7.76	7.36	7.04	6.76	6.52	7.54	7.28	7.05	6.85	6.67	6.51
Producción obtenida[m/h]=	4.13	4.80	5.38	5.89	5.70	6.09	6.45	6.78	7.07	7.34	7.59	7.09	7.31	7.51	7.70	7.88	8.05
M.O[€/h]=	19																
Coste de hilo macizo desnudo[€/kg]=	1.8																
Coste Flux L-780[€/kg]	1.4																
Coste energía eléctrica[€/kg]=	0.08																
Garganta de soldadura[mm]=	6																
Coste energía eléctrica[€/kWh]=	0.09																
Amperios[A]=	700																
Voltios[V]=	25																
Material aportado[kg/h]	18.65																
Vel de avance[mm/min]	550																
nº de Cordones	4																

Tabla 16. Costes de producción viga armada 4 soldaduras



Grafica 1. Rendimiento de producción viga armada 4 soldaduras [m/h]



Grafica 2. Coste de producción viga armada 4 soldaduras [€/h]

Como se desprende de las tablas anteriores, a mayor longitud de viga, mayor rendimiento de fabricación.

Doble T con 2 soldaduras

Se trata de armar una pieza como la mostrada en la siguiente figura:

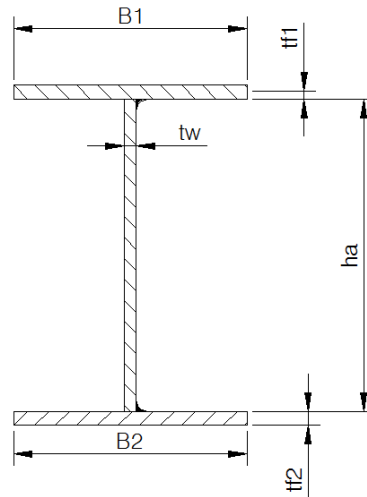


Figura 42. Doble T armada 2 soldaduras

Se forma un equipo de trabajo compuesto de 1 hombre manejando máquina y otros dos realizando tareas auxiliares de preparación de material. Estas máquinas normalmente trabajan con el alma horizontal, no con el alma vertical como la mostrada en el apartado anterior.

Con este tipo de viga, que solo se puede utilizar en ambientes C3 (intensidad de corrosión media) o más favorable, se pretenden reducir costes de fabricación. Se busca que la viga se haga con un solo ciclo de máquina, no con 2 pasadas como en el caso anterior.



Figura 43. Soldadura con arco sumergido de viga armada

En la siguiente tabla se describen las actividades que forman parte del proceso de construcción de la viga armada con 2 soldaduras (soldadura a una cara), indicando también los recursos necesarios y el tiempo empleado en cada actividad. La letra “L” representa la longitud de la viga en metros.

ACTIVIDADES DE MAQUINA		ACTIVIDADES AUXILIARES	
DESCRIPCIÓN	t[<i>min</i>]	DESCRIPCIÓN	t[<i>min</i>]
Colocar alma horizontal en bancada de máquina. Se usan banderolas con cadenas. 2 Banderolas hasta 15m y 3 a partir de 15m.	4 si $L \leq 7m$ 6 si $7 < L \leq 14m$ 10 si $L > 14m$	Las alas que han sido depositadas en el suelo hay que esmerilarlas en su parte central para limpiar la zona que va a ser soldada (2 alas por viga); velocidad esmerilado 1.2m/minuto.	2*L
Ajustar topes horizontales de las alas	3	Depositar en bancada Máquina las alas esmeriladas (2 alas por viga)	8 si $L \leq 14m$ 16 si $L > 14m$
Colocar las 2 almas en vertical. Se usan banderolas con ranas. 1 Banderola hasta 7m, 2 hasta 15m y 3 a partir de 15m.	16 si $L \leq 7m$ 24 si $7 < L \leq 14m$ 40 si $L > 14m$	Ayuda que sea necesaria a los dos hombres que están en la Máquina, en las operaciones de carga de ala inferior, en cargas banderolas con el alma y mantenimiento de la misma. (2 ó 3 hombres, según $L < 14$ ó $L > 14m$)	22 si $L \leq 14m$ 42 si $L > 14m$
Centrar alma, igualar alma y ala, puntear inicio de alma y ala, comprobar escuadra. Ajustar brazos laterales para soporte de alma	5 si $L \leq 7m$ 8 si $7 < L \leq 14m$ 12 si $L > 14m$	Quitar rebabas de oxicorte de ala y alma en el momento adecuado	9 si $L \leq 14m$ 15 si $L > 14m$

Tabla 17. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a una cara

ACTIVIDADES DE MAQUINA	ACTIVIDADES AUXILIARES		
DESCRIPCIÓN	t[min]	DESCRIPCIÓN	t[min]
Avanzar ala-alma hasta pistolas de soldar, ajustar las pistolas de soldar y sensores de seguimiento, ajustar rodillos de enderezado, encender antorcha de precalentamiento (si procede).	12		
<p><i>Tiempo de máquina: Se empieza la soldadura con pistolas dos hilos (twin arc) a cada lado. El cordón que sale oscila de 5-7mm. Para chapa de alma de 10mm, se usaran 500-600 A de corriente, y para almas más gruesa 800 A o más. El voltaje será unos 25V. Avance unos 550mm/minuto.</i></p> <p><i>Al mismo tiempo se va quitando cascarilla y señalando los defectos si los hubiere.</i></p>	$t1=2*2.2*L$		
Una vez soldada y hecha la doble T, se avanza unos 2.5m. Se retiran pistolas y sensores. Quitar travesaño presión. Se retiran y bajan los brazos laterales. Se saca la pieza.	8		

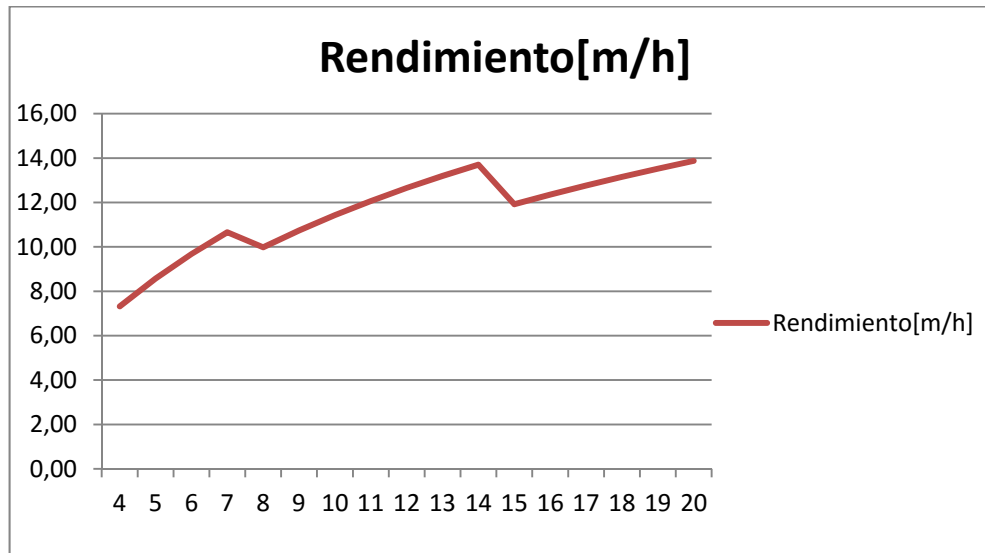
Tabla 18. Actividades, recursos y tiempos de fabricación viga armada con soldadura a una cara (continuación)

A continuación se calcula el coste de armado y soldadura por metro de viga producida. Para ello se considera el coste de la soldadura por arco sumergido y el coste de mano de obra, no se tiene en cuenta amortización de fábrica y equipos de producción.

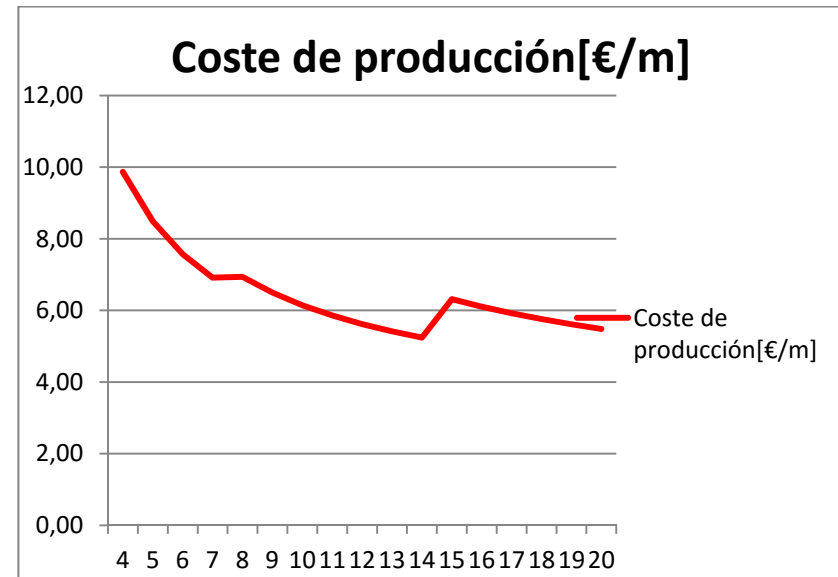
Assumiendo un coste de mano de obra directa+indirecta (repercusión de encargados de taller) de 19€/h, se tiene un coste de producción que se refleja en la siguiente tabla:

L[m]=	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Coste de Armado y soldadura[€/m]	9.87	8.49	7.57	6.91	6.94	6.50	6.15	5.86	5.62	5.41	5.24	6.31	6.11	5.92	5.76	5.61	5.48
Coste de consumibles[€/m]=	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Coste de M.O[€/m]=	8.91	7.54	6.62	5.96	5.99	5.55	5.19	4.91	4.67	4.46	4.29	5.36	5.15	4.97	4.81	4.66	4.53
Producción obtenida[m/h]=	7.32	8.57	9.68	10.66	9.98	10.74	11.43	12.07	12.65	13.20	13.70	11.92	12.36	12.77	13.15	13.52	13.87
M.O[€/h]=	19																
Coste de hilo macizo desnudo[€/kg]=	1.8																
Coste Flux L-780[€/kg]	1.4																
Coste energía eléctrica[€/kg]=	0.17																
Garganta de soldadura[mm]=	6																
Coste energía eléctrica[€/kWh]=	0.09																
Amperios[A]=	700																
Voltios[V]=	25																
Material aportado[kg/h]	9.33																
Vel de avance[mm/min]	550																
nº de Cordones	2																

Tabla 19. Costes de producción viga armada 2 soldaduras



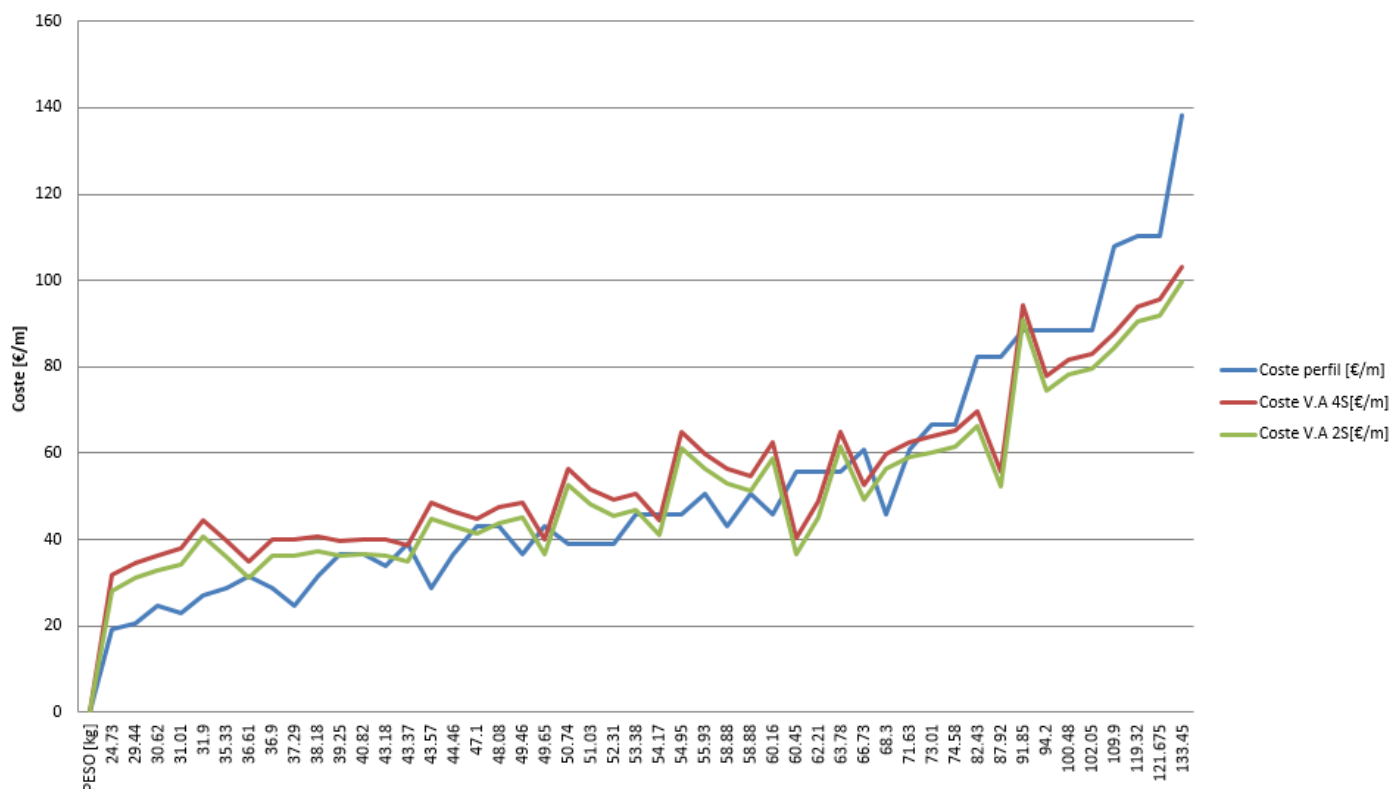
Grafica 3. Rendimiento de producción viga armada [m/h]. 2 soldaduras



Grafica 4. Coste de producción viga armada 2 soldaduras [€/h]

Como se desprende de las tablas anteriores, a mayor longitud de viga, mayor rendimiento de fabricación.

Coste [€/m] frente a Peso en [kg/m]

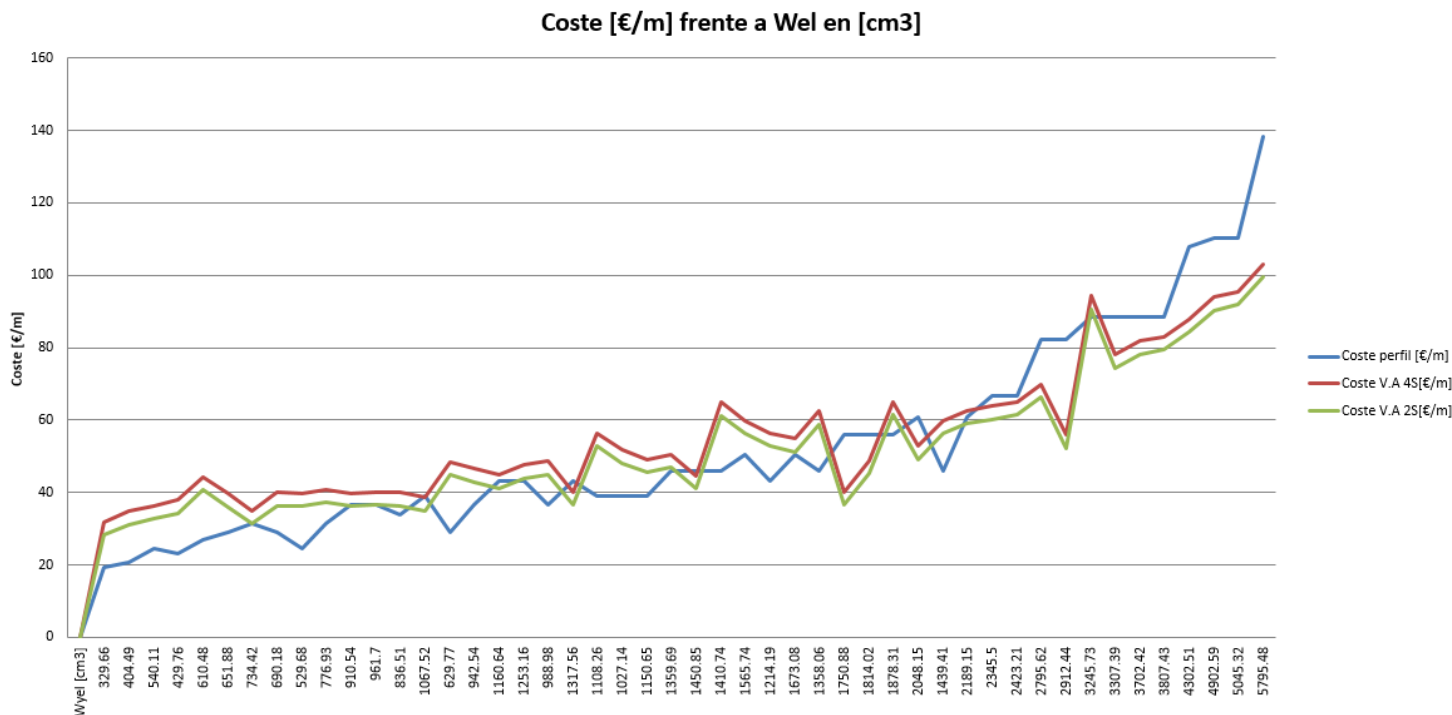


Grafica 5. Comparativa costes viga armada frente a perfil laminado en caliente

En este gráfico donde se representa el coste por metro de perfil laminado en caliente de la gama IPE, el coste de la viga armada con 4 soldaduras y la viga armada con 2 soldaduras, podemos ver como el coste del perfil laminado en caliente, por metro de viga, es inferior hasta pesos de unos 60 kg/m lo que se viene a corresponder con una IPE400 (66kg/m) ó IPE360 (57kg/m). A partir de unos 71kg/m, el coste del perfil laminado en caliente es superior al de la viga armada, lo que se viene a corresponder con una IPE450 (77.6kg/m).

Desde este punto de vista podemos decir que para perfiles, trabajando a flexión, inferiores a IPE400 compensa la fabricación con perfil laminado en caliente. Para perfiles superiores a IPE450 compensa la fabricación con viga armada.

En el siguiente gráfico se hacen los costes referidos al módulo elástico. El primer encuentro entre la curva de costes del perfil laminado y la viga armada se produce para $W_{el}=1600\text{cm}^3$, que viene a corresponderse con una IPE450 ($W_{el}=1500\text{cm}^3$). Salvo un caso singular, podemos decir que a partir de $W_{el}=2345\text{cm}^3$, el coste del perfil laminado es superior al de viga armada. Esto se corresponde con una IPE550 ($W_{el}=2440\text{cm}^3$).



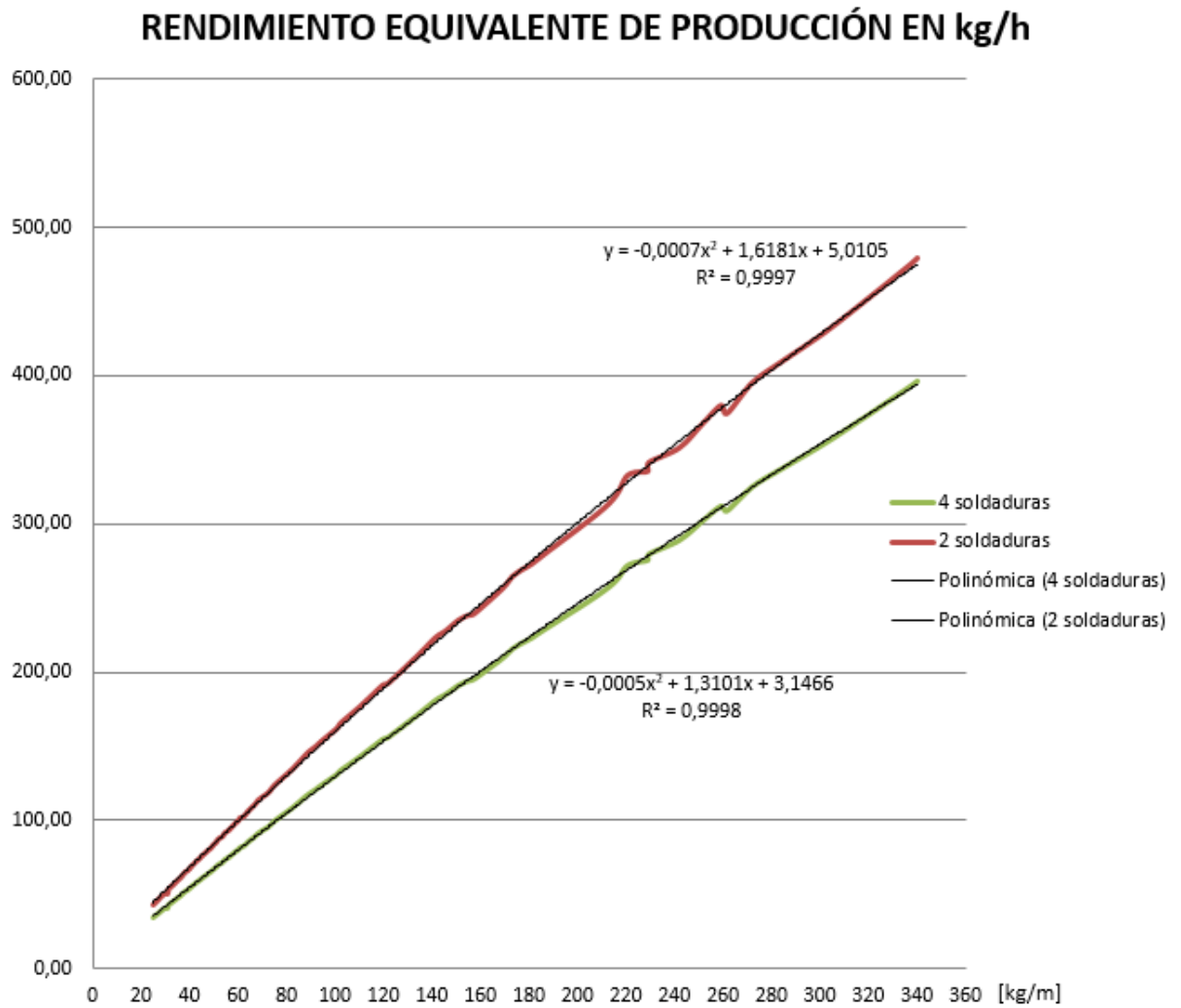
Grafica 6. Comparativa costes viga armada frente a perfil laminado en caliente (coste vs W)

Concluimos que para:

- Perfiles inferiores a IPE400 el coste es inferior fabricando con perfil laminado en caliente.
- Perfiles entre IPE400 e IPE550 analizar caso particular. Costes similares en el rango de módulos elásticos comprendidos entre 1600cm^3 y 2345cm^3 .
- Perfiles superiores a IPE550 el coste inferior fabricando con viga armada.

Con el fin de independizar los costes de producción del coste de la mano de obra (cada taller puede tener un coste diferente), el siguiente gráfico nos muestra el rendimiento de producción en kg/h en función del peso de la viga armada por metro lineal. En el rendimiento se ha homogeneizado al precio de hora de operario los costes del material de oxicorte y de consumibles de soldadura. Al rendimiento así obtenido le hemos denominado rendimiento equivalente de producción. El cual es ligeramente inferior al rendimiento real de producción por hora de operario, ya que este rendimiento considera también los costes de consumibles.

El gráfico representa el rendimiento equivalente de producción [kg/h] frente al peso de la viga armada por metro lineal, expresado en kg.



Grafica 7. Rendimiento equivalente de producción de viga armada en kg/h

4.2.7.2.2 Ecuaciones de producción de viga armada

Las ecuaciones que expresan la producción equivalente en [kg/h] en función del peso de la viga en [kg/m] son:

- Para soldadura a dos caras (4 soldaduras): $y = -0.0005x^2 + 1.3101x + 3.1466$ ($R^2 = 0.9997$)
- Soldadura en una sola cara (2 soldaduras): $y = -0.0007x^2 + 1.6181x + 5.0105$ ($R^2 = 0.9998$)

4.2.7.2.3 Costes de empalme de perfiles doble T mediante soldadura semiautomática

En este apartado se analiza el tiempo y el coste que supone empalmar, a tope, una pieza de sección doble T. Suponiendo que el empalme sale bien a la primera, tampoco se consideran aquí los costes de inspección de la pieza una vez soldada ni los costes de no calidad.

El proceso de soldadura semiautomática se refiere al proceso con gas protector [Argón (85%) + CO₂ (15%)].

Las fórmulas que se dan a continuación están basadas en la utilización de hilo de 1,2 mm del tipo ER70S-6 (AWS A 5.18).

La preparación de biselés para la soldadura se realizara en X, este tiempo no está indicado en este estudio donde solamente está indicado el tiempo de soldadura.

En la formula siguiente se da el tiempo para el empalme del perfil, estando incluido en el mismo los tiempos de cambio de bobina, saneado con radial, tomas de raíz, repaso de cordones, eliminación de salpicaduras, encendido y apagado, y los de volteos necesarios para posicionar las piezas en la posición horizontal de soldadura.

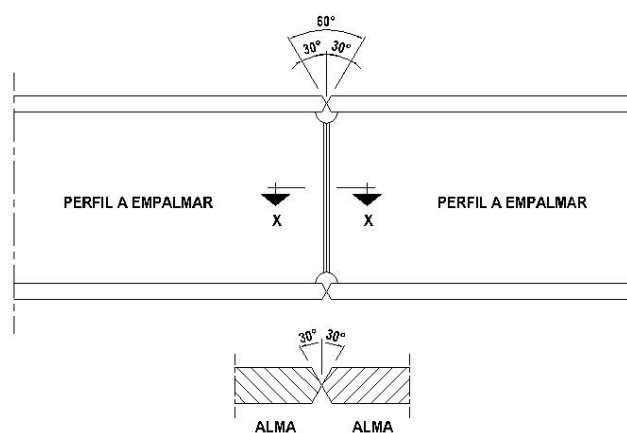


Figura 44. Esquema de empalme a tope de vigas

T = Grosor del perfil
 R = Separación entre 0 y 3.0 mm
 f = Tacón entre 0 y 3.2 mm
 Angulo $\beta = \alpha = 60^\circ$

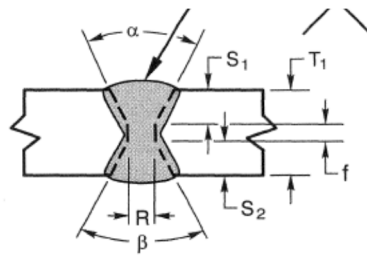


Figura 45. Parámetros geométricos de la soldadura a tope

Tiempo de empalme

$$t_2 = (4.2 + 0.72W + 0.0012w^2)$$

Siendo:

t: Tiempo en minutos.

W = Peso por metro del perfil, expresado en kg.

L = Largo total pieza empalmada metros.

Las actividades a considerar son las siguientes. 5 actividades con 5 tiempos asignados T1, T2, T3, T4, T5.

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	TIEMPO ESTIMADO [min]
Colocar las piezas a empalmar en posición adecuada para biselar (se necesita grúa).	Si $L \leq 6m$, $t=2.0'$ por elemento a empalmar Si $6 < L \leq 12m$ $t=3.0'$ por elemento a empalmar Si $12 < L \leq 16m$ $t=4.5'$ por elemento a empalmar Si $L > 16m$ $t=6.0'$ por elemento a empalmar
Preparación de bordes mediante oxicorte manual incluidos los volteos necesarios. Esmerilado de los biseles oxicortados , incluidos los volteos necesarios.	$T2 = 2.0 \cdot (3 + 0.20W)$
Armado enfrentando las dos piezas a empalmar y puntearlas adecuadamente comprobando rectitud y medida (se necesita grúa).	Si $L \leq 6m$, $t=6.0'$ Si $6 < L \leq 12m$ $t=8.0'$ Si $12 < L \leq 16m$ $t=12'$ Si $L > 16m$ $t=15'$
Empalme mediante soldadura semiautomática. Incluye saneado de raíz y repasos de la soldadura así como los volteos necesarios.	$T4 = (4.2 + 0.72W + 0.0012w^2)$
Retirada del perfil empalmado y colocarlo en cercanías (se necesita grúa).	Si $L \leq 12m$ $t=2.0'$ Si $12 < L \leq 16m$ $t=3.0'$ Si $L > 16m$ $t=4.0'$

Tabla 20. Actividades y tiempos de empalme de vigas a tope

Como tiempos totales podemos tomar los siguientes valores

Si $L \leq 12m$	$Tt = 26.2 + 1.12 \cdot W + 0.0012 \cdot W^2$ minutos/ud
Si $12 < L \leq 16m$	$Tt = 34.2 + 1.12 \cdot W + 0.0012 \cdot W^2$ minutos/ud
Si $L > 16m$	$Tt = 41.2 + 1.12 \cdot W + 0.0012 \cdot W^2$ minutos/ud

Tabla 21. Tiempos de empalme a tope en función del peso de la viga por metro lineal

En la evaluación del coste de la soldadura semiautomática consideramos los siguientes factores:

- Costo mano de Obra, incluidos movimientos, limpieza, necesidades personales, colocación parámetros, cambios de electrodos, cargas de flux, montaje de utillajes.
- Costo de electrodos o hilos.
- Costo material de protección, (polvos o gases).
- Costo energía eléctrica.
- Coste de inspección de la soldadura.
- Amortización fábrica y equipos de soldadura.

Existe lo que denominaremos factor de operación que tiene en cuenta el tiempo que está el arco encendido respecto al tiempo total empleado en la soldadura. En soldadura semiautomática el factor de operación vale como máximo un 60 -65%, en el caso de soldaduras fuertes con poco movimiento, en el caso de soldaduras finas y muchos movimientos esto puede bajar mucho hasta el caso de grandes cerchas en que puede ser del 40%.

$$\text{Factor de operación} = \frac{\text{Tiempo de arco}}{\text{Tiempo total}}$$

Prescindiendo de los costes de amortización de equipos de soldadura y de fábrica. Podemos evaluar el coste total de empalme de perfiles según la siguiente fórmula:

$$C_t[\text{€}] = \text{MO} * T_t + (\text{CH} + \text{CG} + \text{CE}) * \text{MA} + (\text{OO} * \text{CO} + \text{OP} * \text{XP}) * T_2$$

Siendo:

Coste de la mano de obra [€/H]: MO

Coste de hilo de aportación [€/kg]: CH

Coste ponderado (por kg de aportación de material) de Argón y CO₂ para soldadura [€/kg]: CG

Coste de energía eléctrica (por kg de aportación de material) [€/kg]: CE

Consumo de Oxígeno en oxicorte [m³/h]. OO

Consumo de propano en oxicorte [m³/h]. OP

Coste de Oxígeno en oxicorte [€/m³]. CO

Coste de propano en oxicorte [€/m³]. CP

Kg. aportados de soldadura: MA=0.06 + 0.011 x W + 0.000018xW²

Con el fin de comparar el coste de hacer un empalme de soldadura con los kg de material a ahorrar, debemos de considerar, además, el coste de inspección de la soldadura mediante ultrasonidos.

La siguiente tabla muestra los costes de chapa, para fabricación de perfiles de viga armada, en el año 2013.

ESPESOR	COSTE[€/Tm] S275	COSTE[€/Tm] S355
3	670	700
4	670	700
5	670	700
6	670	700
8	660	690
10	650	680
12	640	670
15	640	670
16	640	670
20	620	650
22	620	650
25	620	650
30	620	650
35	620	650

Tabla 22. Costes de chapa para fabricación de viga armada [€/Tm]

Con los costes en la misma fecha y la formulación anterior se obtiene el coste de empalmar diferentes perfiles en doble T, desde los más pequeños, con peso de 24kg/ml hasta 340kg/ml.

CANTO (h)	ANCHO ALA (B)	ESP.ALA (tf)	ESP.ALMA (tw)	Wyel [cm³]	Wzel [cm³]	PESO [kg]	Relación Wy/peso	COSTE EMPALME L≤12m[€]. Incluye inspección
250	150	8	3	329.66	60	24.73	13.33	23.90
250	150	10	3	404.49	75	29.44	13.74	25.76
375	150	8	3	540.11	60	30.62	17.64	26.51
250	200	8	3	429.76	106.67	31.01	13.86	26.36
416	150	8	4	610.48	60	31.9	19.14	27.44
375	150	10	4	651.88	75	35.33	18.45	28.19
416	150	10	4	734.42	75	36.61	20.06	29.06
375	200	8	4	690.18	106.67	36.9	18.70	28.74
250	200	10	3	529.68	133.3	37.29	14.20	28.52
416	200	8	4	776.93	106.67	38.18	20.35	29.66
500	150	10	4	910.54	75	39.25	23.20	30.43
500	200	8	4	961.7	106.67	40.82	23.56	30.99
375	200	10	4	836.51	133.33	43.18	19.37	30.93
625	150	8	5	1067.52	60	43.37	24.61	32.13
250	200	12	3	629.77	160	43.57	14.45	30.74
416	200	10	4	942.54	133.33	44.46	21.20	31.99
500	200	10	4	1160.64	133.33	47.1	24.64	33.25
625	150	10	5	1253.16	75	48.08	26.06	33.84
375	200	12	4	988.98	160	49.46	20.00	33.18
625	200	8	5	1317.56	106.67	49.65	26.54	34.58
416	200	12	4	1108.26	160	50.74	21.84	34.25
375	250	10	4	1027.14	208.33	51.03	20.13	33.80
416	250	10	4	1150.65	208.33	52.31	22.00	34.90
500	200	12	4	1359.69	160	53.38	25.47	35.53
750	150	8	6	1450.85	60	54.17	26.78	36.51
500	250	10	4	1410.74	208.33	54.95	25.67	36.14
625	200	10	5	1565.74	133.33	55.93	27.99	36.80
375	250	12	4	1214.19	250	58.88	20.62	36.68
750	150	10	6	1673.08	75	58.88	28.42	38.40
416	250	12	4	1358.06	250	60.16	22.57	37.70
750	200	8	6	1750.88	106.67	60.45	28.96	39.07
625	200	12	5	1814.02	160	62.21	29.16	39.13
625	250	10	5	1878.31	208.33	63.78	29.45	39.72
750	200	10	6	2048.15	133.33	66.73	30.69	41.57
375	300	12	4	1439.41	360	68.3	21.07	40.22
625	250	12	5	2189.15	250	71.63	30.56	42.69

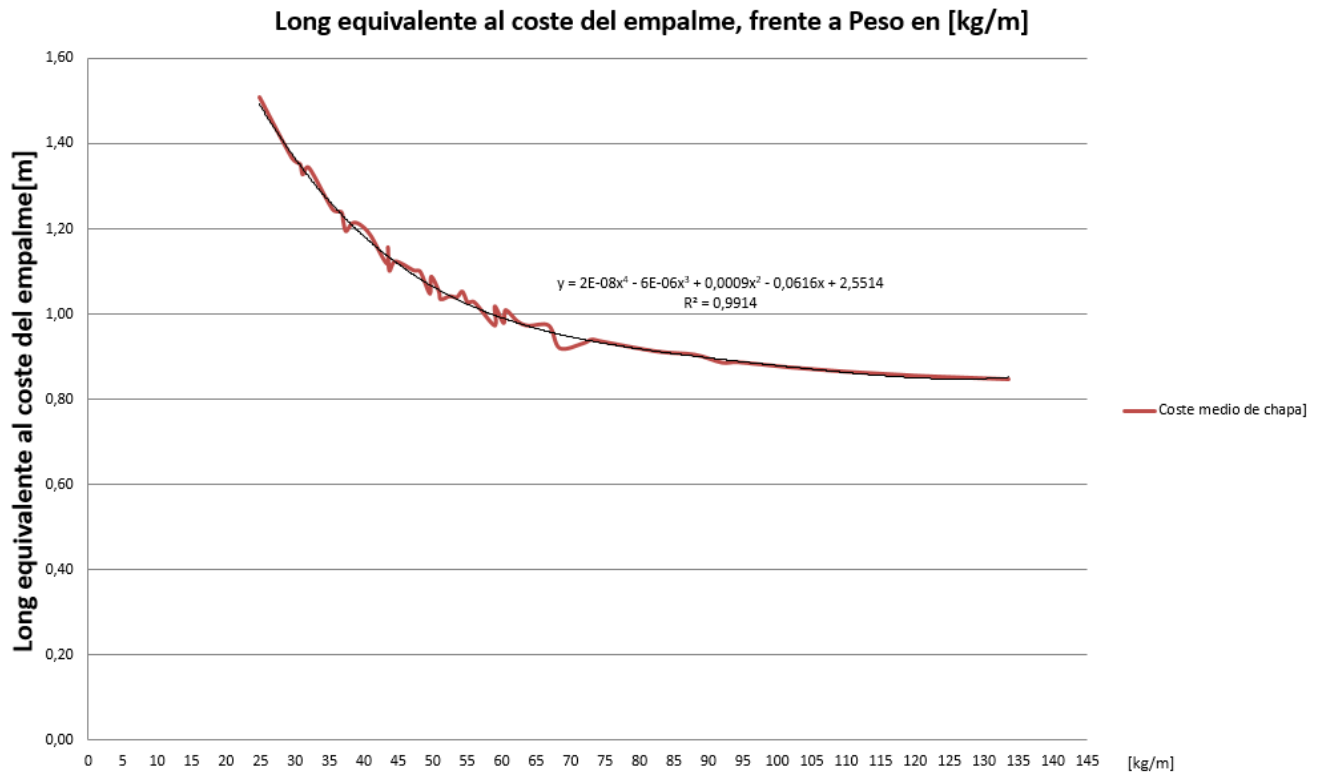
Tabla 23. Coste de empalme de perfiles doble T

CANTO (h)	ANCHO ALA (B)	ESP.ALA (tf)	ESP.ALMA (tw)	Wyel [cm³]	Wzel [cm³]	PESO [kg]	Relación Wy/peso	COSTE EMPALME L≤12m[€]. Incluye inspección
750	200	12	6	2345.5	160	73.01	32.13	43.96
750	250	10	6	2423.21	208.33	74.58	32.49	44.65
750	250	12	6	2795.62	250	82.43	33.92	48.14
1000	200	8	8	2912.44	106.67	87.92	33.13	50.93
750	300	12	6	3245.73	360	91.85	35.34	52.11
1000	200	10	8	3307.39	133.33	94.2	35.11	53.49
1000	200	12	8	3702.42	160	100.48	36.85	56.41
1000	250	10	8	3807.43	208.33	102.05	37.31	57.14
1000	250	12	8	4302.51	250	109.9	39.15	60.85
1000	300	12	8	4902.59	360	119.32	41.09	65.39
1000	250	15	8	5045.32	312.5	121.675	41.47	66.54
1000	300	15	8	5795.48	450	133.45	43.43	72.38
1000	416	12	8	6222.78	672.4	141.174	44.08	76.29
1000	350	15	8	6545.65	612.5	145.225	45.07	78.36
1000	350	16	8	6893.38	653.33	150.72	45.74	81.21
1250	300	12	10	7055	360	154.645	45.62	83.51
1250	250	15	10	7231.29	312.5	157	46.06	85.76
1250	300	15	10	8168.92	450	168.775	48.40	91.23
1000	350	20	8	8284.74	816.67	172.7	47.97	91.00
1250	416	12	10	8705.66	672.4	176.499	49.32	95.01
1250	350	15	10	9106.55	612.5	180.55	50.44	97.25
1250	350	16	10	9540.28	653.33	186.045	51.28	100.32
1250	350	20	10	11275.6	816.67	208.025	54.20	112.93
1250	416	18	10	11758.1	1008.6	215.687	54.51	117.47
1500	416	12	12	11809.6	672.4	219.674	53.76	121.16
1500	350	15	12	12287.5	612.5	223.725	54.92	124.86
1250	416	20	10	12776	1120.67	228.749	55.85	124.12
1500	350	16	12	12806.9	653.33	229.22	55.87	128.86
1250	416	22	10	13794	1232.73	241.811	57.04	130.90
1500	350	20	12	14884.9	816.67	251.2	59.26	140.61
1500	416	18	12	15466.1	1008.6	258.862	59.75	144.77
1250	416	25	10	15321.4	1400.83	261.405	58.61	141.17
1500	416	20	12	16685.3	1120.67	271.924	61.36	152.98
1500	416	22	12	17904.6	1232.73	284.986	62.83	161.81
1500	416	25	12	19734	1400.83	304.58	64.79	175.50
1500	500	25	12	23106.9	2083.33	337.55	68.45	200.23
1500	416	25	15	20822.7	1400.83	339.905	61.26	201.02

Tabla 24. Coste de empalme de perfiles doble T (continuación)

Teniendo en cuenta el precio de la chapa y los costes de fabricación, el siguiente gráfico relaciona los metros de perfil que se ahorran en función del peso del perfil.

La línea roja considera un precio medio de chapa independiente del espesor. La línea negra es un polinomio ajustado a la línea roja.



Grafica 8. Coste de empalme en longitud equivalente del perfil empalmado

El polinomio ajustado tiene la ecuación:

$$y = 2E-08x^4 - 6E-06x^3 + 0.0009x^2 - 0.0616x + 2.5514$$

Con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.9914$, siendo:

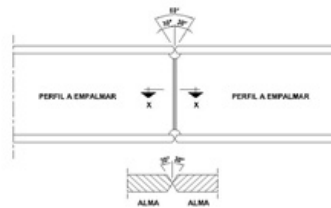
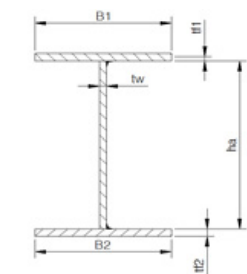
Y: Longitud equivalente del perfil a la que equivale el coste del empalme.

X: Peso del perfil, en kg, por metro lineal.

El empalme de perfil es económicamente rentable cuando se ahorra una longitud equivalente a 1.4m para perfiles ligeros y en torno a 0.85m para perfiles medios y pesados.

Lo cierto es que a igualdad de costes no interesa hacer cambio de sección. El cambio de sección lleva otros costes asociados que no han sido contabilizados en el coste del empalme. El cambio de sección implica tener que fabricar una nueva sección con materiales diferentes, tener una mayor variedad de materiales en el almacén, cargar las máquinas con las nuevas alas y almas, lo que implica desperdicio de materiales y otros costes asociados al cambio de sección.

Los datos utilizados para el cálculo del coste de la unión se muestran en la siguiente tabla.



tf[mm]=	10.7
tw[mm]=	7.1
B[mm]=	150
ha[mm]=	300
L[m]=	12000
tiempo de carga en bancada[min]	8.00
Tiempo de biselados[min]=	22.77
Tiempo de amado[min]	8.00
Tiempo de soldadura[min]=	36.49
Tiempo de retirada de bancada[min]=	4.00
Tiempo total[min]=	79.26

	M.O INSPECCIÓN[€/h]=	40
	M.O SOLDADOR[€/H]=	17
APORTACIONES EN SOLDADURA	Coste de hilo[€/kg]=	1.8
	Coste de gases[€/kg]=	1.8
	Coste de energía[€/kg]	0.48
	Volumen de soldadura[mm ³]=	70412.57
	Material de soldadura[kg]=	0.55
	Coste energía[€/kwh]=	0.09
	Amperios[A]=	200
	Voltios[V]=	24
	Material aportado [kg/h]=	0.91
	Factor de operación	0.5
W[kg/m]=	41.92	

APORTACIONES EN BISELADO	Consumo oxígeno[m ³ /h]=	5
	Consumo propano[m ³ /h]=	0.38
	Coste oxígeno[€/m ³]=	0.298
	Coste propano[€/m ³]=	0.74
	Coste de consumos en biselado[€]=	0.67

Coste de inspección[€]=	6.67		
Coste M.O[€]=	22.46		
Coste de biselados y oxiacorte[€]=	0.67		
Coste de soldadura[€]=	2.25		
Coste total sin inspección[€]=	25.38	Coste total[€/kg.m]=	0.61
Coste total con inspección[€]=	32.05	Coste total[€/kg.m]=	0.76

Coste de la chapa[€/kg]	0.62
kg a ahorrar para que compense el emplame[kg]=	51.69
Longitud equivalente de perfil[m]=	1.23

Figura 46. Parámetros de coste de la unión soldada

4.3 Codificación de las variables de diseño

En esta Tesis Doctoral, se han codificado las siguientes variables de diseño:

- **Tipos de dintel.** Se definen 4 geometrías de dintel para optimizar el pórtico. La geometría más adecuada es seleccionada por el algoritmo de optimización, por lo que se trata de una variable de diseño que está codificada del siguiente modo:
 - **Dintel tipo 1:** $T_{dintel}=1$ (dintel de inercia variable).
 - **Dintel tipo 2:** $T_{dintel}=2$ (dintel de inercia variable en tramo 1 y constante en tramo2).
 - **Dintel tipo 3:** $T_{dintel}=3$ (dintel de inercia constante).
 - **Dintel tipo 4:** $T_{dintel}=4$ (dintel de inercia variable en tramo 1, constante en tramo2, y constante o variable en tramo 3).
- **Tipos de pilar.** Se definen 3 geometrías de pilar para optimizar el pórtico. El tipo de pilar más adecuado es seleccionado por el algoritmo de optimización, que junto con el dintel define la geometría del pórtico. Esta variable de diseño que está codificada del siguiente modo
 - **Pilar tipo 1:** $T_{pilar}=1$ (pilar de inercia variable).
 - **Pilar tipo 2:** $T_{pilar}=2$ (pilar de inercia variable en tramo 1 y constante en tramo2).
 - **Pilar tipo 3:** $T_{pilar}=3$ (pilar de inercia constante en los tres tramos. Cada tramo puede tener una sección diferente).

Tanto los pilares como los dinteles están formados por secciones doble T, para cuya definición se codifican las siguientes variables.

- **Perfiles Doble T.** Son las variables de diseño discretas que definen las vigas armadas de sección constante y cuya descripción se encuentra en las tablas 22 a 24.

Estos perfiles están codificados como **dt(1),dt(2),...dt(i)**. Ordenados de menor a mayor peso por metro lineal de viga. Cada una de estas variables (vectoriales) contiene los siguientes campos escalares:

- H: Canto, en [cm]
- Tw: espesor de alma, en [cm]
- B1: ancho de ala 1, en [cm]
- B2: ancho de ala 2, en [cm]
- Tf1: espesor ala 1, en [cm]
- Tf2: espesor ala 2, en [cm]
- Wy: modulo resistente elástico en el eje fuerte, en [cm³]
- Wz: módulo resistente elástico en el eje débil, en [cm³]
- Peso: Peso por metro lineal, en [kg/m]
- Relacion Wy/peso: cociente entre el modulo resistente y el peso por metro lineal. Este valor da idea de la eficiencia de la sección.

- **Alas.** Son las variables de diseño discretas que definen el ancho y el espesor de las de las vigas armadas. Esta variable es vectorial y está codificada como sigue:
 - **alasDT(i,1):** Valor del ancho del ala, en [cm].
 - **alasDT(i,2), alasDT(i,2),... alasDT(i,j):** Valor del espesor, en [cm], asociado al ancho de ala definido por **alasDT(i,1)**.

Los valores están ordenados de menor a mayor anchura y de menor a mayor espesor.

- **Almas.** Son las variables de diseño discretas que definen el canto de las de las vigas armadas de canto constante. Esta variable está codificada como **almas(1), almas(2),... almas(i)**. Están ordenadas de menor a mayor canto.
- **Espesores de almas.** Son las variables de diseño discretas que definen el espesor de las almas de las de las vigas armadas. Esta variable está codificada como **espesores(1), espesores (2),... espesores (i)**. Están ordenadas de menor a mayor espesor.
- **Almas variables.** Son las variables de diseño discretas que definen el canto inicial y final compatible con cada ancho de ala. ancho y el espesor de las de las vigas armadas. Esta variable es vectorial y está codificada como sigue.
 - **almasvariables(i,1):** Valor del ancho del ala compatible, en [cm]. Corresponde con el canto mínimo que puede tener una pieza variable. No es posible definir una pieza con menor canto que ancho del alma ya que dificulta la soldadura automática de perfil.
 - **almasvariables (i,2), almasvariables (i,2),... almasvariables (i,j):** Valor del canto máximo de la pieza variable, en [cm], asociado al canto mínimo definido en **almasvariables(i,1)**. Los cantos máximos son obtenidos de modo que la suma del canto máximo más el canto mínimo de como resultado un ancho de bobina o de fleje comercial, definidos en el parámetro **bobinas(k)**.

Los valores están ordenados de menor a mayor.

- **Cantoneras.** Son las variables de diseño discretas que definen el canto inicial y final compatible con cada pieza de canto constante. Su codificación es la siguiente:
 - **cantoneras(i,1):** Valor del canto del alma de la pieza de sección constante, en [cm]. Corresponde con el canto mínimo que puede tener una pieza variable.
 - **cantoneras (i,2), cantoneras (i,2),... cantoneras (i,j):** Valor del canto máximo de la pieza variable, en [cm], asociado al canto mínimo definido en **cantoneras (i,1)**. Los canto máximos son obtenidos de modo que la suma del canto máximo más el canto mínimo de como resultado un ancho de bobina o de fleje comercial, definido en el parámetro **bobinas(k)**.

4.4 Parámetros del problema y restricciones. Interface de entrada

Los parámetros de entrada pueden agruparse en los siguientes tipos.

- **Parámetros geométricos.** Altura del pórtico, luz, separación de pórticos, número de crujeas, pendiente de la cubierta, altura del puente grúa.
- **Parámetros de materiales.** Módulos de elasticidad, límite elástico, límites de rotura.
- **Parámetros de carga**
 - Cargas permanentes.
 - Debidas a peso propio.
 - Debidas a los elementos de cierre y de instalaciones.
 - Cargas climáticas.
 - Nieve, granizo, acumulación de agua.
 - Viento.
 - Variación térmica.
 - Sobrecargas de uso y mantenimiento.
 - Sobrecargas debidas a puentes grúa.
- **Parámetros de combinación de hipótesis.**
 - Coeficientes de mayoración de acciones (γ_G, γ_Q) .
 - Coeficientes de simultaneidad (ψ_0, ψ_1, ψ_2) .

Las restricciones son sobre las variables de diseño y sobre las variables de seguridad. Las restricciones de seguridad son de dos tipos:

- Restricciones debidas a los Estados Límite Últimos. Están definidas por el código de comprobación y deben verificarse para cada sección y también a nivel de pieza.
- Restricciones debidas a los estados límite de servicio. También están definidas por el código de aplicación y se trata de comprobar que los desplazamientos en determinados puntos de la estructura están dentro de los límites fijados. En este algoritmo se comprueba:
 - El denominador de flecha vertical. Cociente entre la luz del dintel y el desplazamiento del nodo situado en mitad de la luz del dintel.
 - El denominador de flecha horizontal en cabeza de pilar. Cociente entre la altura del pilar y el desplazamiento horizontal del nodo que la define.
 - El denominador de flecha horizontal a la altura de la ménsula. Cociente entre la altura de la ménsula y su desplazamiento horizontal.

Dado que para definir el problema existe un gran número de parámetros de entrada y de restricciones, debe de diseñarse un interface que permita, tratando de minimizar errores de usuario, una fácil entrada de los parámetros y restricciones.

El módulo de entrada de datos debe ser rápido, intuitivo y versátil para minimizar tiempo y posibilidad de errores. Gran parte del tiempo que se pierde en el cálculo de las estructuras se usa en la entrada de datos.

Los datos (parámetros) introducidos en el interface son tratados posteriormente en el algoritmo para:

- Realizar la Modelización geométrica de la estructura. La modelización geométrica de la estructura son parámetros geométricos deducidos de los parámetros simplificados introducidos por el usuario.
- Asignar perfiles y materiales a las barras. Definir los valores iniciales de las variables de diseño.
- Definir las condiciones de contorno. Valores iniciales de las restricciones de contorno.
- Introducir cargas e hipótesis de carga. Definir parámetros de carga.
- Combinar hipótesis. Parámetros de carga deducidos de los parámetros de carga y de las reglas combinatorias establecidas en el código de diseño.
- Definir valores de las restricciones.

De este modo el algoritmo obtiene todos los datos necesarios para, a partir de los parámetros de entrada, poder iniciar el proceso de optimización estructural.

El mismo interface, una vez obtenida la solución, presenta un resumen de los resultados más importantes producto de la optimización. Se presentan los siguientes resultados.

- Aprovechamiento del pórtico en ELU.
- Flechas horizontales y verticales obtenidas (ELS).
- Peso total del pórtico en kg.
- Peso del pórtico por m² de superficie cubierta.
- m² de superficie del material del pórtico. Este resultado se presenta para poder valorar el coste de la pintura.
- Ratio de kg de acero y m² de superficie a pintar.

PÓRTICOS METÁLICOS

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujeas= 1 Sep. de pórticos[m]= 8 Resolver Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1 **CRUJIA 2** **CRUJIA 3** **CRUJIA 4**

Luz[m]= 26 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2**

No Si No Si No Si No Si No Si No Si No Si No Si

PARAMETROS GEOMETRICOS

Pilar de peto **Pilar 1** Pilar de peto **Pilar 1** Pilar de peto **Pilar 1** Pilar de peto **Pilar 1**

A O E A O E A O E A O E A O E A O E

ESTRUCTURA METALICA **CARGAS** **TIPO DE PÓRTRICO** **RESULTADOS**

MATERIALES
 Materiales: S275
 f_{yk} [kg/cm2]: 2803
 γ_{m0} : 1.05

PARAMETROS DE CARGA
 Permanentes: Peso cubierta[Nw/m2]= 200
 Variables: Nieve[Nw/m2]= 800 Cargas climáticas
 Carga térmica [°C]= 20
 Consideraciones de la carga de Viento:
 CTE Edificio abierto Vel.V[m/s2]= 27
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 4
 C_p = 0.8 C_s = 0.5 q_b [N/m2]= 742.68
 C_e = 1.6

PARAMETROS GEOMETRICOS
 dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESTRICCIONES
PANDEO
 Coeficiente de pandeo eje x= 0.9
 Coeficiente de pandeo eje y= 0.7
 Longitud de pandeo lateral[cm]= 170

CRITERIOS DE DISEÑO
 Den. fecha Vert. 250
 Den. fecha H Con PG 300
 n° de ciclos de cálculo 5

PARAMETROS DE CARGA
 NBE q [kg/m2]= 50
 Edificación cerrada Considerar presión interior

RESULTADOS
CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
 n°= Fecha 14/03/2014
 Nombre= Word

Figura 47. Esquema de parámetros en el interface gráfico de entrada de datos

4.5 Algoritmo de Optimización

4.5.1 Introducción

El algoritmo de optimización parte de unos parámetros y una inicialización de las variables de diseño. Las variables de diseño son inicializadas con el valor del mínimo coste compatible con la definición geométrica. El inicio de búsqueda de la solución comienza dentro de la población de perfiles definida en la tabla 3.2.4.1 fijando como perfiles iniciales los perfiles que tienen menor coste.

La búsqueda de la solución se realiza dentro de una población de perfiles definida, la cual condiciona las variables de diseño que definirán la geometría final del pórtico. Las variables de diseño evolucionarán de modo discreto dentro de los límites establecidos por las restricciones.

La condición de salida del algoritmo se verifica cuando se ha encontrado la función objetivo con las variables sometidas a las restricciones. El algoritmo también finaliza aun cuando sin haberse cumplido las restricciones estructurales, se han alcanzado las restricciones geométricas de las variables de diseño.

4.5.2 Descripción general del Algoritmo

Algoritmo principal

El algoritmo consta de los siguientes procedimientos principales.

- Creación automática de geometría (Algoritmo: *dibujaest*).
- Introducción automática de secciones iniciales (Algoritmo: *carbarr*).
- Creación automática de condiciones de contorno (Algoritmo: *pmapoyos*).
- Creación automática de hipótesis de carga y combinaciones (Algoritmo: *pmcargas*).
- Cálculo en primer orden (Algoritmo: *calculoenprimerorden*).
- Generación de secciones de comparación (Algoritmo: *calculaseccionesdecomparacion*).
- Establecimiento de la forma del pórtico teniendo en cuenta los condicionantes geométricos (Algoritmo: *calculatipodeportico*).
- Establecimiento de secciones iniciales considerando condicionantes geométricos y cálculo en primer orden ya realizado (Algoritmo: *calculacantosiniciales*).
- Comprobar cercanía de límites de tensión y de desplazamientos (Algoritmo: *comprobarlimitesportico*).
- Refino de secciones (Algoritmo: *refinodesecciones*).
- Aprovechamiento de apoyos si es articulada.

El pseudocódigo del algoritmo principal es:

- Capturar datos de interface de entrada.
- Asignación de tipo de pilar y de apoyo (articulado empotrado) en función de la carga del puente grúa
 - Apoyo empotrado si $PG \geq 5Tm$, articulado en caso contrario.
 - Pilar Empotrado si apoyo empotrado, pilar de inercia variable en caso contrario.
- Asignación del tipo de dintel en función de la luz del pórtico.
- Introducir geometría de la estructura (*dibujaest*).
- Introducir secciones iniciales (*carbarr*).
- Introducir condiciones de contorno (*pmapoyos*).
- Introducir cargas (*pmcargas*).
- Cálculo inicial (*calculoenprimerorden*).
- Buscar secciones de comparación para esfuerzos y deformaciones (*calculaseccionesdecomparacion*).
- Buscar la forma del pórtico más adecuada (*calculatipodeportico*).
- Dimensionamiento de piezas del pórtico (*calculacantosiniciales*).
- Calcular en primer orden (*calculoenprimerorden*).
- Comprobar si el tipo de pórtico ha cambiado debido al redimensionamiento de secciones (*calculatipodeportico*).
- Comprobar si se cumplen E.L.U y E.L.S. y distancia a límites (*comprobarlimitesportico*).
- **(ELU) Mientras** máxima tensión del pórtico (*maxtension*) > (límite de aprovechamiento (*aprovechamientomaximo*)) o (el margen de corrección de tensiones sea mayor que el error máximo admitido):
 - Refinar secciones (*refinodesecciones*).
 - Calcular en primer orden (*calculoenprimerorden*).
 - Comprobar si se cumplen E.L.U y E.L.S. y distancia a límites (*comprobarlimitesportico*).
 - Actualizar peso propio de la estructura.
 - Contar un ciclo más (*ciclo=ciclo+1*).
 - Si se ha llegado al límite de ciclos establecido salir del bucle y dar mensaje de que no se ha obtenido solución.
- Fin de **Mientras**
- **(ELS) Mientras** algún desplazamiento sea mayor que los límites fijados:
 - Si denominador de flecha vertical (*minflechaV*) < límite de flecha vertical (*flechavt*) **entonces**
 - Corregir sección del dintel (*refinadinteles*).
 - Fin Si
 - Si los desplazamientos horizontales son mayores que los límites **entonces**:
 - Si (se trata de un pórtico articulado) y (el momento en su base es menor que el límite de momento establecido (*criteriosdeop(1).maxba*)) **entonces**:
 - Aumentar la rigidez de la conexión con cimentación.
 - SiNo
 - Aumentar rigidez de pilares (*refinapilares*).
 - Fin si
 - Fin si
 - Calcular en primer orden (*calculoenprimerorden*).
 - Comprobar si se cumplen E.L.U y E.L.S. y distancia a límites (*comprobarlimitesportico*).
 - Actualizar peso propio de la estructura.
 - Contar un ciclo más (*ciclo=ciclo+1*).
 - Si se ha llegado al límite de ciclos establecido salir del bucle y dar mensaje de que no se ha obtenido solución.
- Fin de **Mientras**
- Presentación de resultados (tensiones, fechas, pesos y superficie de pintura).

Introducir geometría de la estructura (dibujada)

Interpreta los datos del interface de entrada de datos y genera elementos tipo barra biempotrada.

Primero se generan los dinteles, de modo que cada dintel se genera con 6 elementos tipo barra y se le asigna la etiqueta a cada barra. El dintel se denomina con el siguiente criterio "DINTELnumerodetramo-numerodedintel".

Si el dintel de la siguiente figura pertenece a la primera crujía, los dinteles se denominarán (DINTEL1-1, DINTEL2-1, DINTEL3-1, DINTEL4-1, DINTEL5-1, DINTEL6-1).

A continuación se generan los elementos barra biempotrados de los pilares. Generándose cada uno de los pilares de izquierda a derecha y asignándoles la etiqueta "PILARnumerodepilar-TRAMOnumerodetramo".

Suponiendo que el pilar dibujado en la figura, fuese el pilar derecho de un pórtico con una sola crujía, cada una de las barras del pilar se le asigna la etiqueta (PILAR2-Tramo1, PILAR2-Tramo2, PILAR2-Tramo3).

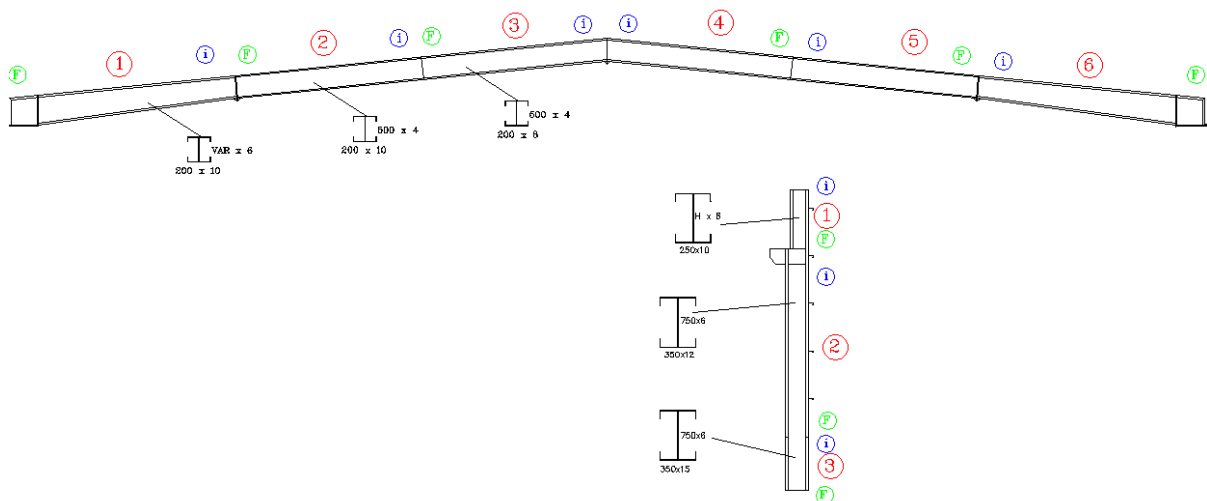


Figura 48. Elementos que componen el pórtico general

De este modo será fácil luego asignar cargas por barras e identificar flechas y tensiones en zonas del pórtico. Estos datos también se utilizarán para poder definir correctamente el tipo de pórtico sobre el que se está trabajando en función de los esfuerzos que aparecen en cada barra del pórtico.

Finalmente se crean las barras biempotradas asignadas a las ménsulas, con sus correspondientes etiquetas identificadoras "MENSULAnumerodeporticoIZQUIERDA" o "MENSULAnumerodeporticoDERECHA", en el caso de la figura anterior la ménsula recibe el nombre de "MENSULA1DERECHA".

Las longitudes de cada una de las barras se corresponden con la definición realizada en el apartado "Definición de la geometría del pórtico" del punto 4.2.2.

Introducir secciones iniciales (carbarr)

Introduce el pilar y el dintel de menor peso compatible con la geometría del pórtico. Es decir, introduce la viga armada de menor peso de canto constante en las barras de inercia constante e introduce propiedades de barra de inercia variable a pilares y dinteles variables.

Introducir cargas (pmcargas)

El procedimiento “*pmcargas*” define las hipótesis de carga y las cargas, tanto permanentes como las variables.

Introduce Cargas permanentes

- Asigna **peso propio** a cada una de las barras en función del peso de la sección introducida previamente. El nombre de la hipótesis “*PESO PROPIO*”.
- Asigna **carga permanente** de cubierta como carga uniformemente distribuida en barra. La aplicación de la carga es el producto de multiplicar la separación de pórticos por el valor introducido en la casilla de “*Peso cubierta*” [Nw/m²]. Este valor se introduce en todas las barras identificadas con la etiqueta “*Dintel...*”. El nombre de la hipótesis “*C. PERMANENTES*”.

The image shows a software interface for defining loads. The main window is titled 'CARGAS'. It is divided into several sections:

- Permanentes:** This section is highlighted with a red box. It contains a text input field for 'Peso cubierta[Nw/m2]' with the value '200' entered.
- Variables:** Contains input fields for 'Nieve[Nw/m2]' (value: 800) and 'Carga térmica [°C]' (value: 20). There is a button labeled 'Cargas climáticas'.
- Consideraciones de la carga de Viento:** This section contains options for wind load application criteria: 'Eurocódigo' (selected with a radio button), 'ASCE', and 'Escalonamiento continuo'. There is a 'Ver gráfico' button next to 'Eurocódigo'. Below these are input fields for 'b[m]' (value: 26) and 'h[m]' (value: 8). To the right, there are several numerical input fields: 'Vel.V[m/s]' (value: 27), 'Tipo de Entorno' (value: 4), 'qb[N/m2]' (value: 455,63), 'Ce' (value: 1,63), 'Edificio abierto' (checkbox, unchecked), 'Grado obstrucc.' (value: 0), 'Cp' (value: 0,7076), and 'Cs' (value: 0,3153).

Figura 49. Parámetros de introducción de cargas en el interface gráfico. Carga permanente

Introduce Cargas variables

- Asigna **sobrecarga** de cubierta como carga uniformemente distribuida en barra. La aplicación de la carga es el producto de multiplicar la separación de pórticos por el valor introducido en la casilla de “Nieve” [Nw/m²]. Este valor se introduce en todas las barras identificadas con la etiqueta “Dintel...”. El nombre de la hipótesis “C. NIEVE”.

En este apartado se introduce la sobrecarga de cubierta más desfavorable (sobrecarga de uso, nieve, granizo...).

CARGAS

Permanentes
Peso cubierta[Nw/m2]= 200

Variables
Nieve[Nw/m2]= 800
Carga termica [°C]= 20

Cargas climáticas

Consideraciones de la carga de Viento

Criterio Aplicación viento
 Eurocódigo Ver gráfico
 ASCE
 Escalonamiento continuo

b[m]= 26 h[m]= 8

Vel. V[m/s]= 27
Tipo de Entorno= 4
qb[N/m2]= 455,63
Ce= 1,63
 Edificio abierto
Grado obsturcc.= 0
Cp= 0,7076 Cs= 0,3153

Figura 50. Parámetros de introducción de cargas en el interface gráfico. Sobrecarga de uso

- Asigna **sobrecarga de viento a dinteles y pilares expuestos**. Igual que en el caso anterior, la carga se aplica como carga uniformemente distribuida en barra. En este caso se generan 4 hipótesis de carga, que son excluyentes entre si y toman los nombres “C.VIENTO 1”, “C.VIENTO 2”, “C.VIENTO 3”, “C.VIENTO 4”.

La distribución de cargas de viento en cubierta y en fachada se aplica conforme al criterio y formulación descrita en el EC-1. La distribución en altura del viento se aplica por tramos de pilar identificando el punto más alto de cada tramo y asignándole a todo el tramo de pilar la misma carga de viento. La distribución de zonas de cubierta se identifica con las etiquetas colocadas a los dinteles. Los coeficientes de presión y succión se calculan a partir de la geometría del pórtico, que es conocida.

Los valores de la carga de viento se obtienen aplicando la formulación del EC-1 con los datos de entrada que se proporcionan en el formulario.

CARGAS

Permanentes
 Peso cubierta[Nw/m2]= 200

Variables
 Nieve[Nw/m2]= 800
 Carga térmica [°C]= 20

Consideraciones de la carga de Viento

Criterio Aplicación viento

Eurocódigo Ver gráfico

ASCE

Escalonamiento continuo

b[m]= 26 h[m]= 8

Vel.V[m/s]= 27

Tipo de Entomo= 4

qb[N/m2]= 455,63

Ce= 1,63

Edificio abierto

Grado obsturcc.= 0

Cp= 0,7076 Cs= 0,3153

Figura 51. Parámetros de introducción de cargas en el interface gráfico. Sobrecarga de viento

- Asigna **sobrecarga de temperatura**. La carga se aplica en todas las barras del pórtico. El nombre de la hipótesis de carga es "TEMPERATURA".
- Asigna **sobrecargas de puente grúa**, en caso de que los haya. En cuyo caso se asignan dos hipótesis "P.GRUA" y "P.GRUA 2", que se corresponden con las dos posiciones más desfavorables que la reacción del puente grúa ejerce sobre las ménsulas del pórtico. Estas dos hipótesis de carga son excluyentes entre sí. Las cargas son puntuales y aplicadas en mitad de la longitud de la ménsula. El valor de las cargas se obtiene del catálogo más desfavorable de puente grúa, elegido entre los fabricantes más conocidos.

Realiza combinaciones

Se realizan las combinaciones de hipótesis de carga conforme a la regla combinatoria indicada en el EC-1. Para ello:

- Se recorren todas las hipótesis de carga permanentes aplicando los coeficientes de mayoración programados (1.35 y 0.8 habitualmente).
- Se recorren todas las cargas variables y se realizan combinaciones con todas ellas considerando los coeficientes de mayoración y de simultaneidad así como considerando las cargas que son excluyentes.

Realizar el cálculo en primer orden (*calculoenprimerorden*)

Se realiza el proceso de obtención de esfuerzos y comprobación de barras para cada una de las combinaciones realizadas. El pseudocódigo es el siguiente.

- Identificar que no existen elementos de segundo orden. Si existen salir del procedimiento y enviar mensaje.
- Para cada imperfección inicial global:
 - Crear matriz de cargas.
 - Eliminar grados de libertad bloqueados.
 - Resolver el sistema.
 - Reorganizar grados de libertad eliminados.
 - Obtener las cargas en coordenadas locales al elemento.
 - Calcular esfuerzos en primer orden.
 - Restaurar geometría inicial.
- Siguiendo imperfección global.
- Obtener el comportamiento de la barra en estado límite último (*comprobarbarras*).

Generación de secciones de comparación (*calculaseccionesdecomparacion*)

Este procedimiento busca las secciones del pórtico, tanto en pilares como en dinteles y ménsulas donde tomar los esfuerzos de referencia para buscar la geometría del pórtico más adecuada a la curva de momentos.

- En el dintel se toman 12 puntos de comprobación (dos en cada uno de los 6 tramos que componen cada dintel, inicio y final).
- En el pilar se toman 6 puntos, dos en cada tramo, inicio y final. De este modo siempre se toman como puntos de comprobación.
 - La base del pilar.
 - La cabeza del pilar.
 - Punto bajo la ménsula.
 - Punto sobre la ménsula.
 - Dos Puntos a media altura entre ménsula y base de pilar.

Obtención de la forma del pórtico (calculatipodeportico)

Obtiene la geometría del pórtico partiendo del diagrama de momentos y las tipologías de piezas documentadas en el apartado 4.2.2, subapartados “Geometría de pilares” y “Geometría de dinteles”. A continuación se describe el pseudocódigo.

- Obtener geometría de pilar
 - Tipo de pilar=3.
 - Si $(\text{Momento en cabeza de pilar} > \text{Momento sobre ménsula})$ y $(\text{Momento sobre ménsula} + 10 > \text{Momento bajo ménsula})$ y $(\text{Momento bajo ménsula} > \text{Momento en la base})$ y $(\text{Momento en cabeza de pilar} > 1.3 * \text{Momento en la base})$ y $(\text{Momento en el medio del pilar} > 1.05 * \text{Momento en la base})$ entonces Tipo de pilar =1 (variable todo).
 - Si $(\text{altura de pilar} > 800\text{cm})$ y $(\frac{\text{Momento bajo mensula} - \text{momento en la base}}{\text{momento bajo mensula}} < 0.1)$ y $(\text{Momento en cabeza de pilar} > 1.2 * \text{Momento en la base})$ entonces Tipo de pilar =2(variable solo en la parte superior, tramo 1).

- Obtener geometría de dintel
 - Tipo de dintel=2.
 - Si longitud total de dintel $< 800\text{cm}$ entonces Tipo de dintel=1.
 - Si $(\text{longitud total de dintel} \geq 800\text{cm})$ y $(\text{longitud total de dintel} \leq 2500\text{cm})$ entonces Tipo de dintel=1.
 - Si longitud total de dintel $> 4000\text{cm}$ entonces Tipo de dintel=4.

Límites de comprobación (comprobarlimitesportico)

El procedimiento “comprobarlimitesportico” comprueba, para cada una de las barras que componen el pórtico, su máximo nivel de tensión y su deformación. Estos parámetros son comparados con los valores límite para establecer un parámetro de distancia a esos valores. Este parámetro se utilizará posteriormente para corregir la sección.

Los límites de comprobación se establecen según los siguientes criterios:

1. Comprobación de los estados límites últimos conforme al EC-3.
Se comprueban todas las barras del pórtico, almacenando en matrices las barras que no cumplen, e identificando el pilar o dintel al que pertenecen y su tramo (6 tramos para cada dintel y 3 tramos para cada pilar).
2. Por defecto el formulario carga los valores límite de deformación establecidos en el código de comprobación, en este caso EC-1, los cuales corresponden con la siguiente tabla:

Tabla de Valores límite para la flecha activa vertical bajo combinación característica

Tipo de elemento	Valores límite W_{activa}
Cubiertas sólo accesibles para mantenimiento	L/200
Cubiertas accesibles (con carácter general)	L/300

Tabla 25. Valores límite flecha activa vertical

En elementos vistos, que puedan afectar a la apariencia del edificio, la flecha total aparente W_{max} debe limitarse a L/250 para la combinación característica.

Valores límite para la flecha horizontal bajo combinación característica

Tipo de elemento	Valores límite
Pórticos de cubierta en ausencia de elementos frágiles susceptibles de deterioro.	$u \leq \frac{H}{150}$
Pórticos de cubierta que soporten vigas carril.	$u \leq \frac{H}{300}$. A la cota de rodadura
Diferencia entre desplazamientos en cabeza de dos soportes de apoyo enfrentados que soporten vigas carril.	20mm. A la cota de rodadura

Tabla 26. Valores límite flecha horizontal

No obstante el usuario puede intervenir en los límites establecidos para E.L.S. El algoritmo de optimización tiene en cuenta los límites que se introducen en el formulario, los cuales se cargan por defecto con los correspondientes al código de diseño.

ESTRUCTURA METÁLICA		CARGAS									
Materiales		Permanentes									
S275		Peso cubierta[Nw/m2]= 200									
fyk[kg/cm2]	2803	Variables									
γ_{m0}	1,05	Nieve[Nw/m2]=	800								
		Carga térmica [°C]=	20								
Pilares tipo	DT	Cargas climáticas									
Vigas tipo	DT	Consideraciones de la carga de Viento									
<table border="1"> <tr> <td>Den. flecha Vert.</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>Den. flecha H Sin PG</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Den. flecha H Con PG</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>nº de ciclos de cálculo</td> <td>5</td> </tr> </table>		Den. flecha Vert.	250	Den. flecha H Sin PG	150	Den. flecha H Con PG	300	nº de ciclos de cálculo	5	Criterio Aplicación viento <input checked="" type="radio"/> Eurocódigo Ver gráfico <input type="radio"/> ASCE <input type="radio"/> Escalonamiento continuo	
		Den. flecha Vert.	250								
		Den. flecha H Sin PG	150								
		Den. flecha H Con PG	300								
		nº de ciclos de cálculo	5								
Vel.V[m/s]= 27 Tipo de Entorno= 4 qb[N/m2]= 455,63 Ce= 1,63 <input type="checkbox"/> Edificio abierto Grado obsturcc.= 0 Cp= 0,7076! Cs= 0,3153!											
b[m]= 26	h[m]= 8										

Tabla 27. Configuración de límites de flecha en el interface gráfico de entrada de datos

Refino de secciones

Al identificar las barras que no cumplen con el pilar o dintel al que pertenecen y su tramo, estamos identificando el tramo de pilar o dintel que no cumple para realizar su refuerzo o bajar de sección si fuese necesario.

Estas modificaciones de sección se realizan con el siguiente criterio:

- Refino de dinteles (procedimiento “*refinadinteles*”):
 - Si el dintel es de los tipos 1 ó 3 se redimensiona todo el dintel siempre y cuando una de las piezas del dintel esté sobreaprovechada (aprovechamiento de sección superior a 1) o infraaprovechada (aprovechamiento de sección menor que el margen de tolerancia admitido).
 - Si el dintel es de los tipos 2 ó 4 se redimensiona la parte del dintel que esté sobreaprovechada o infraaprovechada. Bien sea la parte constante o la parte variable. En este caso se considera si el coste de empalmar un perfil supera al coste de kg de material ahorrado. Según sea necesario redimensionar parte constante o parte variable, la parte que no es necesario redimensionar se coloca el perfil compatible con la parte redimensionada.
 - Redimensionamiento de Cantonera (tramos 1 y 6 del dintel). La cantonera hay que redimensionarla, tanto si cumple como si se ha redimensionado los tramos 2 y 3 del dintel ya que el tramo 1 ha de ser compatible con los tramos 2 y 3. Esto se hace en el procedimiento “*buscancanteravariabile(,,,,)*”.

- Refino de pilares (procedimiento “*refinapilares*”).
 - Si el pilar es de tipo 1 se redimensiona todo el pilar siempre y cuando una de las piezas del pilar esté sobre aprovechada (aprovechamiento de sección superior a 1) o infra aprovechada (aprovechamiento de sección menor que el margen de tolerancia admitido).
 - Si el pilar es de tipo 2 se redimensionan los tramos de inercia constante siempre y cuando una de las piezas constantes del pilar estén sobre aprovechadas (aprovechamiento de sección superior a 1) o infra aprovechadas (aprovechamiento de sección menor que el margen de tolerancia admitido). El redimensionamiento tiene en cuenta los criterios económicos de cambio de sección. La parte variable del pilar se adapta a la parte constante ejecutando el procedimiento “*buscacantoneravariabile*”.
 - Si el pilar es de tipo 3 se redimensionan los tramos de inercia constante siempre y cuando una de las piezas constantes del pilar estén sobre aprovechadas (aprovechamiento de sección superior a 1) o infra aprovechadas (aprovechamiento de sección menor que el margen de tolerancia admitido). Cada uno de los tres tramos del pilar se redimensiona de modo óptimo teniendo en cuenta los esfuerzos solicitantes. Posteriormente se compara el coste de homogeneizar las secciones del pilar para evitar cambios de sección. Finalmente la forma del pilar queda definida teniendo en cuenta los criterios económicos de cambio de sección.

4.5.3 Diagrama de Flujo del Algoritmo

El algoritmo de optimización puede representarse esquemáticamente como se indica en la figura siguiente:

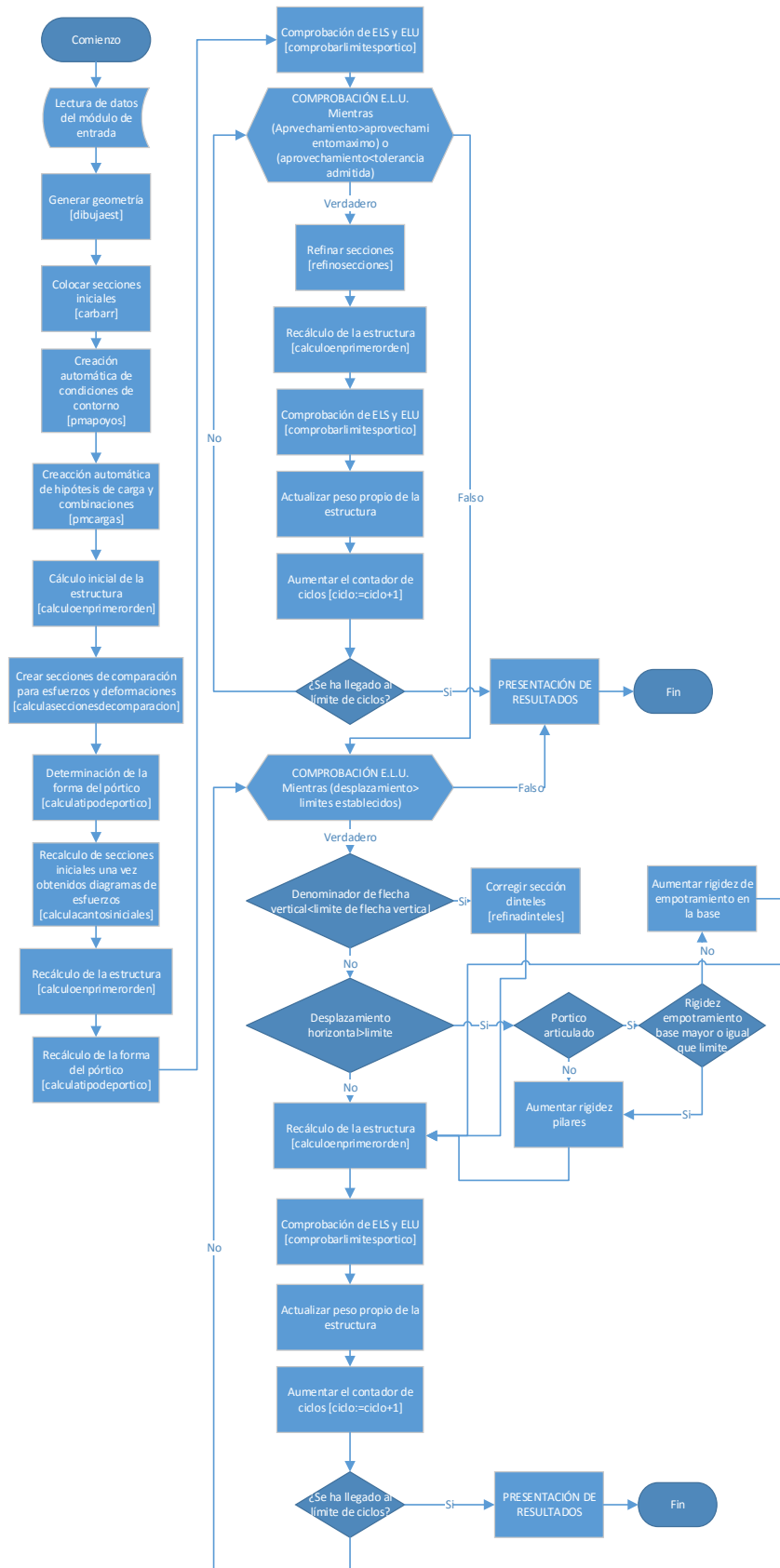


Figura 52. Diagrama de flujo de algoritmo de optimización heurístico

4.6 Módulo de Entrada de Datos

Se ha diseñado un módulo de entrada de datos con el objetivo de ser rápido, intuitivo y versátil.

Figura 53. Interface gráfico de entrada de datos

- **Número de Crujeas:** Se rellenará con el número de pórticos adosados que conforman la estructura a optimizar. Cada uno de estos pórticos puede tener una luz y altura diferentes. También pueden estar soportando diferentes puentes grúa.
- **Sep. De pórticos:** Se introduce el valor de la separación entre pórticos (en dirección longitudinal de la nave).
- **Resolver:** Si esta casilla está activada (opción por defecto). Se optimiza el pórtico introducido.
- **Soldadura a 2 Caras.** Si está activada se considerará que la soldadura entre el alma y las alas se realiza por las dos caras. Sino está activa da se considera que la soldadura solo se realiza por una de las caras del alma.
- **Selección Automática de apoyos.** Si está activada (opción por defecto), el programa selecciona la configuración de apoyos de cimentación más adecuada. Si no está activada la selección de apoyos (empotrado o articulado) se hará de modo manual para cada pilar.

- **CRUJIA 1, CRUJIA 2, CRUJIA 3, CRUJIA 4.** Contienen datos de la luz, altura, pendiente de la cubierta y puentes grúa que soporta cada uno de los pórticos adosados.

Si no lleva puente grúa se seleccionará la opción “No”, si lo lleva se seleccionará “Si” y a continuación se selecciona un puente grúa de la lista desplegable, automáticamente se rellenan las casillas con las reacciones máxima, mínima y transversal (por rueda, considerando puentes grúa de dos ruedas). También se rellena la separación entre las ruedas del puente grúa.

El coeficiente α representa el número por el que se multiplica las reacciones por rueda para obtener la reacción sobre el pórtico. Si previamente se ha calculado la viga carril, es preferible meter en estas casillas las reacciones que se han obtenido en la viga carril, dado que es un resultado más exacto.

- **ESTRUCTURA METALICA.** Contiene datos sobre el tipo de material a emplear en el pórtico, tipo de perfil con el que optimizar el pórtico (“DT” indica viga armada de ala abierta; “RFD” indica viga armada de ala plegada; “IPE, HEA, HEB, RHS, UPN” perfiles laminados en caliente introducidos en la base de datos).

Por defecto las casillas que aquí aparecen se rellenan con los datos de la configuración inicial del programa, también modificable por el usuario, el cual decide con que configuración iniciar el programa o crear sus propias configuraciones.

- **CRITERIOS DE DISEÑO.** Configuración de parámetros para la optimización.

- **CARGAS.** Se introducen aquí las cargas permanentes de cubierta y las cargas climáticas.

Pulsando el botón “Cargas Climáticas” se muestra un formulario con el mapa de España donde pulsando en el lugar geográfico donde se ubicará el pórtico, automáticamente se rellenan los datos de viento (seleccionando el tipo de entorno) y nieve (introduciendo la altura del lugar geográfico donde se ubica la construcción). De este modo se crean automáticamente las cargas que afectan al pórtico.

- **Cargas climáticas de viento.** Este módulo, en función del tipo de entorno elegido y de la zona elegida, calcula automáticamente la velocidad básica de viento, el coeficiente de exposición y los coeficientes de presión y de succión, a partir de los cuales se introducen las cargas en las fachadas y las cubiertas de los pórticos. Los coeficientes C_p y C_s que se muestran son los correspondientes a las fachadas verticales, los coeficientes de cubierta se obtienen también automáticamente en función de la pendiente de la cubierta (que ha sido introducida en los datos geométricos).
- **Cargas climáticas de Nieve.** Este módulo, en función del tipo de la zona invernal elegida y de la altitud del emplazamiento obtiene automáticamente la carga de nieve que es introducida en el pórtico.

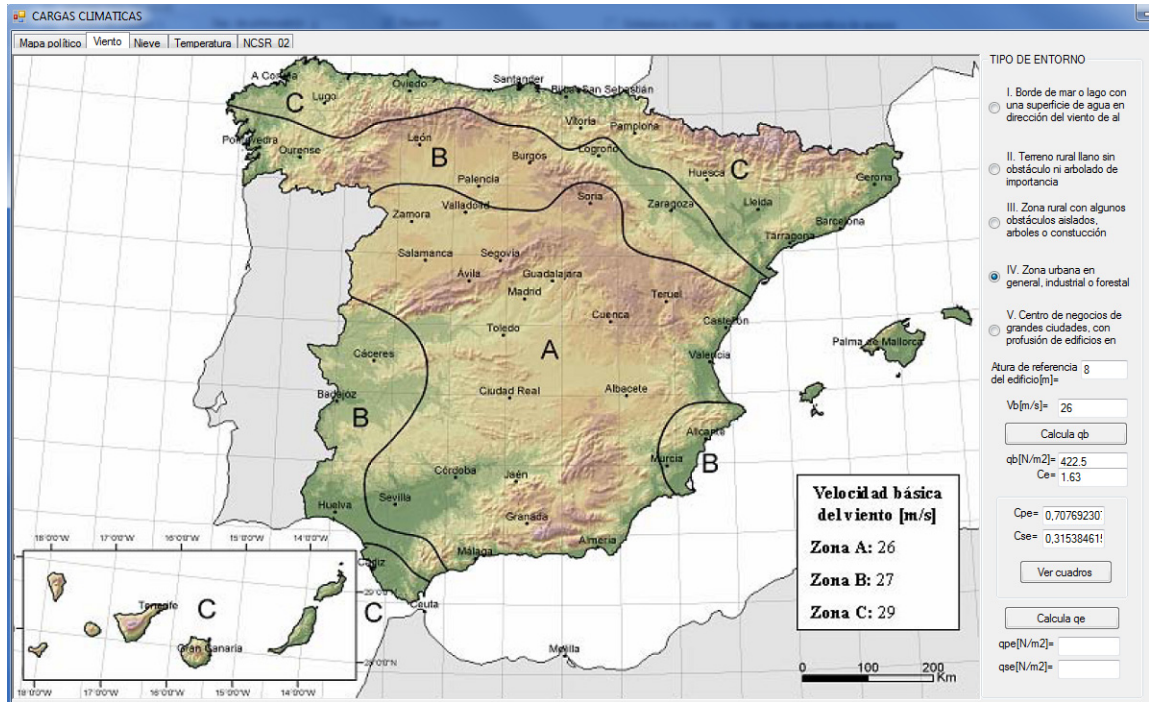


Figura 54. Mapa para la captura de datos climáticos de viento

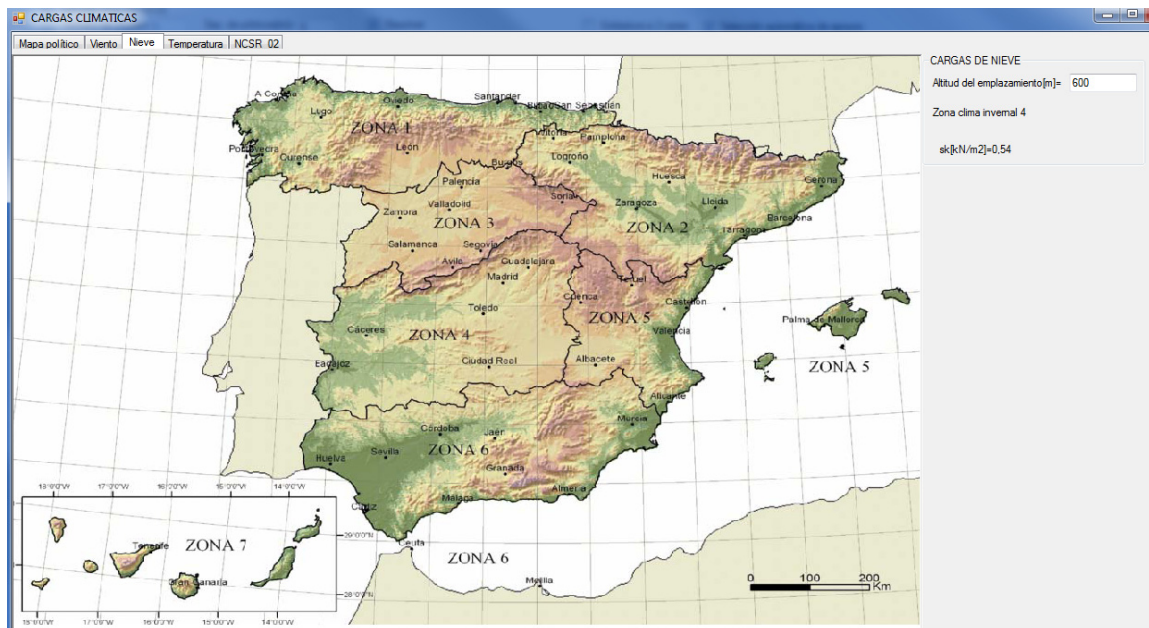


Figura 55. Mapa para la captura de datos climáticos de nieve

- TIPO DE PORTICO.

- “Dos aguas”: pórtico típico con cumbre central.

De una crujía

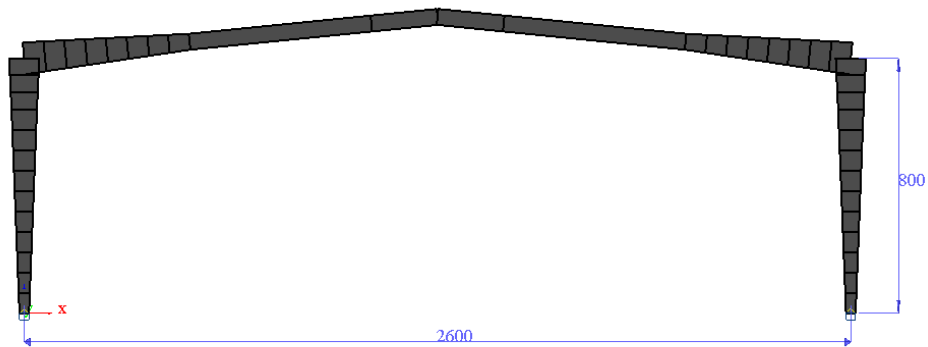


Figura 56. Pórtico a 2 aguas con una crujía

De dos crujías

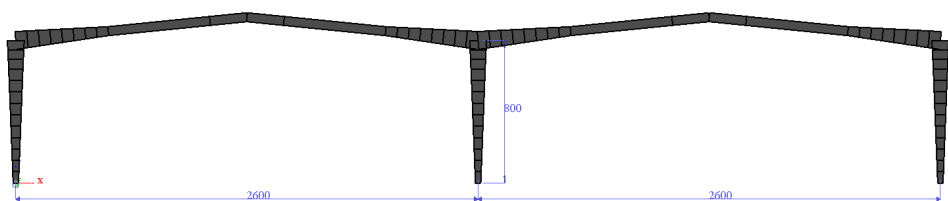


Figura 57. Pórtico a 2 aguas con dos crujías

- “Múltiple”: Pórtico a dos aguas con pilares interiores.

De dos crujías

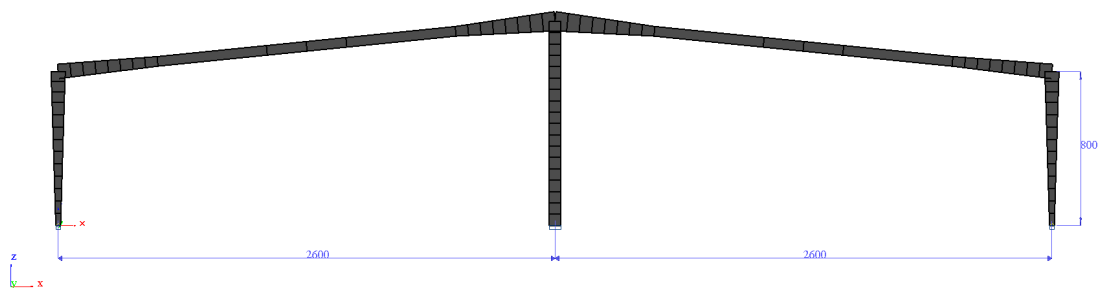


Figura 58. Pórtico múltiple a dos aguas y dos crujías

- **PANDEO.** Coeficientes de pandeo en eje fuerte, eje débil y pandeo lateral para la optimización del pórtico. Estos factores son modificables por el usuario. Los valores iniciales dependen de la configuración inicial del programa. Valores más exactos de la longitud de pandeo de las barras se puede obtener calculando las longitudes de pandeo por algoritmos desarrollados dentro del propio programa, pero que no son objeto de estudio en esta tesis.
- **RESULTADOS.** Zona donde se muestra un resumen de los resultados más importantes tras la optimización:
 - Se muestra el aprovechamiento máximo de las barras en ELU.
 - El denominador de flecha vertical y horizontal obtenido.
 - El peso del pórtico si solo se hubiese si solo se hubiese impuesto la condición de cumplir ELU.
 - El peso del pórtico debido a la imposición de cumplir con los ELS.
 - Peso de pórtico por m² de superficie cubierta.
 - Superficie de los perímetros del pórtico. Dato importante para calcular los m² de superficie a pintar.
 - Relación entre kg de estructura y m² de superficie a pintar. Ratio importante para transformar el coste de pintura por m² en coste por kg, que es la unidad de referencia con respecto a la cual se suelen imputar todos los costes.

The screenshot shows the 'PÓRTICOS METÁLICOS' software interface. The main window is titled 'GEOMETRÍA DE NAVE' and contains several configuration panels:

- GEOMETRÍA DE NAVE:** Includes 'Número de crujeas' (set to 1), 'Sep. de pórticos[m]= 8', and 'Resolver' checked. There are also options for 'Soldadura a 2 caras' and 'Selección automática de apoyos'.
- CRUJIA 1, 2, 3, 4:** Each section contains 'Luz[m]= 26', 'Altura al alero[m]= 8', and 'Pendiente[%]= 10'. Below each is a 'PUENTE GRÚA' section with radio buttons for 'No' and 'Si'.
- ESTRUCTURA METÁLICA:** Includes 'Materiales' (S275), 'fyk[kg/cm2] 2803', and 'γ_{m0} = 1.05'. It also has 'Pilares tipo DT' and 'Vigas tipo DT'.
- CARGAS:** Includes 'Peso cubierta[Nw/m2]= 200', 'γ_g = 1.35', 'Nieve[Nw/m2]= 543.82', 'Carga térmica [°C]= 20', and 'Consideraciones de la carga de Viento' with options for 'CTE' and 'Edificio abierto'.
- PANDEO:** Includes 'Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9', 'Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7', and 'Longitud de pandeo lateral[cm]= 170'. It also has 'TIPO DE PÓRTICO' options: 'dos aguas', 'asimétrico', 'Un agua', 'Multiple', and 'de testero'.
- RESULTADOS (highlighted in red):**
 - Máximo aprovechamiento: 0.97
 - Máximo Den. Flecha vertical: 264.05
 - Máximo Den. Flecha horizontal: 151.13
 - Peso pórtico condicionado por ELU: 2766.13
 - Peso pórtico condicionado por ELS: 2766.13
 - Peso pórtico por m²: 13.3
 - Superficie de pintura m²: 91.78
 - kg/m²: 30.14
- CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA:** Includes 'nº=' and 'Nombre=' fields, and a 'Fecha' field set to '01/12/2013'.

Buttons for 'ACEPTAR' and 'CANCELAR' are located at the bottom right of the interface.

Figura 59. Resultados de aprovechamiento obtenido, pesos por pórtico y superficie de pintura

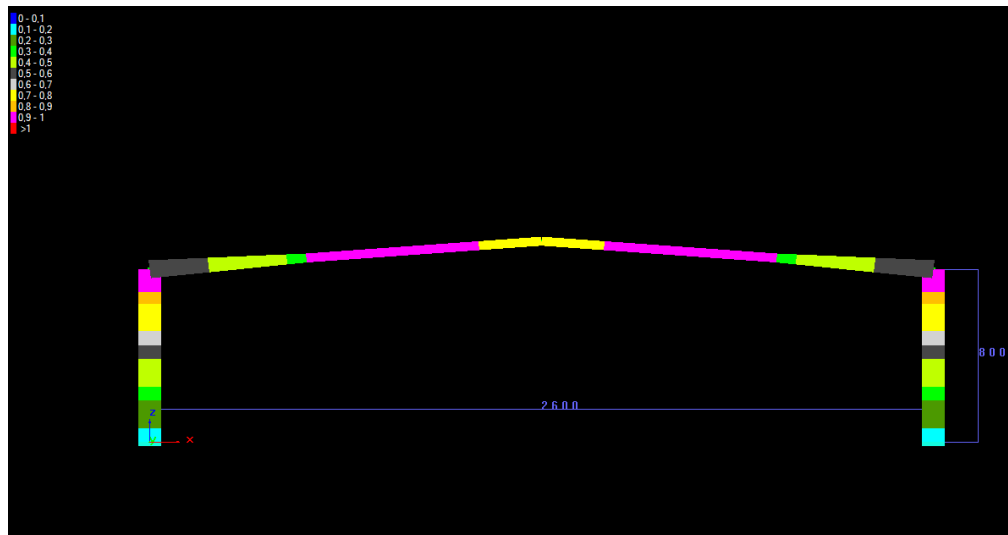


Figura 60. Gráfico de aprovechamiento de secciones. Representación por colores

4.7 Cargas y Combinaciones

Automáticamente se generan varias hipótesis de carga y la combinatoria según el criterio del EC-3.

4.7.1 Hipótesis de Carga

- **Hipótesis 1. Peso propio.** Se genera el peso propio de la estructura. Cada iteración se corrige este peso ya que va cambiando en cada ciclo de optimización.
- **Hipótesis 2. Cargas permanentes.** Es el peso propio de la cubierta, se genera con el valor que se mete en la casilla de "Peso de cubierta [N/m^2]". Este valor se considera habitualmente $20\text{kg}/m^2$ si se trata de una cubierta de chapa simple o panel de poliuretano de 30 ó 40mm de espesor. Si se trata de panel de lana de roca o existen falsos techos esta carga debe de incrementarse. El valor introducido por m^2 se multiplica por el valor de la separación de pórticos para obtener una carga por metro lineal. En la siguiente imagen se muestra esta carga correspondiente al ejemplo mostrado en la Figura 59. Figura 59. Resultados de aprovechamiento obtenido, pesos por pórtico y superficie de pintura.

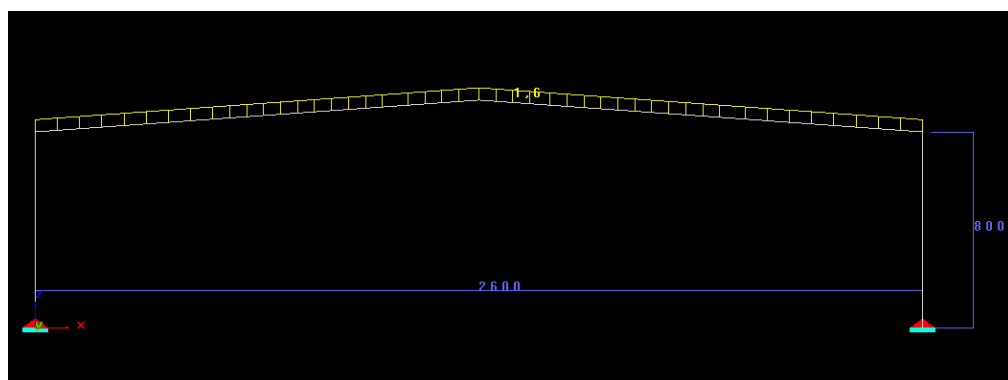


Figura 61. Representación gráfica de la carga permanente de cubierta

- **Hipótesis 3. Carga de Nieve.** Sobrecarga de nieve o de uso (la mas desfavorable) se genera con el valor que se mete en la casilla de "*Nieve[N/m²]*". Este valor se obtiene de las cargas climáticas. El valor introducido por m² se multiplica por el valor de la separación de pórticos para obtener una carga por metro lineal. En la siguiente imagen se muestra esta carga correspondiente al ejemplo mostrado en la Figura 59.

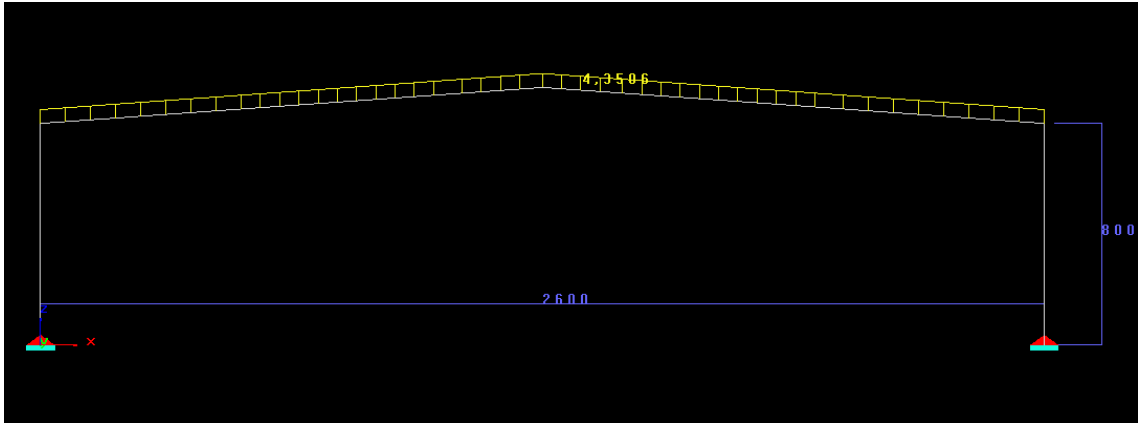


Figura 62. Representación gráfica de la sobrecarga en cubierta

- **Hipótesis 4. Carga de Viento X+, Cubierta opción A.** Sobrecarga de viento se genera con los valores introducidos en las casillas de viento (q_b , C_e , C_p , C_s) y con la geometría del pórtico. Estos valores se obtienen de las cargas climáticas. El valor introducido por m² se multiplica por el valor de la separación de pórticos para obtener una carga por metro lineal. Como se ve en la siguiente figura la carga en fachada se escalona a medida que aumenta la altura con el fin de conseguir mayor precisión en el resultado del cálculo. Este factor tiene importancia a la hora de obtener el dimensionamiento del pórtico.

En la siguiente imagen se muestra esta carga correspondiente al ejemplo mostrado en la Figura 59.

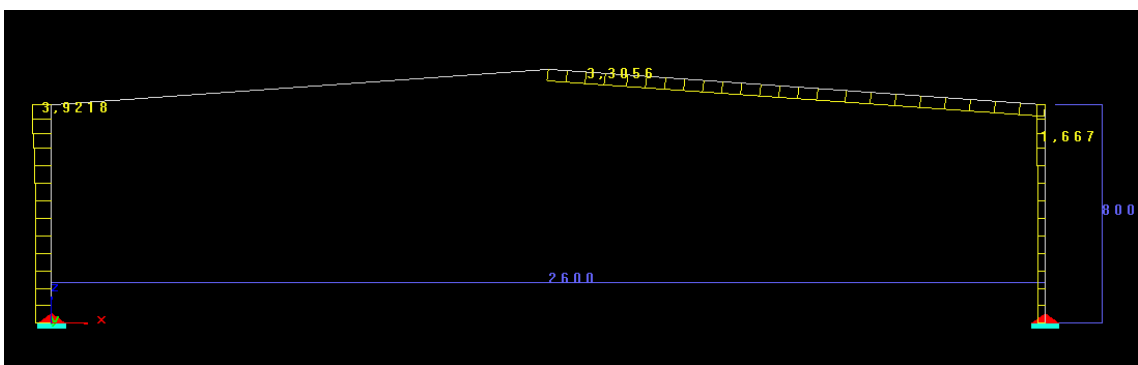


Figura 63. Representación gráfica de la Hipótesis 4 de viento

- Hipótesis 5. Carga de Viento X-, Cubierta opción A.

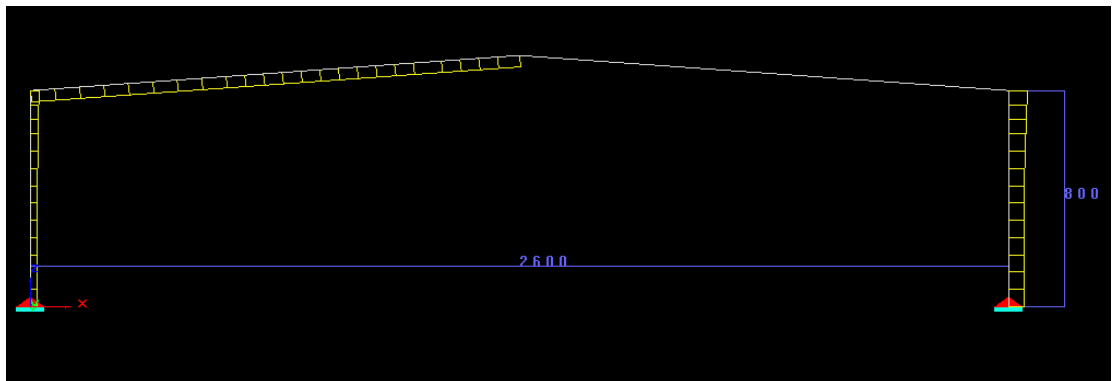


Figura 64. Representación gráfica del viento X-. Opción A

- Hipótesis 6. Carga de Viento X+, Cubierta opción B.

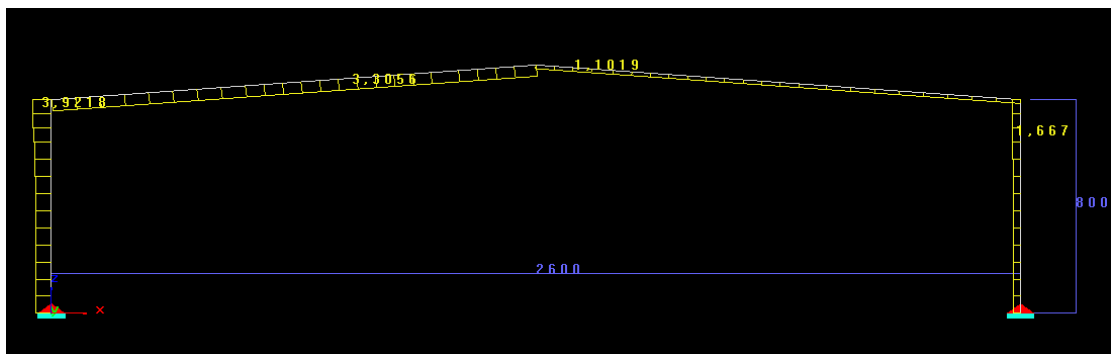


Figura 65. Representación gráfica del viento X+. Opción B

- Hipótesis 7. Carga de Viento X-, Cubierta opción B.

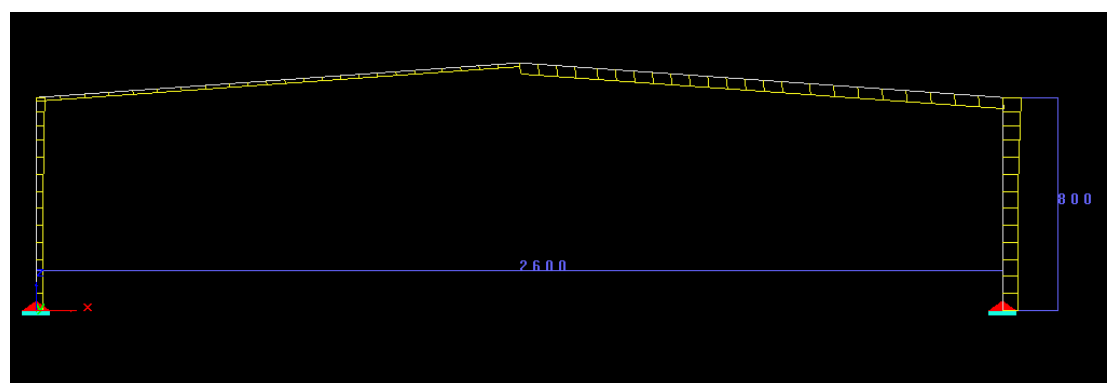


Figura 66. Representación gráfica del viento X-. Opción B

Todas las hipótesis de viento son excluyentes entre sí.

- **Hipótesis 8. Carga térmica.** Sobrecarga que se genera con el valor introducido en la casilla “Carga térmica [°C]”.

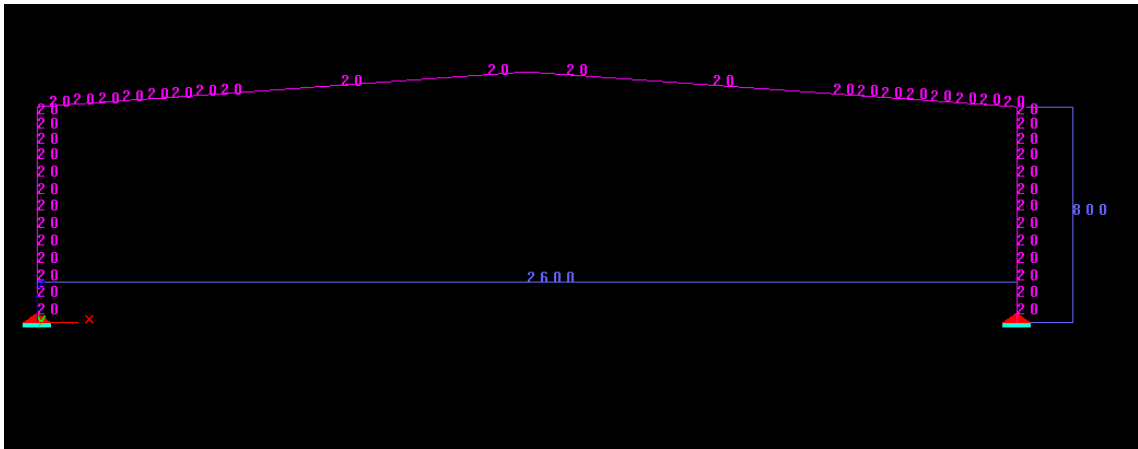


Figura 67. Representación gráfica de la carga de temperatura

4.7.2 Combinación de hipótesis.

Se realiza automáticamente con el criterio indicado en el EC-1, EAE, o la configuración del código cargado.

4.7.2.1 Estados límite últimos

Situaciones persistentes o transitorias. Se realizarán las combinaciones de acuerdo al siguiente criterio.

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Siendo:

$G_{k,i}$: Valor característico de una acción permanente.

P : Valor representativo de la acción de pretensado.

$Q_{k,1}$: Valor característico de una acción variable dominante.

$\Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$: Valores de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante.

Por lo tanto se realizarán tantas combinaciones como cargas variables existan, considerando en cada combinación una acción variable como dominante diferente.

Situaciones accidentales. Se producen cuando hay explosiones, choques de vehículos contra la estructura o situaciones sísmicas

Caso de sismo:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \gamma_P \cdot P + \gamma_A \cdot A_k + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

siendo:

$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$: Valores cuasipermanentes de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante y la acción de sismo

A_k : Valor característico de la acción accidental

Todas las acciones variables concomitantes se tendrán en cuenta con su valor cuasipermanente.

Situación accidental sin sismo:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \gamma_P \cdot P + \gamma_A \cdot A_k + \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{1,i} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

siendo:

$\Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$: Valor frecuente de la acción variable dominante.

$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$: Valores cuasipermanentes de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante y la acción accidental

A_k : Valor característico de la acción accidental

La tabla 28 muestra los coeficientes de ponderación γ_F .

TIPO DE ACCIÓN		SITUACIONES PERSISTENTES Y TRANSITORIAS		SITUACIONES ACCIDENTALES	
		Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Comprobación de la estructura, de un elemento ó de una unión	PERMANENTE	$\gamma_G=0.8$	$\gamma_G=1.35$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Pretensado efecto global	$\gamma_P=0.9$	$\gamma_P=1.2$	$\gamma_P=1.0$	$\gamma_P=1.0$
	Pretensado efecto local	$\gamma_P=0.9$	$\gamma_P=1.50$	$\gamma_P=1.0$	$\gamma_P=1.0$
	Peso del terreno	$\gamma_G=0.80$	$\gamma_G=1.35$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Empuje del terreno	$\gamma_G=0.7$	$\gamma_G=1.35$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Presión de agua	$\gamma_G=0.9$	$\gamma_G=1.20$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	VARIABLE	$\gamma_Q=0$	$\gamma_Q=1.50$	$\gamma_Q=0.0$	$\gamma_Q=1.0$
Estabilidad del conjunto	PERMANENTE	$\gamma_G=0.90$	$\gamma_G=1.10$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Pretensado efecto global	$\gamma_P=0.95$	$\gamma_P=1.1$	$\gamma_P=1.0$	$\gamma_P=1.0$
	Peso del terreno	$\gamma_G=0.90$	$\gamma_G=1.1$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Empuje del terreno	$\gamma_G=0.8$	$\gamma_G=1.35$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
	Presión de agua	$\gamma_G=0.95$	$\gamma_G=1.05$	$\gamma_G=1.0$	$\gamma_G=1.0$
VARIABLE	$\gamma_Q=0$	$\gamma_Q=1.50$	$\gamma_Q=0.0$	$\gamma_Q=1.0$	

Tabla 28. Coeficientes de ponderación de acciones

En la tabla se han marcado en negrita los coeficientes más importantes 1.35 para permanentes, 1.50 para variables y 1 para accidentales.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de simultaneidad, Ψ :

ACCIÓN CONCOMITANTE	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Sobrecargas de uso			
Zonas residenciales	0.7	0.5	0.3
Zonas de reunión	0.7	0.5	0.3
Zonas comerciales	0.7	0.7	0.6
Zonas de uso industrial o almacenamiento	0.7	0.7	0.6
Zonas de tráfico y de aparcamiento (Categoría E)	1.0	0.9	0.8
Zonas de tráfico y de aparcamiento (Categoría F)			
Vehículos ligeros con un peso total menor de 30kN	0.7	0.7	0.6
Vehículos ligeros con un peso total entre 30kN y 160kN	0.7	0.5	0.3
Cubiertas transitables (Categoría G)	Según uso		
Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría H)	0	0	0
Nieve			
Altitudes >1000m	0.7	0.5	0.2
Altitudes < 1000m	0.5	0.2	0
Viento	0.6	0.2	0
Temperatura	0.6	0.5	0
Acciones variables del terreno	0		0.7

Tabla 29. Coeficientes de simultaneidad de acciones

4.7.2.2 Estados límite de servicio

En estados límite de servicio sólo se consideran las situaciones persistentes y transitorias, excluyéndose las accidentales. Las combinaciones se realizarán según los siguientes criterios:

- Combinación característica (poco probable):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación frecuente:

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + P + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Combinación casi-permanente:

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

En estructuras de edificación, para las distintas situaciones de proyecto, podrán considerarse las siguientes combinaciones de forma simplificada:

- Combinación característica (poco probable):

Caso de una sola acción variable.

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + Q_{k,1} \text{ (Esta combinación se realizará para todas las cargas variables una a una)}$$

Caso de dos o más acciones variables.

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + 0.9 \cdot \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

- Combinación cuasipermanente:

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + 0.6 \cdot \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

La siguiente tabla muestra las combinaciones que se realizan en estado límite último para el caso del ejemplo que estamos estudiando (caso sin puente grúa).

COMBINACIONES E.L.U
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 1 * 1.5
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 1 * 1.5
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 2 * 1.5
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 2 * 1.5
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 3 * 1.5
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 3 * 1.5
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 3 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 3 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 4 * 1.5
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 4 * 1.5
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 4 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 4 * 1.5 * 0.7
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + TEMPERATURA * 1.35
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + TEMPERATURA * 1.35
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 0.7 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 1 * 1.5 * 0.7 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 0.7 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. NIEVE * 1.5 * 1 + C. VIENTO 2 * 1.5 * 0.7 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. VIENTO 3 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6
PESO PROPIO * 0.8 + C. PERMANENTES * 0.8 + C. VIENTO 3 * 1.5 * 1 + TEMPERATURA * 1.35 * 0.6

Tabla 30. Combinaciones en Estado Límite Último

4.8 Contraste de Resultados

Con el fin de validar los resultados obtenidos por el optimizador de pórticos en viga armada, se ha realizado una comparación con los obtenidos con el programa de elementos finitos ANSYS.

La estructura de comparación ha sido la que figura en el apartado 4 de esta tesis como caso 4. Se trata de un pórtico de 80m de luz y 10m de altura, pendiente de la cubierta 10% y separación de pórticos 8m (ver siguiente figura).

La cantonera (zona variable del dintel). Tiene una longitud de 16.08m (medida en verdadera magnitud).

El resultado del dimensionamiento es:

- Pilar de inercia variable. Alas de 416x12, alma variable de canto mínimo 416 y canto máximo 1500. $t_w=1.2$.
- Cantoneras de inercia variable. Alas de 500x30, alma variable de canto mínimo 1000 y canto máximo 2000. $t_w=1.2$.
- Dintel: Parte constante. 300x15; 1000*8.

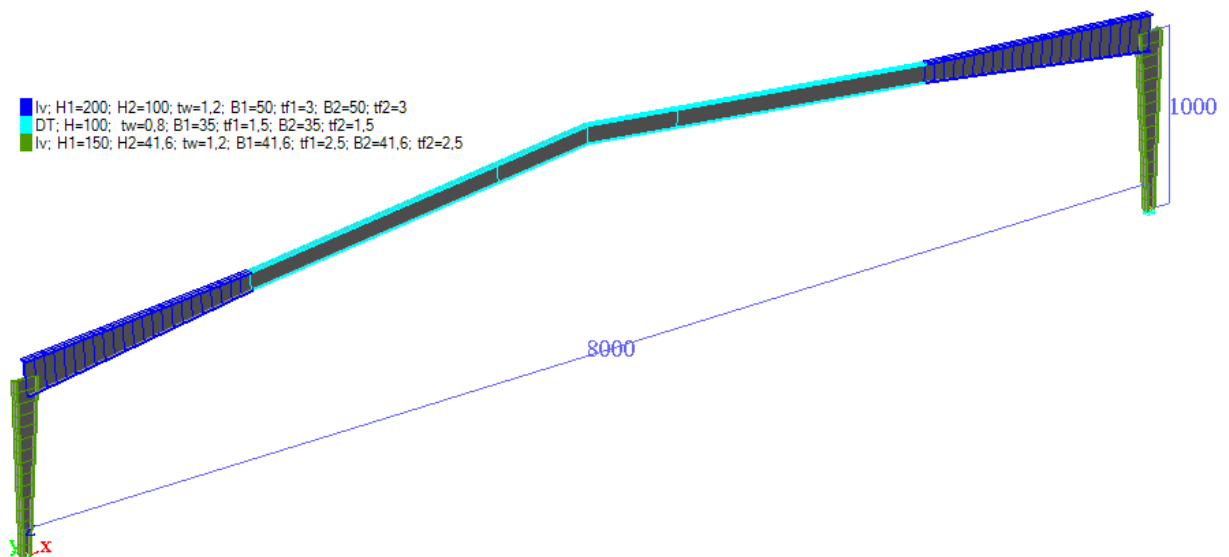


Figura 68. Pórtico resultante del algoritmo de optimización. Usado para comparación de resultados con ANSYS

Las bases son articuladas. No tienen rigidez adicional.

La medición por espesores nos indica un peso de 24194kg.

Espesor de chapa[mm]	Peso[daN]	Superficie[m ²]
30	7573.586268	64.96239601
12	6349.024158	134.7988144
15	3976.132791	68.21051582
8	3029.434507	96.47880596
25	3265.6	33.6128
TOTALES	24193.77772	398.0633322

Tabla 32. Tabla de mediciones del pórtico de Comparación

El máximo nivel de aprovechamiento, en estado límite último, se da en la parte superior del pilar para la combinación de cargas permanentes más la sobrecarga de nieve. La siguiente figura muestra un detalle de la comprobación en dicho punto. El aprovechamiento máximo se da en un 93% por el momento flector y en un 7% debido al esfuerzo axil. La composición resultante da el 100% de aprovechamiento de la barra.

The screenshot shows a software window titled "COMPROBACIÓN DETALLADA: C:\Users\javie_000\Desktop\DATOS\JAVIER\DOCTORADO\TESIS\PORTICO JUANJO_rev1.txt". The interface is divided into several sections:

- Forces Table:** A table with columns for force type (n, Vy, Vz, mx, my, mz, U), units, and values for 'Inicio', 'Fin', and 'Máximo/Mínimo'. The 'Máximo/Mínimo' column shows a value of 1 for the selected stress σ .
- Section Properties:** Parameters for the bar (Barra= 51, longitud= 66.6666666666667, $\beta = 0^\circ$) and section (Sección Iv; H1=150; H2=142.8; tw=1.2; B1=41.6; tf1=2.5; B2=41.6; tf2=2.5). It also shows material properties like f_{yk} and γ_{m0} .
- Check Results:**
 - COMPROBACIÓN DE LA SECCIÓN:** Shows limits for elastic reduction and various coefficients (e.g., $k_{yy} = 0.9$, $k_{zz} = 0.94$).
 - COMPROBACIÓN DE PANDEO LATERAL:** Shows $Mcr = 1657516768.13$ and $X_{lt} = 1$.
 - COMPROBACIÓN DE ABOLLADURA DEL ALMA:** Shows $kt = 5.34$ and $\lambda_{b,d,media} = 1.54$.
- Design and Load:** Shows the design load combination: "PESO PROPIO * 1.35 + C. PERMANENTES * 1.35 + C. NIEVE * 1.5".
- Redistribution:** A section for "Redistribución LOCAL de momentos" with input fields for percentages at nodes i and j.

Figura 69. Comprobación detallada de la barra situada en la parte superior del pilar

La siguiente figura muestra, mediante un gráfico de colores, los ratios de aprovechamiento de los perfiles.

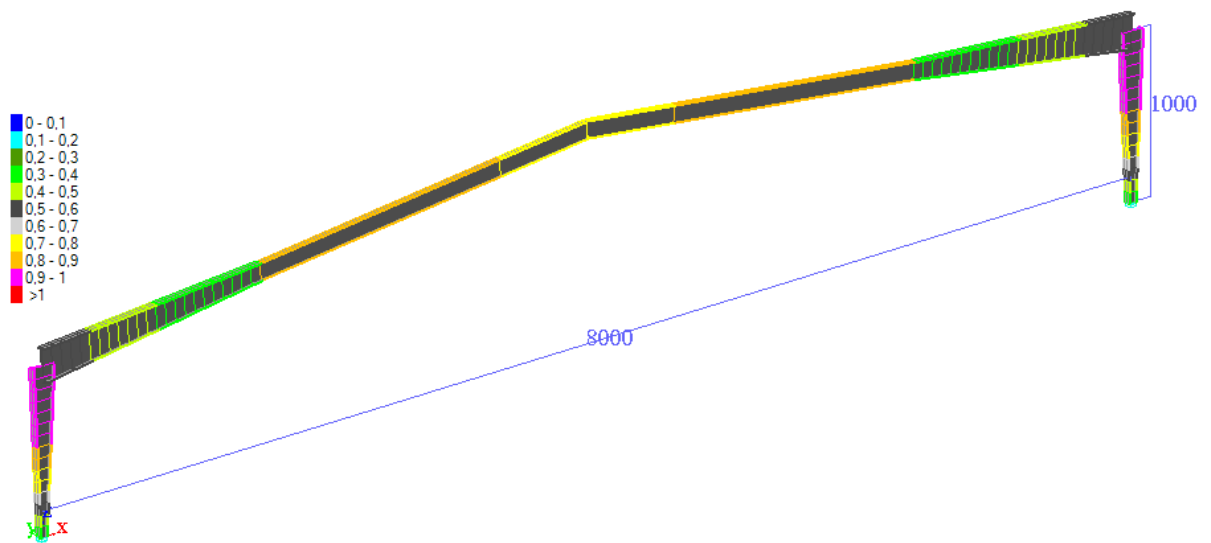


Figura 70. Representación, por colores, del aprovechamiento de barras en el pórtico de comparación

A continuación se reflejan, en centímetros, los desplazamientos máximos en dirección vertical. Alcanzándose un máximo de 31.33cm.

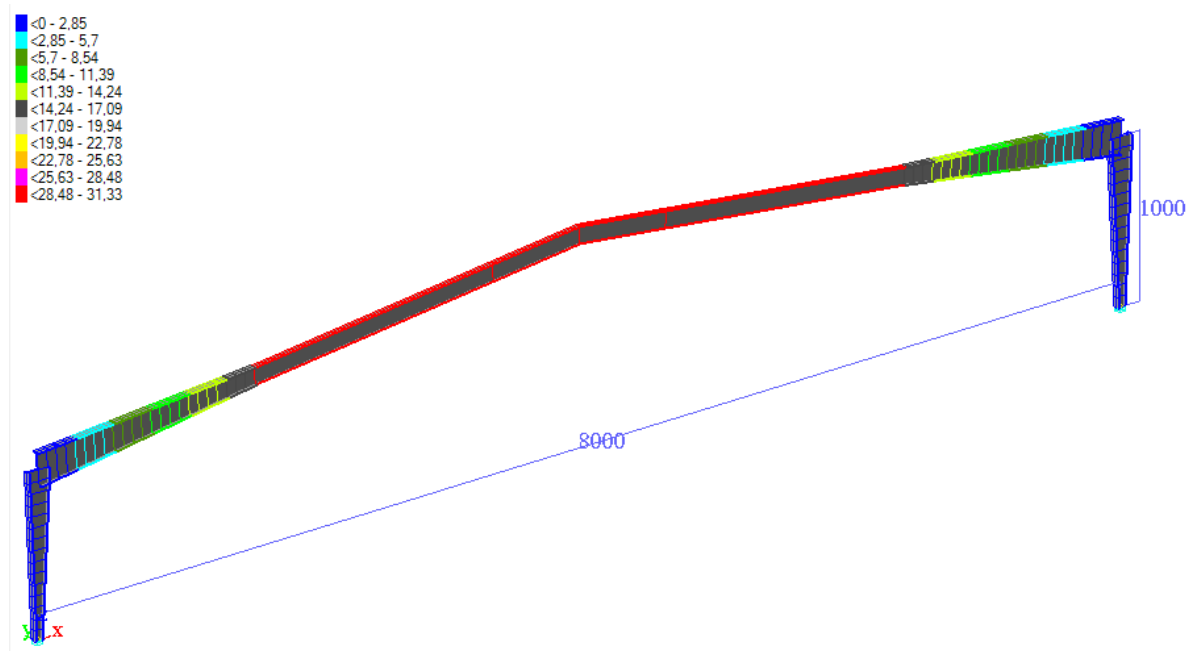


Figura 71. Representación, por colores, de desplazamientos verticales del pórtico de comparación

En ANSYS se ha realizado una modelización de la geometría del pórtico mediante elementos tipo Shell, particularmente se ha usado el elemento shell181, con un total de 20703 elementos, obteniéndose los siguientes resultados:

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2
Model (A4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	D:\usuarios\roxana\PORTICO\portico_4_files\dp0\SYSDM\SYSDM.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	80.417 m
Length Y	13.992 m
Length Z	0.5 m
Properties	
Volume	3.143 m ³
Mass	24673 kg

Surface Area(approx.)	189.92 m ²
Statistics	
Nodes	21674
Elements	20703
Mesh Metric	None

Tabla 33. Entrada de datos en ANSYS

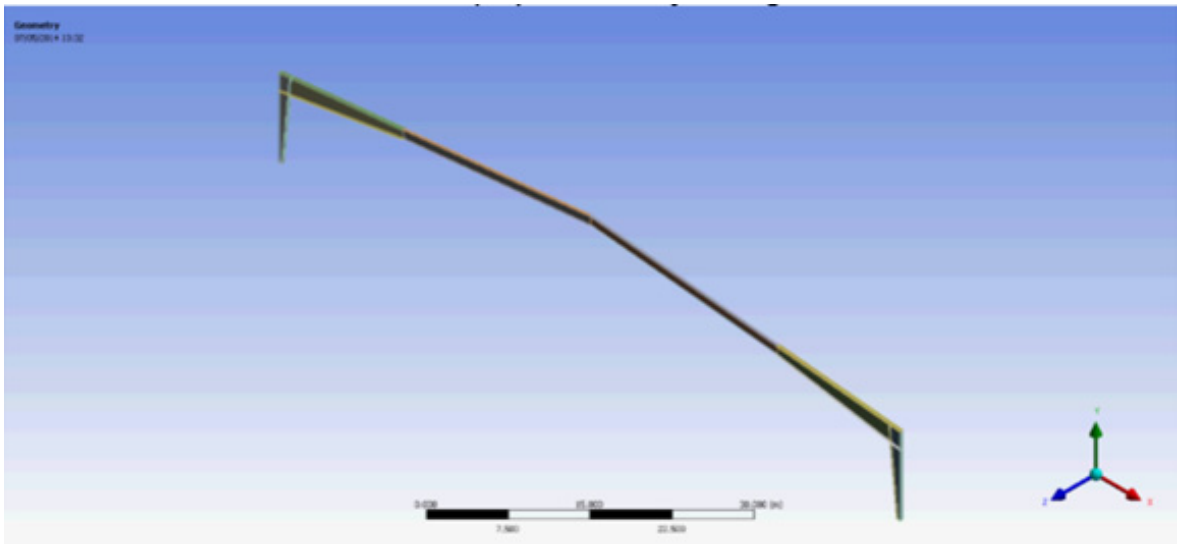


Figura 72. Geometría introducida en ANSYS

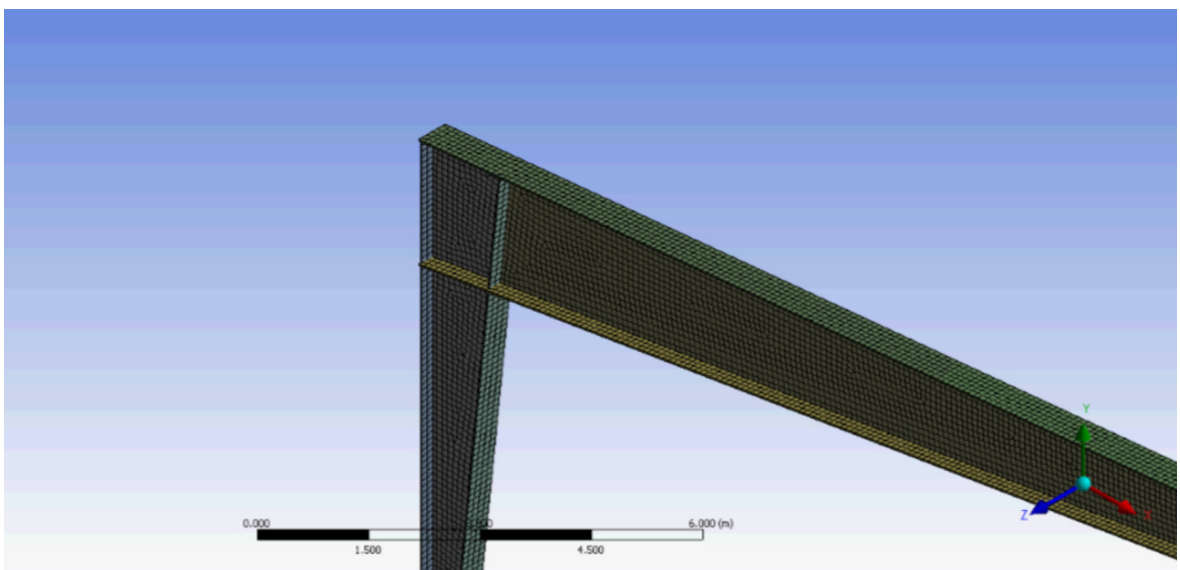


Figura 73. Esquema de densidad de Malla

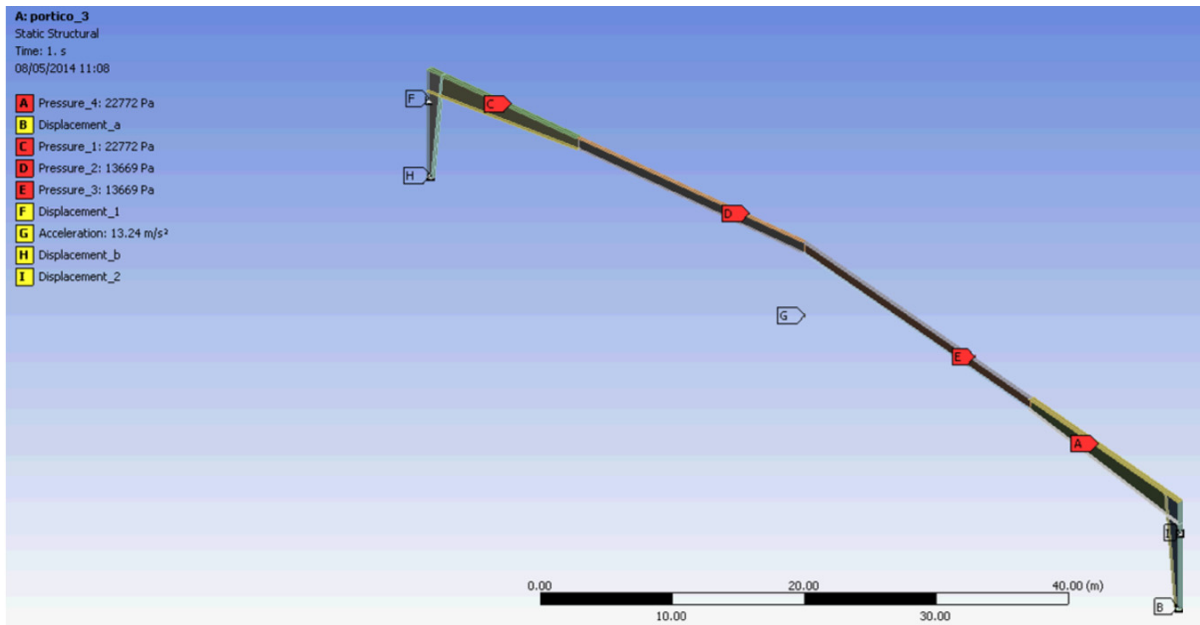


Figura 74. Representación de cargas

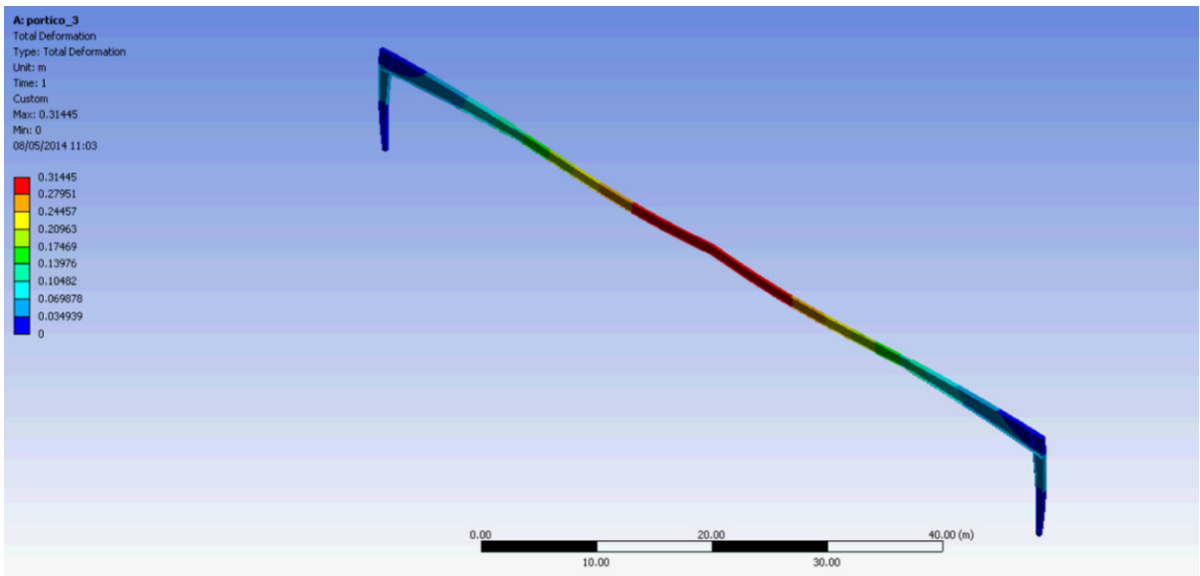


Figura 75. Deformada obtenida en ANSYS

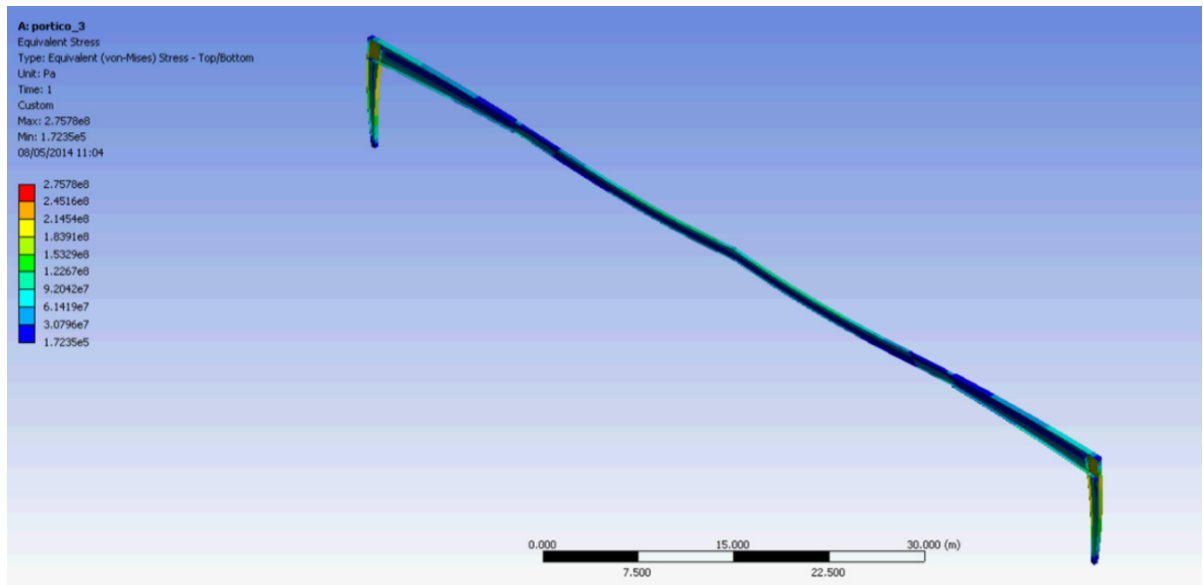


Figura 76. Representación de tensiones en ANSYS

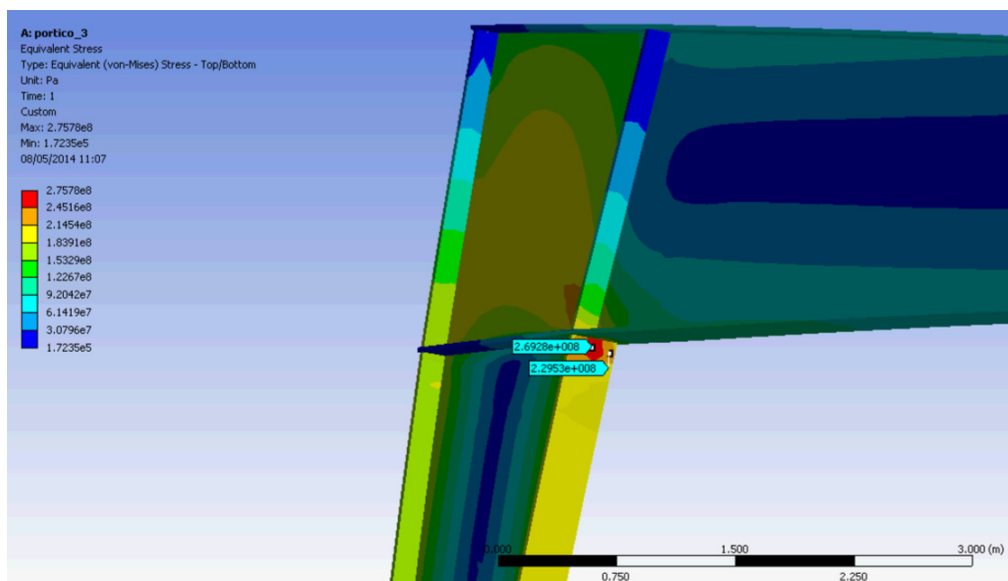


Figura 77. Detalle de tensiones en ANSYS

La siguiente tabla refleja el resumen comparativo de los datos más importantes.

	PESO[kg]	Desplazamiento[cm]	Aprovechamiento
ELASTIK	24194	31.33	1
ANSYS	24673	31.445	0.98
Diferencia[%]	-1.94%	-0.37%	2.04%

Tabla 34. Comparativa de resultados ANSYS frente a Resultados obtenidos con el algoritmo de optimización

- El peso en el modelo de ANSYS es ligeramente mayor debido a la modelización de los rigidizadores en prolongación de alas, como se puede ver en la figura anterior.
- El desplazamiento en ambos casos es casi exacto con una diferencia de 0.37%.
- Las tensiones son ligeramente mayores en ELASTIK que en ANSYS debido a la consideración del pandeo en ELASTIK. Como se puede ver en la siguiente imagen, el efecto del coeficiente de pandeo aumenta las tensiones debidas al axil.

```

COMPROBACIÓN DE LA SECCIÓN[kg][cm]
lv; H1=150; H2=142,8; tw=1,2; B1=41,6; tf1=2,5; B2=41,6; tf2=2,5 Clase
sección 4; Curva pandeo y-y=b; Curva pandeo z-z=c
Límite elástico reducido por cortante= 2803
Coef. pandeo por compresión eje fuerte. Xy= 1
Coef. pandeo por compresión eje débil. Xz= 0,6
Coef. simultaneidad kyy= 0,9
Coef. simultaneidad kzz= 0,94
Coef. simultaneidad kyz= 0,94
Coef. simultaneidad kzy= 0,72
Coef. de reducción de área bruta por clase 4= 0,95
Coef. de reducción de área a cortante Ay por clase 4= 1
Coef. de reducción de área a cortante Az por clase 4= 0,89
Coef. de reducción de Wx por clase 4= 0,99
Coef. de reducción de Wy por clase 4= 1
Ned= -40887,09
Nc,rd=X* $\tau$ *A*A*fy/g= 0,6 * 0,95 * 383,66 * 2803 / 1,05 = 585138,55
Ned/Nc,rd= 0,07
Myed= 49021674,76
Myrd= 52896538,96
Myed/Myrd= 0,93
Mzed= 0
Mzrd=W $\tau$ ffz*fy/g=W $\tau$ elz* $\tau$ W $\tau$ elz*fy/g= 1442,13 * 1 * 2803 / 1,05 =
3849809,27
Mzed/Mzrd= 0
    
```

Figura 78. Aprovechamiento debido a carga axil

- Si aislamos el efecto del pandeo, para comparar exactamente con el mismo modelo de ANSYS,

tendríamos un efecto debido al axil de
$$\frac{N_{sd}}{N_{rd}} = \frac{40887.09}{0.95 \cdot 383.66 \cdot \frac{2803}{1.05}} = 0.042$$
, en lugar de 0.07.

Con lo que sumando los efectos debidos al axil y los debidos al momento, se obtiene $0.042+0.93=0.972$. Este resultado es casi idéntico al 0.98 obtenido en ANSYS. Por lo tanto, habrá entre ambos casos una diferencia en tensiones del 0.8%, incluyendo el efecto de la clase 4.

COMPARATIVA RESULTADOS		
	Desplazamiento[cm]	Tensiones
ELASTIK	31.33	0.972
ANSYS	31.445	0.98
Diferencia[%]	-0.37%	-0.82%

Tabla 35. Comparativa de resultados ANSYS frente a Resultados obtenidos con algoritmo de optimización descontando el efecto del pandeo

Teniendo en cuenta que existen evidentes diferencias matemáticas en la concepción de los dos modelos y considerando los inevitables errores numéricos al obtener la solución, podemos concluir que los resultados obtenidos por ELASTIK son plenamente concordantes con los obtenidos según el modelo de elementos finitos realizado en ANSYS.

5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A DIFERENTES CASOS REALES

Caso 1. Nave de 32m de luz, 14m de altura al alero, puente grúa de 20Tm. Ubicación en Bilbao.

Tiempo de entrada de datos: 30 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 1min. 28 segundos.

GEOMETRÍA DE NAVE
Número de crujías= 1 Sep. de pórticos[m]= 10.5 Resolver Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1 Luz[m]= 32 Altura al alero[m]= 14 Pendiente[%]= 10
CRUJIA 2 Luz[m]= 26 Altura al alero[m]= 8 Pendiente[%]= 10
CRUJIA 3 Luz[m]= 26 Altura al alero[m]= 8 Pendiente[%]= 10
CRUJIA 4 Luz[m]= 26 Altura al alero[m]= 8 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 No Sí
PUENTE GRÚA 2 No Sí
PUENTE GRÚA 1 No Sí
PUENTE GRÚA 2 No Sí
PUENTE GRÚA 1 No Sí
PUENTE GRÚA 2 No Sí
PUENTE GRÚA 1 No Sí
PUENTE GRÚA 2 No Sí

Pilar de peto Pilar de peto Pilar 1 A E Pilar de peto Pilar 1 A E Pilar de peto Pilar 1 A E

ESTRUCTURA METÁLICA
Materiales S275
fyk[kg/cm2] 2803 $\gamma_{m0} = 1.05$
Pilares tipo DT
Vigas tipo DT
Den. flecha Vert. 250
Den. flecha H Sin PG 150
Den. flecha H Con PG 300

CARGAS
Permanentes
Peso cubierta[Nw/m2]= 200 $\gamma_g = 1.35$
Variables
Nieve[Nw/m2]= 400 Cargas climáticas
Carga térmica [°C]= 20
Consideraciones de la carga de Viento
 CTE Edificio abierto Vel.V[m/s2]= 29
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 4
Cp= 0.73 Cs= 0.35 qb[N/m2]= 525.63 Ce= 2.02

PANDEO
Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9
Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7
Longitud de pandeo lateral[cm]= 170
TIPO DE PÓRTECO
 dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESULTADOS
Máximo aprovechamiento: 0.99
Máximo Den. Flecha vertical: 278.65
Máximo Den. Flecha horizontal: 334.59
Máximo Den. Flecha horizontal en ménsula: 298.56
Peso portico condicionado por ELLU: 7517.35
Peso portico condicionado por ELS: 7517.35
Peso portico por m2: 22.37
Superficie de pintura m2: 179.87
kg/m2: 41.79

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
nº=
Nombre=
Fecha 30/11/2013

Figura 79. Entrada de datos Caso 1

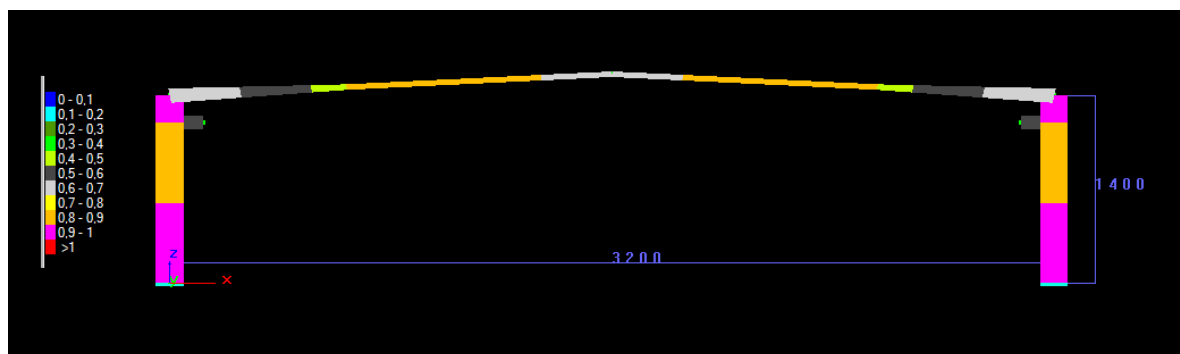


Figura 80. Aprovechamiento de perfiles Caso 1

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.99	1
Den Flecha vertical	278	250
Den. Flecha Horizontal	334	150
Den. Flecha en ménsula	299	300

Tabla 36. Resultados caso 1

Caso 2. Nave de 30m de luz, 8.5m de altura al alero. Ubicación en Avilés.

Con apoyos articulados debido a que apoya en muros de hormigón que son utilizados de muros de contención para almacenamiento de mineral.

Tiempo de entrada de datos: 29 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 45 segundos.

The screenshot shows the input data for Case 2. Key parameters include:

- GEOMETRÍA DE NAVE:** 4 bays with spans of 30m, 26m, 26m, and 26m, and a height of 8.5m. All bays have a 10% slope.
- ESTRUCTURA METÁLICA:** Material S275, yield strength $f_{yk} = 2803$ kg/cm², and partial factor $\gamma_{m0} = 1.05$.
- CARGAS:** Permanent load 200 Nw/m², snow load 400 Nw/m², and wind load 4 directions.
- PANDEO:** Coefficient of lateral displacement 0.9.
- RESULTADOS:** Maximum utilization 0.52, maximum vertical deflection 516.1, and maximum horizontal deflection 220.31.

Figura 81. Entrada de datos Caso 2

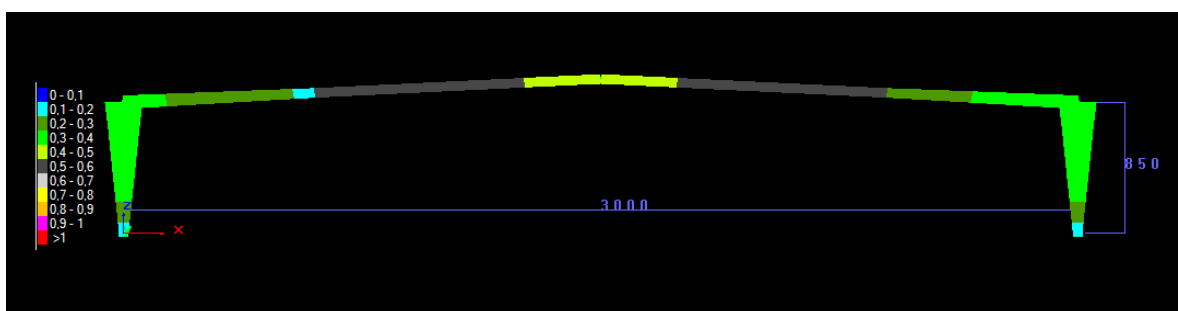


Figura 82. Aprovechamiento de perfiles Caso 2

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.52	1
Den Flecha vertical	516	250
Den. Flecha Horizontal	220	150

Tabla 37. Resultados Caso 2

Para poder cumplir con los para cumplir con los ELS, el peso del pórtico se ve incrementado en un 72% frente al dimensionamiento que tendría si solo se cumpliese con ELU.

En el siguiente ejemplo hemos cambiado los límites de los estados límites de servicio con el fin de comprobar el dimensionamiento frente a estados límites últimos.

El tiempo de cálculo y optimización es de 5 segundos.

The screenshot shows a software interface for structural analysis. Key sections include:

- GEOMETRIA DE NAVE:** Número de crujeas = 1, Sep. de pórticos[m] = 10, Resolución: Resolver.
- CRUJIA 1-4:** Luz[m] = 30, 26, 26, 26; Altura al alero[m] = 8.5, 8, 8, 8; Pendiente[%] = 10.
- ESTRUCTURA METÁLICA:** Materiales: S275; f_{yk} [kg/cm²] = 2803; γ_{m0} = 1.05.
- CARGAS:** Peso cubierta [Nw/m²] = 200; γ_g = 1.35; Variables: Nieve [Nw/m²] = 400; Carga térmica [°C] = 20.
- PANDEO:** Coeficiente de pandeo eje fuerte = 0.9; Coeficiente de pandeo eje débil = 0.7; Longitud de pandeo lateral [cm] = 170.
- RESULTADOS:** Máximo aprovechamiento = 0.99; Máximo Den. Flecha vertical = 190.04; Máximo Den. Flecha horizontal = 76.76.

Figura 83. Nueva entra de datos Caso 2

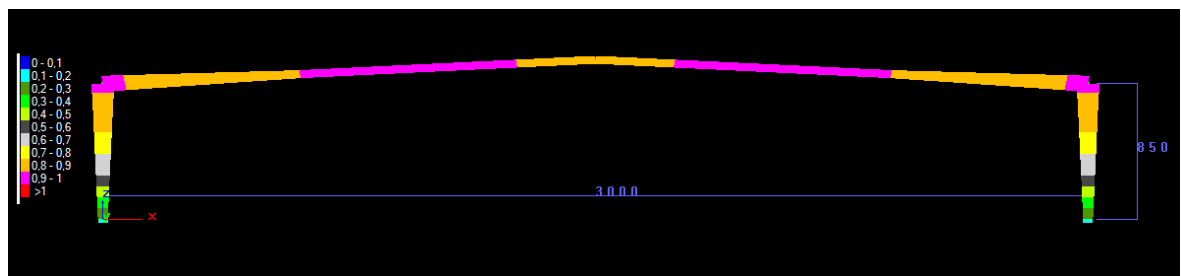


Figura 84. Nuevo aprovechamiento de perfiles Caso 2

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.99	1
Den Flecha vertical	190	50
Den. Flecha Horizontal	76	50

Tabla 38. Nuevos resultados caso 2

Efectivamente se obtiene un aprovechamiento del 99%. En el diagrama de colores se ve como tanto dinteles como cabeza de pilares están por encima del 90% de aprovechamiento.

Caso 3. Nave de 26m de luz, 8m de altura al alero. Ubicación en Ponferrada.

Con el fin de ver el dimensionamiento frente a E.L.U, reducimos los límites de flecha.

The screenshot shows a software interface for structural design. Key sections include:

- GEOMETRÍA DE NAVE:** Configuration for four spans (CRUJIA 1-4) with parameters like span length (Luz[m]=26), eave height (Altura al alero[m]=8), and slope (Pendiente[%]=10).
- ESTRUCTURA METÁLICA:** Material selection (S275), yield strength (fyk=2803), and safety factor (γm0=1.05).
- CARGAS:** Permanent load (Peso cubierta=200), wind load (Cargas climáticas), and snow load (Nieve=800).
- PANDEO:** Buckling coefficients (0.9, 0.7) and lateral displacement (170 cm).
- RESULTADOS:** Summary of results including maximum utilization (1), maximum vertical deflection (202.52), and maximum horizontal deflection (105.96).

Figura 85. Entrada de datos Caso 3

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	1	1
Den Flecha vertical	202	50
Den. Flecha Horizontal	106	50

Tabla 39. Resultados obtenidos Caso 3

Caso 4. Nave de 80m de luz, 10m de altura al alero. Ubicación en Avilés.

Tiempo de cálculo y optimización: 9 segundos.

PÓRTICOS METÁLICOS

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujas= 1 Sep. de pórticos[m]= 3 Resolver Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1 CRUJIA 2 CRUJIA 3 CRUJIA 4

Luz[m]= 80 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 10 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 PUENTE GRÚA 2 PUENTE GRÚA 1 PUENTE GRÚA 2 PUENTE GRÚA 1 PUENTE GRÚA 2 PUENTE GRÚA 1 PUENTE GRÚA 2

No Sí No Sí No Sí No Sí No Sí No Sí

Pilar 1 Pilar 1 Pilar 1

A E A E A E

ESTRUCTURA METÁLICA CARGAS TIPO DE PÓRTRICO RESULTADOS

Materiales: S275
 fy[kg/cm2]: 2803 $\gamma_{m0} = 1.05$
 Pilares tipo: DT Vigas tipo: DT
 Den. flecha Vert.: 250
 Den. flecha H Sin PG: 150
 Den. flecha H Con PG: 300
 nº de ciclos de cálculo: 5

Permanentes: Peso cubierta[Nw/m2]= 200
 Variables: Nieve[Nw/m2]= 400 Carga térmica [°C]= 20
 Consideraciones de la carga de Viento: Criterio escalon Vel.V[m/s2]= 29 Tipo de Entorno= 4
 Eurocódigo Ver gráfico qb[N/m2]= 525.63 Ce= 1.78
 Escalonamiento continuo Edificio abierto
 Cp= 0.7 Cs= 0.3 2 Vientos 4 Vientos

TIPO DE PÓRTRICO: dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESULTADOS: Máximo aprovechamiento: 1
 Máximo Den. Flecha vertical: 255,36
 Máximo Den. Flecha horizontal: 187,2
 Peso portico condicionado por ELU: 24193,78
 Peso portico condicionado por ELS: 24193,78
 Peso portico por m2: 37,8
 Superficie de pintura m2: 408,3
 kg/m2: 59,25

PANDEO: Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9
 Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7
 Longitud de pandeo lateral[cm]= 170

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA: nº= Fecha: 14/05/2014
 Nombre=

CRITERIOS DE DISEÑO

Figura 86. Entrada de datos Caso 4

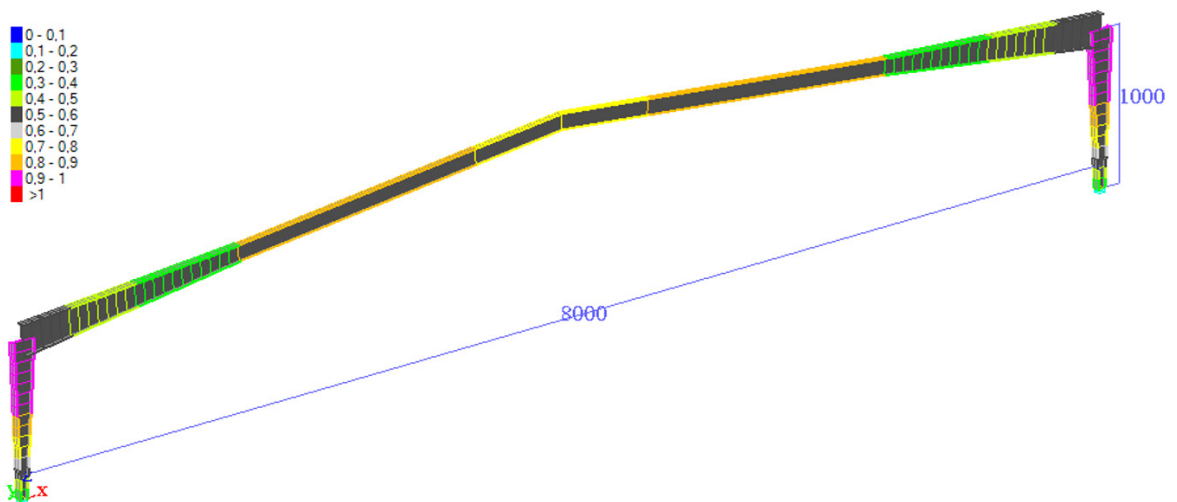


Figura 87. Aprovechamiento de perfiles Caso 4

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	1.02	1
Den Flecha vertical	255	250
Den. Flecha Horizontal	87	150

Tabla 40. Resultados Obtenidos Caso 4

Caso 5. Dos pórticos adosados, ubicados en Santander, 14,45m al alero, ambos con puente grúa de 20Tm.

Tiempo de entrada de datos: 40 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 2 minutos.

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujeas= 2 Sep. de pórticos[m]= 10 Resolver
 Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1
 Luz[m]= 25
 Altura al alero[m]= 14.45
 Pendiente[%]= 8

CRUJIA 2
 Luz[m]= 25
 Altura al alero[m]= 14.45
 Pendiente[%]= 8

CRUJIA 3
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

CRUJIA 4
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2**

No Sí No Sí No Sí No Sí No Sí No Sí No Sí

20 tm
 Altura[m]= 12.45
 Rmax[kg]= 13170
 Rmin[kg]= 6230
 Rf[kg]= 1317
 Sep. rued[m]= 5
 α = 1.52

Pilar de peto Pilar de peto **Pilar 1** A E Pilar de peto **Pilar 1** A E Pilar de peto **Pilar 1** A E

ESTRUCTURA METÁLICA
 Materiales
 S275
 fyk[kg/cm2] 2803
 γ_{m0} = 1.05
 Pilares tipo DT
 Vigas tipo DT
 Den. flecha Vert. 250
 Den. flecha H Sin PG 150
 Den. flecha H Con PG 300
 nº de ciclos de cálculo 5

CARGAS
 Permanentes
 Peso cubierta[Nw/m2]= 200 γ_g = 1.35
 Variables
 Nieve[Nw/m2]= 400 Cargas climáticas
 Carga térmica [°C]= 20
 Consideraciones de la carga de Viento
 CTE Edificio abierto Vel.V[m/s2]= 29
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 4
 Cp= 0.71 Cs= 0.31 qb[N/m2]= 525.63
 Ce= 2.02
 NBE q[kg/m2]= 50
 Edificación cerrada Considerar presión interior

PANDEO
 Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9
 Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7
 Longitud de pandeo lateral[cm]= 170

TIPO DE PÓRICO
 dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESULTADOS
 Máximo aprovechamiento: 0.98
 Máximo Den. Flecha vertical: 287.17
 Máximo Den. Flecha horizontal: 510.73
 Máximo Den. Flecha horizontal en ménsula: 355.36
 Peso portico condicionado por ELU: 8025.67
 Peso portico condicionado por ELS: 8025.67
 Peso portico por m2: 16.05
 Superficie de pintura m2: 240.88
 kg/m2: 33.32

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
 n°= Fecha 30/11/2013
 Nombre=

ACEPTAR CANCELAR

Figura 88. Entrada de Datos Caso 5

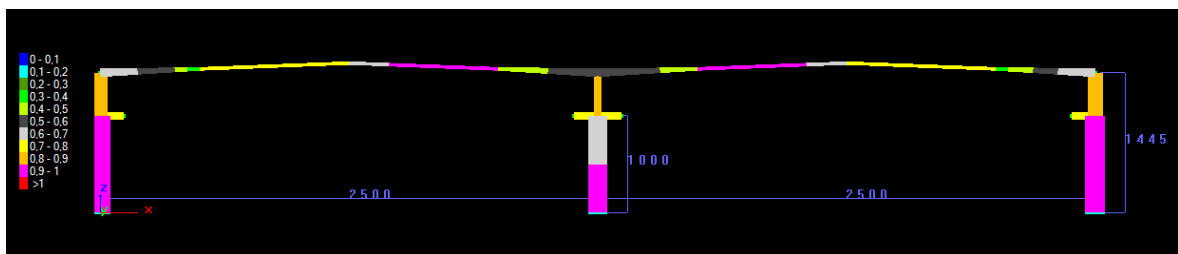


Figura 89. Aprovechamiento de perfiles Caso 5

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.98	1
Den Flecha vertical	287	250
Den. Flecha Horizontal	510	150
Den. Flecha en ménsula	355	300

Tabla 41. Resultados obtenidos Caso 5

Mismo pórtico que el anterior pero con cubierta a 2 aguas en vez de 4 aguas.

Figura 90. Entrada de datos, segunda opción, Caso 5

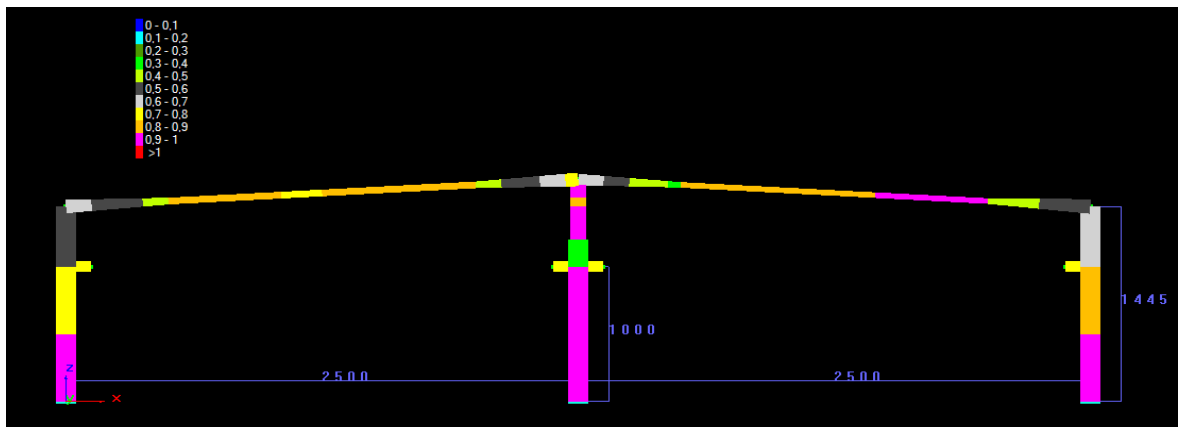


Figura 91. Aprovechamiento de perfiles, segunda opción, Caso 5

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.98	1
Den Flecha vertical	251	250
Den. Flecha Horizontal	565	150
Den. Flecha en ménsula	380	300

Tabla 42. Resultados obtenidos, segunda opción, Caso 5

Este ejemplo también revela como los pórticos con cumbrera central son más económicos que con dintel recto. En el caso en estudio se obtiene un 23% más de peso con cubierta a dos aguas frente a la solución de cubierta a 4 aguas. Bien es cierto que constructivamente la solución a 2 aguas presenta otro tipo de ahorros que no presenta la solución a 4 aguas, al eliminarse el canalón central, con todo lo que ello conlleva (ahorro de línea central de canalón, bajantes y saneamiento). A la hora de determinar la mejor solución constructiva general debe hacerse también una valoración conjunta de costes junto con la obra civil.

Caso 6. Pórtico en perfil laminado en caliente, ubicado en Gijón, 8m al alero, luz 22m y sin PG.

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujeas= 1 Sep. de pórticos[m]= 8 Resolver
 Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1 **CRUJIA 2** **CRUJIA 3** **CRUJIA 4**
 Luz[m]= 22 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2** **PUENTE GRÚA 1** **PUENTE GRÚA 2**
 No Si No Si No Si No Si No Si No Si No Si

ESTRUCTURA METÁLICA
 Materiales: S275
 fy[kg/cm²]: 2803 $\gamma_{m0} = 1.05$
 Pilares tipo: IPE Vigas tipo: IPE
 Den. flecha Vert.: 250
 Den. flecha H Sin PG: 150
 Den. flecha H Con PG: 300
 n° de ciclos de cálculo: 5

CARGAS
 Permanentes: Peso cubierta[Nw/m²]= 200 $\gamma_g = 1.35$
 Variables: Nieve[Nw/m²]= 400 Carga térmica [°C]= 20 Cargas climáticas
 Consideraciones de la carga de Viento:
 CTE Edificio abierto Vel.V[m/s²]= 29
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 4
 Cp= 0.72 Cs= 0.33 qb[N/m²]= 525.63 Ce= 1.63
 NBE q[kg/m²]= 50
 Edificación cerrada Considerar presión interior

PANDEO
 Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9
 Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7
 Longitud de pandeo lateral[cm]= 170

TIPO DE PÓRTICO
 dos aguas asimétrico Un agua
 Multiple de testero
 Cercha

RESULTADOS
 Máximo aprovechamiento: 0.86
 Máximo Den. Flecha vertical: 281.85
 Máximo Den. Flecha horizontal: 372.53
 Peso portico condicionado por ELS: 2165.46
 Peso portico condicionado por ELS: 2573.95
 Peso portico por m²: 14.62
 Superficie de pintura m²: 61.7
 kg/m²: 41.72

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
 n°= Fecha: 01/12/2013
 Nombre=

ACEPTAR CANCELAR

Figura 92. Entrada de datos Caso 6

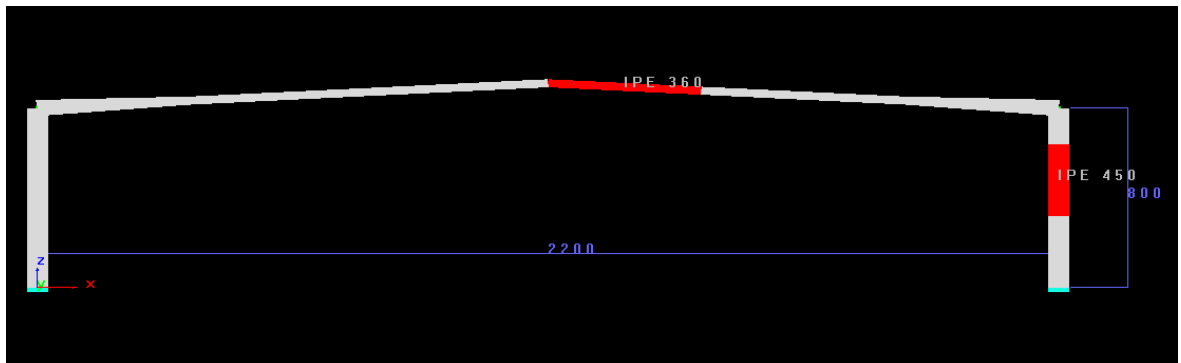


Figura 93. Perfiles Obtenidos Caso 6

La sección obtenida para el dintel es IPE360, para los pilares IPE450. Conforme a los costes analizados en el apartado 3.3.1.2.2, ese pórtico estaría en el umbral de rentabilidad de los pórticos fabricados con perfil abierto laminado en caliente.

Caso 7. Pórtico en perfil laminado en caliente, ubicado en Madrid, 8m al alero, luz 22m y sin PG

Figura 94. Entrada de Datos Caso 7

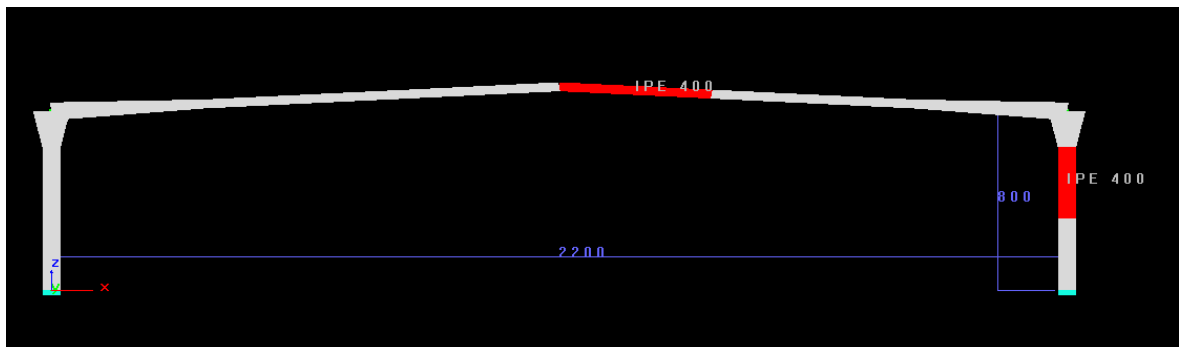


Figura 95. Perfiles Obtenidos Caso 7

Caso 8. Pórtico en viga armada, ubicado en Asturias, en entorno rural. 6.17m al alero, luz 30.55m, pendiente de la cubierta 25%

Tiempo de entrada de datos: 30 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 1min. 05 segundos.

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujiás= 1 Sep. de pórticos[m]= 8,65 Resolver Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1
 Luz[m]= 30,55
 Altura al alero[m]= 6,17
 Pendiente[%]= 25

CRUJIA 2
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

CRUJIA 3
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

CRUJIA 4
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

PUENTE GRÚA 1 No Sí

PUENTE GRÚA 2 No Sí

PUENTE GRÚA 1 No Sí

PUENTE GRÚA 2 No Sí

PUENTE GRÚA 1 No Sí

PUENTE GRÚA 2 No Sí

PUENTE GRÚA 1 No Sí

PUENTE GRÚA 2 No Sí

Pilar de peto Pilar de peto Pilar 1 A E

Pilar de peto Pilar 1 A E

Pilar de peto Pilar 1 A E

Pilar de peto Pilar 1 A E

ESTRUCTURA METÁLICA
 Materiales: S275
 fyk[kg/cm2]: 2803
 $\gamma_{m0} = 1,05$
 Pilares tipo: DT
 Vigas tipo: DT
 Den. flecha Vert.: 250
 Den. flecha H Sin PG: 100
 Den. flecha H Con PG: 300
 nº de ciclos de cálculo: 5

CARGAS
 Permanentes: Peso cubierta[Nw/m2]= 250 $\gamma_g = 1,35$
 Variables: Nieve[Nw/m2]= 472,4 Cargas climáticas
 Carga térmica [°C]= 20
 Consideraciones de la carga de Viento:
 CTE Edificio abierto Vel.V[m/s2]= 29
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 3
 Cp= 0,7 Cs= 0,3 qb[N/m2]= 525,63 Ce= 2,04
 NBE q[kg/m2]= 50
 Edificación cerrada Considerar presión interior

PANDEO
 Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0,9
 Coeficiente de pandeo eje débil= 0,7
 Longitud de pandeo latera[cm]= 170

TIPO DE PÓRTICO
 dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESULTADOS
 Máximo aprovechamiento: 0,97
 Máximo Den. Flecha vertical: 291,4
 Máximo Den. Flecha horizontal: 110,79
 Peso portico condicionado por ELU: 3034,41
 Peso portico condicionado por ELS: 3034,41
 Peso portico por m2: 11,48
 Superficie de pintura m2: 90,26
 kg/m2: 33,62

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
 n°=
 Nombre= Fecha: 19/12/2013

CRITERIOS DE DISEÑO

Figura 96. Entrada de Datos Caso 8

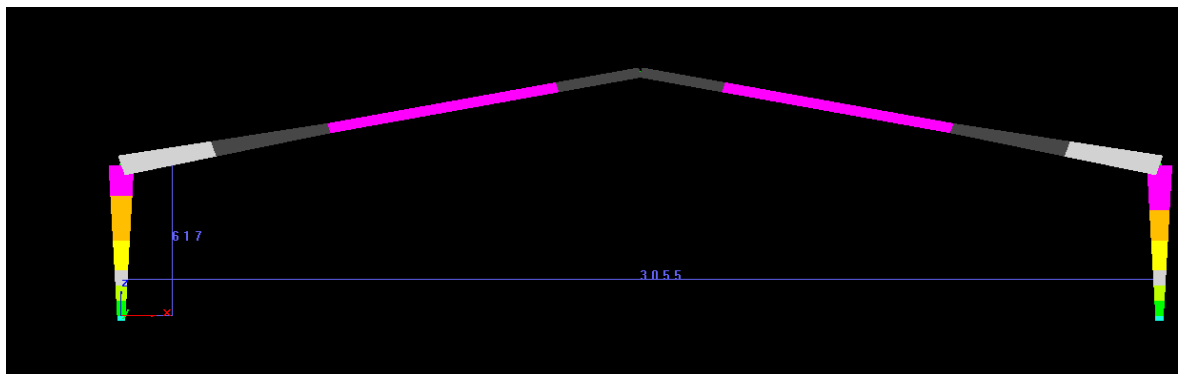


Figura 97. Aprovechamiento de Perfiles Caso 8

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.97	1
Den Flecha vertical	291.4	250
Den. Flecha Horizontal	110.79	100
Den. Flecha en ménsula	N.A	300

Tabla 43. Resultados Obtenidos Caso 8

Caso 9. Dos Pórticos adosados en viga armada, ubicado en Gran canaria, en entorno rural. 10.60m al alero, luz 36.876m, pendiente de la cubierta 8%

Tiempo de entrada de datos: 30 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 57 segundos.

GEOMETRÍA DE NAVE
 Número de crujeas= 2 Sep. de pórticos[m]= 6.75 Resolver Soldadura a 2 caras Selección automática de apoyos

CRUJIA 1
 Luz[m]= 36.876
 Altura al alero[m]= 10.6
 Pendiente[%]= 8

CRUJIA 2
 Luz[m]= 36.876
 Altura al alero[m]= 10.6
 Pendiente[%]= 8

CRUJIA 3
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

CRUJIA 4
 Luz[m]= 26
 Altura al alero[m]= 8
 Pendiente[%]= 10

ESTRUCTURA METÁLICA
 Materiales: S275
 fyk[kg/cm2]: 2803
 $\gamma_{m0} = 1.05$
 Pilares tipo: DT
 Vigas tipo: DT
 Den. flecha Vert.: 250
 Den. flecha H Sin PG: 100
 Den. flecha H Con PG: 300
 nº de ciclos de cálculo: 5

CARGAS
 Permanentes: Peso cubierta[Nw/m2]= 250 $\gamma_g = 1.35$
 Variables: Nieve[Nw/m2]= 400 Carga térmica [°C]= 20
 Consideraciones de la carga de Viento:
 CTE Edificio abierto Vel V[m/s2]= 29
 2 Vientos 4 Vientos Tipo de Entorno= 2
 Cp= 0.7 Cs= 0.3 qb[N/m2]= 525.63 Ce= 2.78
 NBE q[kg/m2]= 50
 Edificación cerrada Considerar presión interior

PANDEO
 Coeficiente de pandeo eje fuerte= 0.9
 Coeficiente de pandeo eje débil= 0.7
 Longitud de pandeo latera[cm]= 170
 TIPO DE PÓRTICO:
 dos aguas asimétrico Un agua
 Múltiple de testero
 Cercha

RESULTADOS
 Máximo aprovechamiento: 0.99
 Máximo Den. flecha vertical: 254.09
 Máximo Den. flecha horizontal: 441.3
 Peso portico condicionado por E.L.U.: 8362.69
 Peso portico condicionado por E.L.S.: 8362.69
 Peso portico por m2: 16.8
 Superficie de pintura m2: 236.77
 kg/m2: 35.32

CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA
 n°= Fecha: 30/12/2013
 Nombre=

ACEPTAR CANCELAR

Figura 98. Entrada de Datos Caso 9

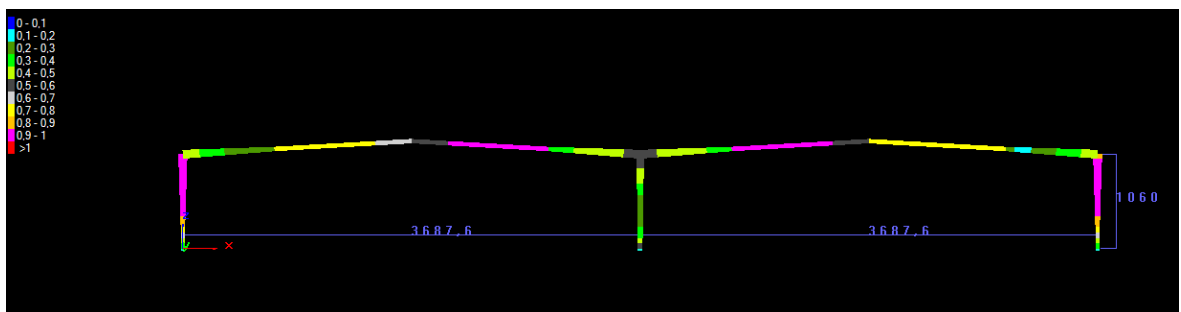


Figura 99. Aprovechamiento de Perfiles Caso 9

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.99	1
Den Flecha vertical	254	250
Den. Flecha Horizontal	441	100
Den. Flecha en ménsula	N.A	300

Tabla 44. Resultados obtenidos Caso 9

Caso 10. Pórtico a un agua en viga armada, ubicado en Rubiana (León), en entorno industrial 9.0m al alero, luz 32m, pendiente de la cubierta 10%

Tiempo de entrada de datos: 30 segundos. Tiempo de cálculo y optimización: 27 segundos.

Figura 100. Entrada de Datos Caso 10

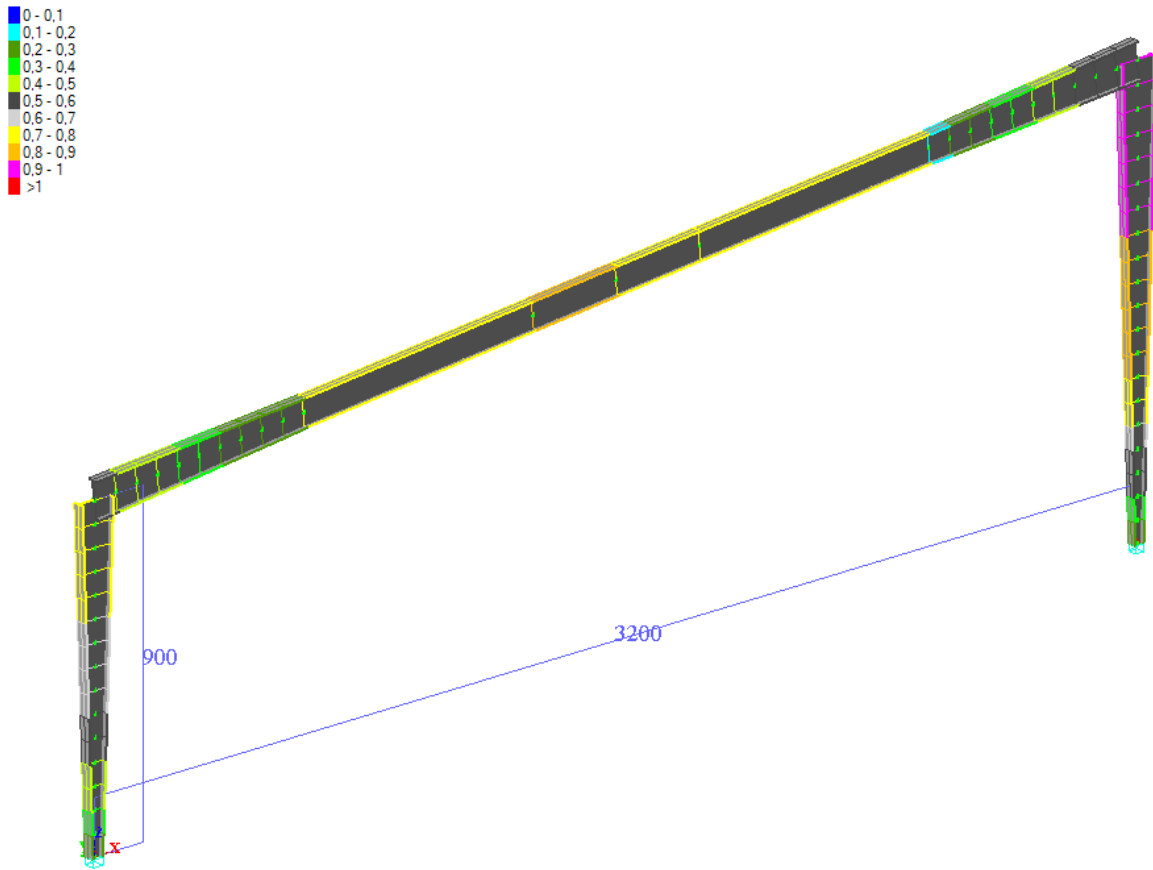


Figura 101. Aprovechamiento de Perfiles Caso 10

	OBTENIDO	LIMITES
Aprovechamiento en E.L.U	0.96	1
Den Flecha vertical	256	250
Den. Flecha Horizontal	143	150
Den. Flecha en ménsula	N.A	300

Tabla 45. Resultados obtenidos Caso 10

6 CONCLUSIONES

Los métodos utilizados actualmente para el diseño y optimización de estructuras en viga armada dependen en gran medida de la experiencia, habilidad y destreza del ingeniero especializado en el cálculo de este tipo de estructuras que, por su singularidad, requiere una formación y conocimientos específicos en este campo.

Con la metodología implementada en la herramienta informática desarrollada en esta Tesis Doctoral, el resultado que se obtiene es construible y la solución presenta una completa repetitividad. No depende, por tanto, de la destreza del diseñador ni de otros factores subjetivos que, en ocasiones, pueden condicionar el diseño, tales como el estado de ánimo o la fatiga mental.

Tras la realización de esta tesis se han obtenido las conclusiones que se resumen en los siguientes puntos:

- Respecto al **algoritmo heurístico desarrollado**:
 - Este es capaz de obtener una solución óptima y construible con una entrada de datos mínima y establecida en el primer momento del diseño: luz, altura y separación entre pórticos, tipo de puente grúa y ubicación de la obra. De esta manera el optimizador desarrollado puede ser utilizado por un técnico no especializado en el diseño de estructuras en viga armada.
 - El algoritmo es aplicable a pórticos de diferentes tipologías: una o múltiples crujías, a un agua o a varias aguas, con crujías de la misma altura o diferente altura, con o sin puente grúa, etc. El amplio espectro al que es aplicable cubre más del 90% de las tipologías de pórticos que se presentan en la industria real.
 - En el desarrollo del algoritmo también se ha considerado la vinculación entre la estructura y la cimentación. De este modo, selecciona automáticamente el tipo de vinculación más adecuado para minimizar los costes de la cimentación en función de las cargas que solicitan la estructura. Cuando el tipo de vinculación pórtico - cimentación es “articulado”, el algoritmo considera la rigidez que se produce entre la base del pórtico y la cimentación para reducir los desplazamientos horizontales. Variando esta rigidez se reducen los desplazamientos horizontales sin necesidad de aumentar las secciones de los perfiles del pórtico. La máxima rigidez que el algoritmo puede utilizar es uno de los parámetros de diseño.
 - La función objetivo minimiza tanto el coste de la estructura como la cantidad de material utilizado, por lo que el algoritmo también considera los costes de fabricación en el momento de realizar el diseño del pórtico.

- El **entorno gráfico implementado** permite:
 - Que la entrada de datos se realice en menos de un minuto, mientras que el tiempo de optimización varía entre uno y dos minutos dependiendo de la complejidad de la estructura y de la potencia del ordenador. De este modo, en menos de 3 minutos un técnico no especializado puede obtener un pórtico en viga armada, optimizado en costes y cumpliendo con todos los criterios de seguridad establecidos, tanto en ELU como en ELS.
 - Visualizar los principales resultados de la optimización en la misma pantalla de entrada de datos, de modo que el diseñador puede comprobar fácilmente el grado de aprovechamiento del pórtico, los kg de material utilizados y el criterio que ha determinado el dimensionamiento del mismo: ELS o ELU.

- Respecto del **método de optimización** desarrollado:
 - Se obtienen soluciones óptimas que satisfacen los estados límites últimos y estados límites de servicio establecidos, utilizando un método racional basado en criterios de diseño construibles y en minimizar el coste de la estructura obtenida.
 - En la mayoría de los casos el optimizador consigue una estructura con menor peso y mayor aprovechamiento de materiales que la que obtendría un profesional especializado en este campo.

- Los **ejemplos realizados** demuestran que las secciones definidas para la viga armada en esta Tesis Doctoral son altamente eficientes:
 - En todos los casos en los que el pórtico está dimensionado en base a criterios ELU, se obtiene un aprovechamiento entre el 98% y el 100% del perfil. Sin embargo, con perfiles laminados en caliente solamente en muy pocas ocasiones se pueden obtener aprovechamientos superiores al 90% debido a los saltos entre perfiles y a que el diseño, en estos casos, está limitado con gran frecuencia por los ELS, no siendo posible llevar al máximo el aprovechamiento del perfil en ELU.
 - Con perfiles laminados en caliente, dada la baja relación entre su inercia y su masa, los ELS determinan el diseño del pórtico. En consecuencia, esta es la principal causa de que en el diseño con viga armada se obtengan pórticos más ligeros y eficientes.
 - Con el diseño en viga armada, en la mayoría de las ocasiones, salvo en naves articuladas con alturas superiores a 8m, no es necesario aumentar la sección de acero para cumplir con ELS. Esto es debido a la alta relación Inercia/masa que presentan las secciones de viga armada. Obtener una alta relación Inercia/masa es el principal motivo que lleva a dimensionar secciones con viga armada cuya alma está en la frontera entre secciones transversales clases 3 y 4, funcionando en clase 4 en estados de compresión y en muchos estados de flexión.

- Las naves articuladas en la cimentación exigen importantes secciones de acero para controlar los desplazamientos horizontales. Debido a este hecho, se recomienda su uso solamente en naves bajas (menos de 8m de altura) y en zonas de viento no excesivo (evitar zonas 1 y 2) o en lugares donde no se puedan transmitir momentos a la cimentación.
- Las naves articuladas precisan, en su mayoría, de secciones transversales mayores que las requeridas para cumplir con ELU. Debido a su baja rigidez en el apoyo sobre la cimentación, los desplazamientos horizontales tienen que ser controlados aumentando la rigidez de los nudos de cabeza de pilar y de cumbre del pórtico.
- En los pórticos con cumbrera central (a dos aguas) se obtiene un ahorro en materiales del orden del 20% respecto de un pórtico equivalente con la misma luz y sometido a las mismas cargas, pero diseñado con dintel recto (a un agua).
- Para pórticos dimensionados con perfiles laminados en caliente inferiores a IPE400, desde el punto de vista económico es más rentable la fabricación con este perfil. Para pórticos cuyos perfiles obtenidos son superiores a IPE450 compensa la fabricación con viga armada. La zona de transición entre perfil laminado y viga armada ocurre en pórticos con solicitaciones de nieve inferiores a 60kg/m^2 , con alturas de 8m y luces de 20 a 22m. Estos parámetros están deducidos con los costes obtenidos en España en 2013. Dependiendo del momento y lugar de producción, los parámetros de costes pueden ser ajustados para determinar el punto de equilibrio.
- Finalmente, en el desarrollo de la tesis se han establecido secciones de perfiles en viga armada que son óptimos para el diseño de pórticos. La obtención de estas secciones está basada en **criterios de coste y facilidad de ejecución**.
 - Se ha establecido un método claro para calcular los costes de producción de la viga armada y se han utilizado criterios comparativos con los perfiles laminados en caliente. De este modo, se puede determinar el punto óptimo a partir del cual es más económico el diseño con perfiles de viga armada que con perfiles laminados en caliente.
 - Los costes se calculan en función a los parámetros de tiempos de producción, energía, materiales y mano de obra. De esta forma, es posible calcular el punto a partir del cual el diseño en viga armada es preferible al diseño en perfil laminado en caliente, adecuando los parámetros de coste en cada caso productivo.
 - Se han establecido las relaciones entre el coste de fabricación de la viga armada con los costes de mano de obra, de la energía así como otras variables que dependen del lugar y del momento en el que se fabrica la viga armada. De esta manera, el punto de equilibrio entre los costes de fabricación mediante viga armada o perfil laminado en caliente no siempre se produce en el entorno de los 70kg/m . En China, por ejemplo, donde la mano de obra y el coste de la energía es inferior que en Europa, el punto a partir del cual es rentable fabricar piezas en viga armada resultará inferior a los 70kg/m calculados con costes de producción en España. Los criterios establecidos permiten calcular este punto de equilibrio para unos determinados costes de mano de obra, energía y resto de variables de coste definidas en esta tesis.

7 LINEAS FUTURAS

A continuación se presentan una serie de posibles líneas futuras de investigación que pueden surgir a partir del desarrollo de esa Tesis Doctoral.

- Consideración de las cargas sísmicas conforme al emplazamiento de la obra mediante la realización de un análisis modal espectral a partir del cálculo de las frecuencias de vibración del pórtico.
- Consideración de la redistribución plástica de momentos en el diseño de las piezas para mejorar así la optimización de los perfiles.
- Extensión del algoritmo de optimización a estructuras de pórticos en los que la geometría del dintel sea una celosía. En las geometrías de pórticos en los que la luz del mismo supera los 35 ó 40m, comienza a ser más económico realizar el dintel del pórtico con celosías en lugar de con viga armada, ya que el incremento de mano de obra de fabricación es compensado por el ahorro de materiales. La incorporación de este estudio de costes y selección de esta nueva geometría de dintel es una línea futura que trabajo que debe considerarse con el fin de mejorar la competitividad en costes. El tipo de celosía elegida para el dintel influirá en los costes de producción, por lo que deberían de considerarse las diferentes opciones de diseño. Una de las opciones más económicas en cuanto a costes de producción sería una celosía tipo Warren con cordones paralelos, si bien no será óptima en cuanto a materiales. El estudio de las geometrías de cercha como dintel del pórtico es un campo amplio que permite un considerable ahorro de coste final de la estructura. A continuación se muestra una nave industrial de 56m de luz en la que el diseño con dintel en cercha de cordones paralelos resultó más económica que la opción con dintel en viga armada.

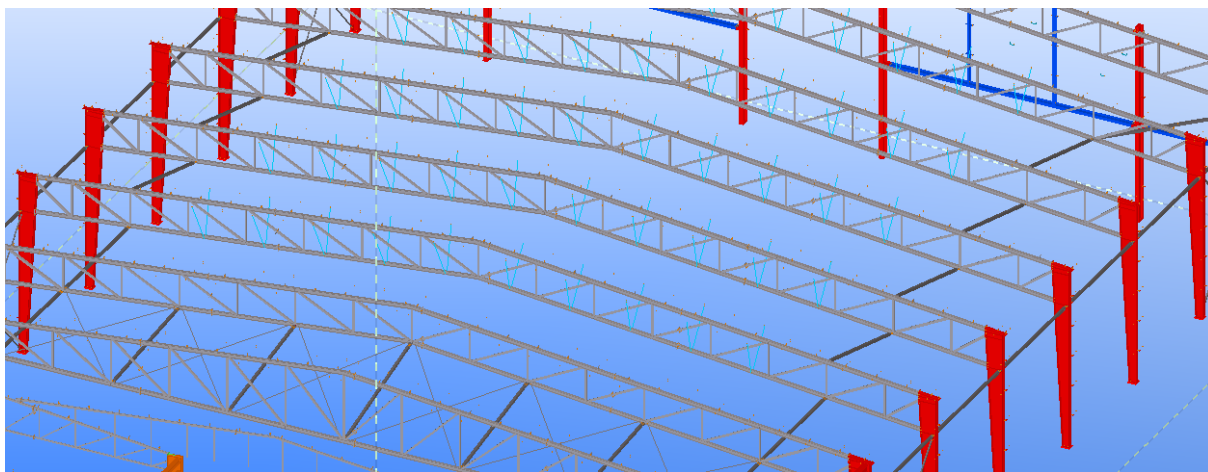


Figura 102. Diseño de pórtico con pilares en viga armada y dintel en celosía



Figura 103. Montaje del pórtico con pilare armados y dintel en celosía

- Implementación de otras geometrías. Por ejemplo pórticos con carga colgada en el centro del pórtico. Es el caso típico de naves que distribuyen material, en las que la cinta de distribución o tripper van colgados de una subestructura en el centro del pórtico.

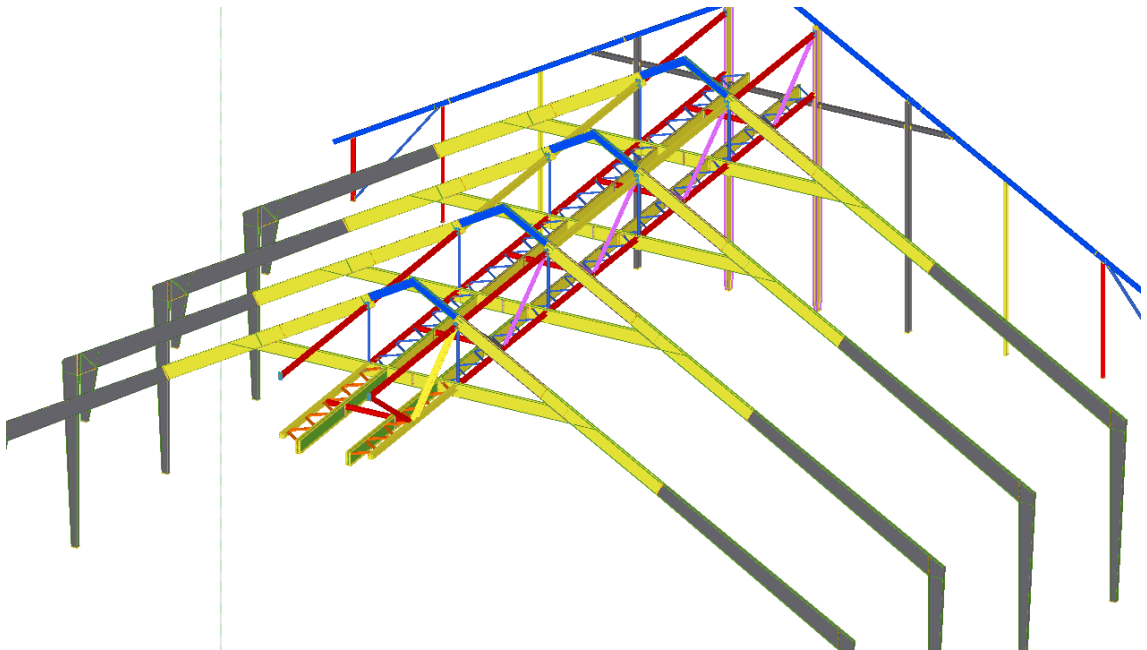


Figura 104. Pórtico armado provisto con estructura para tripper para distribución de material



Figura 105. Montaje de pórtico armado con estructura para tripper

- Implementación de otros códigos de relevancia internacional como el código *AISC* bajo el criterio de cargas de la *ASCE_SEI_7-10*, cuya importancia no se extiende solo al territorio de los Estados Unidos, ya que sobre la base de estos códigos se han desarrollado las normativas estructurales de la mayor parte de los países del Centro y del Sur de América.

8 AGRADECIMIENTOS OFICIALES

Algunos de los trabajos desarrollados en el ámbito de la presente Tesis Doctoral han sido financiados parcialmente, en primer lugar, por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación, cofinanciado con fondos FEDER, bajo el proyecto de Investigación BIA-2012-31609. En segundo lugar, también han sido parcialmente financiados por la Fundación para la Investigación, Ciencia y Tecnología del Principado de Asturias (FICYT) a través de la ayuda para el Grupo de Investigación en Construcción Sostenible, Simulación y Ensayo (GICONSIME) con el número FC-15-GRUPIN-14-004, cofinanciadas con fondos FEDER, una vía para construir Europa.

9 BIBIOGRAFIA

- [1] G. GALILEI, Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Louis Elsevier, 1638.
- [2] W. CRICHTON, J. M. R. FINLEY y H. J. HENRY, Machine adaptive Systems: quarterly report nº 3, University of Michigan, 1963.
- [3] J. HENRY HOLLAND, . Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, University of Michigan Press, 1975.
- [4] J. HENRY HOLLAND y L. O. C. GROUP, Hierarchical descriptions, universal spaces and adaptive systems, Defense Technical Information Center, 1968.
- [5] G. EBENAU, J. ROTTSCHÄFER y G. THIERAUF, An advanced evolutionary strategy with an adaptive penalty function for mixed-discrete structural optimisation, Advances in Engineering Software, 2005, pp. 29-38.
- [6] J. CAI y G. THIERAUF, A parallel evolution strategy for solving discrete structural optimization, Advances in Engineering Software, 1996, pp. 91-96.
- [7] A. ISAACS, T. RAY y W. SMITH, An Efficient Hybrid Algorithm for Optimization of Discrete Structures, in Simulated Evolution and Learning, Xiaodong Li; et al Editors, 2008, pp. 625-634.
- [8] A. LEMONGE y H. BARBOSA, An adaptive penalty scheme for genetic algorithms in structural optimization, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, pp. 703-736.
- [9] H. BARBOSA y A. LEMONGE, A new adaptive penalty scheme for genetic algorithms, Information Sciences, 2003, pp. 215-251.
- [10] A. KAVEH y S. TALATAHARI, Hybrid Algorithm of Harmony Search, Particle Swarm and Ant Colony for Structural Design Optimization, in Harmony Search Algorithms for Structural Design Optimization, Zong Geem, Editor, 2009, pp. 159-198.
- [11] A. KAVEH y S. TALATAHARI, Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures, Computers & Structures, 2009, pp. 267-283.
- [12] L. LI, Z. HUANG y F. LIU, A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables, Computer & Structures, 2009, pp. 435-443.
- [13] L. LI y E. AL, A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures, Computer & Structures, 2007, pp. 340-349.

- [14] G.-C. LUH y C.-Y. LIN, Optimal design of truss-structures using particle swarm optimization, *Computer & Structures*, 2011, pp. 2221-2232.
- [15] H. MARTINS y GOMES, Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm, *Expert System with Applications*, 2011, pp. 957-968.
- [16] R. PEREZ y K. BEHDINAN, Particle swarm approach for structural design optimization, *Computers & Structures*, 2007, pp. 1579-1588.
- [17] J. SCHUTTE y A. GROENWOLD, Sizing design of truss structures using particle swarms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2006, pp. 261-269.
- [18] M. DORIGO, *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, 1992.
- [19] R. MARTI y M.LAGUNA, Scatter Search, Departamento de Estadística en Investigación Operativa, Universitat de Valencia.
- [20] M. E. SEMELAWY, A. NASSEF y A. E. DAMATTY, Design of prestressed concrete flat slab using modern heuristic optimization techniques, ELSEVIER, 2011.
- [21] V. MARTI y F. GONZALEZ-VIDOSA, Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization, ELSEVIER, 2010.
- [22] Y. PEI y Y. XIA, Design of Reinforced Cantilever Retaining Walls using Heuristic Optimization Algorithms, ELSEVIER, 2011.
- [23] R. M. MAHERI y M. NARIMANI, An enhanced harmony search algorithm for optimum design of side sway steel frames, ELSEVIER, 2014.
- [24] E. Oñate, *Cálculo de estructuras por el Método de elementos finitos*, Barcelona: Centro internacional de métodos numéricos en la ingeniería, 1995.
- [25] R. A. Alvarez, *La estructura metálica Hoy. Programación. Tomo III*, Librería técnica Bellisco.
- [26] AENOR, EUROCODIGO 3. UNE EN 1993. Proyecto de estructuras de acero.
- [27] AISC, ANSI/AISC 350-10. Specification for Structural Steel Building.
- [28] Australian Standard, AS4100-1998. Steel Structures.
- [29] Ministerio de Fomento, Instrucción de acero estructural R.D. 751/2011.
- [30] Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica, NSR-10. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sísmo Resistente.

- [31] Instituto nacional de normalización Chileno, Nch 433. Diseño sísmico de edificios.
- [32] D. GOLDBERG, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, 1989.
- [33] D. GRIERSON y W.PAK, Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm, Structural and multidisciplinary optimization, 6(3), 1993.
- [34] F.Erbatur, O.Hasancebi, I.Tütüncü y H.Kiliç, Optimal design of planara and space structures with genetic algorithms, Computer & Structures, 2000.
- [35] M. P. Gero, Optimización del diseño y construcción de edificios metálicos en base a algoritmos genéticos, Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo, 2002.
- [36] S. S. CABALLERO, Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [37] W. DORN, R. GOMORY y H. GREENBERG, Automatic design of optimal structures, Journal de Mecanique, 3(6):2552, 1964.
- [38] B. TOPPING, The Application of Dynamic Relaxation to the Design of Modular Space Structures. Thesis, Londres: The City University, 1978.
- [39] U. Kirsch, Fundamental properties of optimal topologies, In Proc. of NATO / ARW on Topology Design of Structures, 1992.
- [40] T. HAGISHITA y M. OHSAKI, Topology Optimization of Trusses by Growing Ground Structure Method. Structural and Multidisciplinary Optimization, 37:377-393. ISSN 1615-147X. doi: 10.007/s00158-008-0237-4, 2009.
- [41] P. PEDERSEN, On the minimum mass layout of trusses, Istanbul: Proc. AGARD Symposium. AGARD-CP-36-7, 1970.
- [42] H. THOMAS y D. BROWN, Optimum least-cost design of a truss roof system, Computer & Structures, 7(1):13-22. ISSN 00457949, 1977.
- [43] G. SVED y Z. GINOS, Structural optimization under multiple loading, International Journal of Mechanical Sciences, 10(10):803-805, 1968.
- [44] G. VANDERPLAATS y F. MOSES, Automated design of trusses for optimum geometry, ASCE J Struct Div. 98(ST3):671-690, 1972.
- [45] W.R.SPILLERS, Iterative Design for Optima Geometry, ASCE J Struct. Div, 101(7):1435-1442, 1975.

- [46] W.R.SPILLERS, Iterative Structural Design, New York: North-Holland Pub. Co.; American Elsevier Pub. Co. Amsterdam, 1975.
- [47] W.R.SPILLERS, On Adaptive Structural Design, Journal of the Structural Division. ASCE, 98(ST10):2155-2163, 1971.
- [48] O. LEV, Sequential geometric optimization, ASCE J Struct. Div. 107(10):1935-1943. ISSN 00448001, 1981.
- [49] K. REINSCHMIDT y A. RUSSELL, Linear Methods in Structural Optimisation, Technical Report R 70-41, Department of Civil Engineering, Cambridge, 1970.
- [50] K. REINSCHMIDT y A. RUSSELL, Applications of linear programming in Structural layout and Optimization, Computers & Structures, 4 (4):855-869. ISSN 00457949, 1974.
- [51] K. REINSCHMIDT y A. RUSSELL, Discussion of Optimum Design of trusses for ultimate loads, Journal of the Structural Division, 97():2437-2442, 1971.
- [52] R. Balling, Optimal Steel frame design by simulated annealing, New York: Journal of structural Engineering 117(6):1780-1795. ISSN 07339445, 1991.
- [53] W. BENNAGE y A. DHINGRA, Single and multiobjective structural optimization in discrete-continuous variables using simulated annealing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 38(16):2753-2773. ISSN 1097-0207. doi: 10.1002/nme. 1620381606, 1995.
- [54] T.Y.CHEN y J. SU, Efficiency improvement of simulated annealing in optimal structural designs, Advances in Engineering Software, 33(7-10):675-680. ISSN 0965-9978. doi: 10.1016/s0965-9978(02)00058-3, 2002.
- [55] L. LAMBERTI, An Efficient Simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures, Computers & Structures, 86(19-20):1936-1953. ISSN 0045-7949. doi: 10.1016/j.compstruc. 2008.02.004, 2008.
- [56] N. NOILUBLAO y S.BUREERAT, Simultaneous Topology, Shape and Sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms, Computers & Structures. 89(23-24):2531-2538. ISSN 0045-7949. doi: 10.1016/j.compstruc.2011.08.010, 2011.
- [57] AENOR, UNE EN 1991. Eurocódigo 1. Acciones en estructuras.

ANEXO I. ALGORITMO DE COMPROBACIÓN DE BARRAS SEGÚN EC-3.

El algoritmo completo de comprobación de secciones según EC-3 es el siguiente:

- Asignar forma de la sección (H, L, Z, C, RHS, DHS, etc.).
- Determinar la curva de pandeo para cada uno de los ejes principales de la sección.
- Obtener el coeficiente de imperfección a pandeo α .
- Cálculo de la esbeltez λ .
- Comprobar que la barra tiene todas las propiedades mecánicas asignadas.
- Para cada sección de la barra en análisis.
- Para cada imperfección inicial (sin desplomes, con desplome en X+, en X-, en Y+, en Y-) si el cálculo es en segundo orden.
- Para cada combinación de esfuerzos mayorada:
 - o Selección de los esfuerzos calculados para la combinación
 - o Cálculo de los coeficientes C para pandeo lateral (en función del diagrama de momentos de la barra) y coeficientes de simultaneidad.
 - o Determinar la clase de la sección (1,2,3,4)
 - o Cálculo de $\bar{\lambda}$ para cada eje de la sección
 - o Cálculo de ϕ para cada eje de la sección
 - o Cálculo de χ para cada eje de la sección
 - o Cálculo de los coeficientes k_y, k_z , para comprobación de sección bajo esfuerzos combinados.
 - o Cálculo del momento crítico M_{cr}
 - o Cálculo de $\bar{\lambda}_{Lt}$ para cada eje de la sección
 - o Cálculo de ϕ_{Lt} para cada eje de la sección
 - o Cálculo de χ_{Lt} para cada eje de la sección
 - o Cálculo de α_{Lt}
 - o Cálculo de k_{Lt}
 - o Cálculo del momento $M_{b,Rd}$
 - o Comprobación de reducción del límite elástico por cortante según la fórmula $f_{yr} = (1 - \rho) \cdot f_y$
 - o Comprobación de sección bajo esfuerzos combinados:
 - Si Clase 1 ó 2:
$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{pl.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$
 - Si Clase 3:
$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{el.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{el.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$
 - Si Clase 4:
$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min} \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Sd}}{W_{eff.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{eff.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

- Comprobación de sección a pandeo lateral bajo la acción de esfuerzos combinados:

- Si Clase 1 ó 2

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_{Lt} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{lt} \cdot W_{pl.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{pl.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

- Si Clase 3: $\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_{Lt} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{lt} \cdot W_{el.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{el.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$

- Si Clase 4:

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \frac{k_{Lt} \cdot M_{y,Sd}}{\chi_{lt} \cdot W_{eff.y} \cdot f_{yd}} + \frac{k_z \cdot M_{z,Sd}}{W_{eff.z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

- Comprobación de abolladura
- Almacenamiento de esfuerzos y de combinación si es la más desfavorable.

- Siguiete combinación de esfuerzos.
- Siguiete deformación inicial.
- Siguiete sección para la barra en análisis.
- Determinación de la combinación de esfuerzos más desfavorables para la barra en análisis.
- Coloca en 'lista de errores' mensaje si hay posibilidad de abolladura del alma.
- Coloca en 'lista de errores' mensaje si hay posibilidad de pandeo lateral.
- Coloca en 'lista de errores' mensaje si hay posibilidad de secciones en clase 4.

ANEXO II. Diagrama de flujo Algoritmo “refinadinteles”

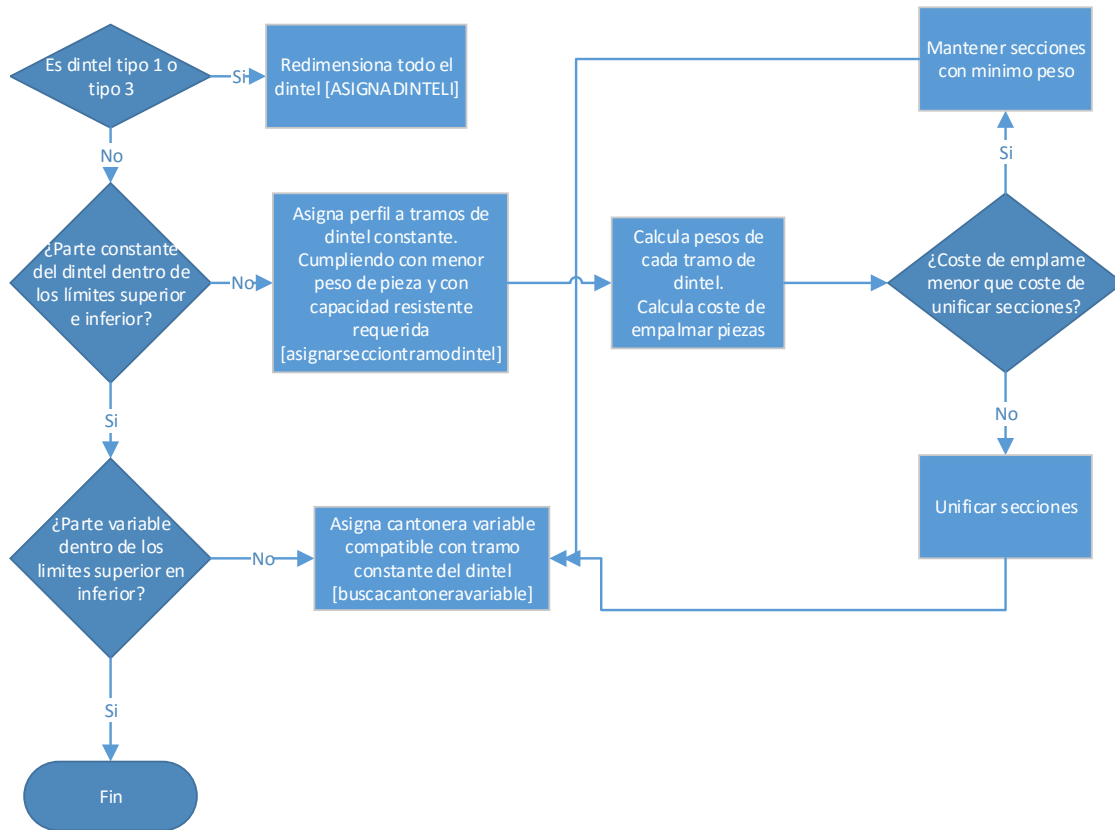


Figura 106. Diagrama de flujo algoritmo “refinadinteles”

ANEXO III. Diagrama de flujo Algoritmo “refinapilares”

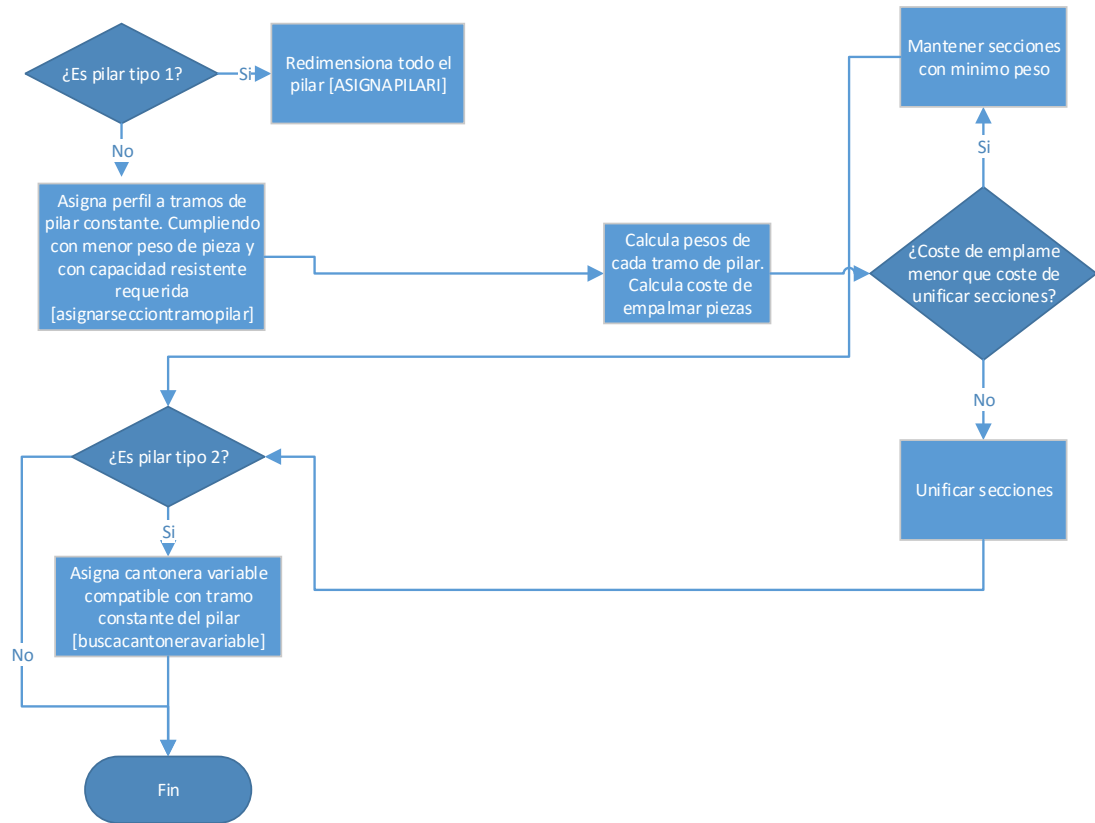


Figura 107. Diagrama de flujo algoritmo “refinapilares”

ANEXO IV. Diagrama de flujo Algoritmo “buscacantoneravariabile”

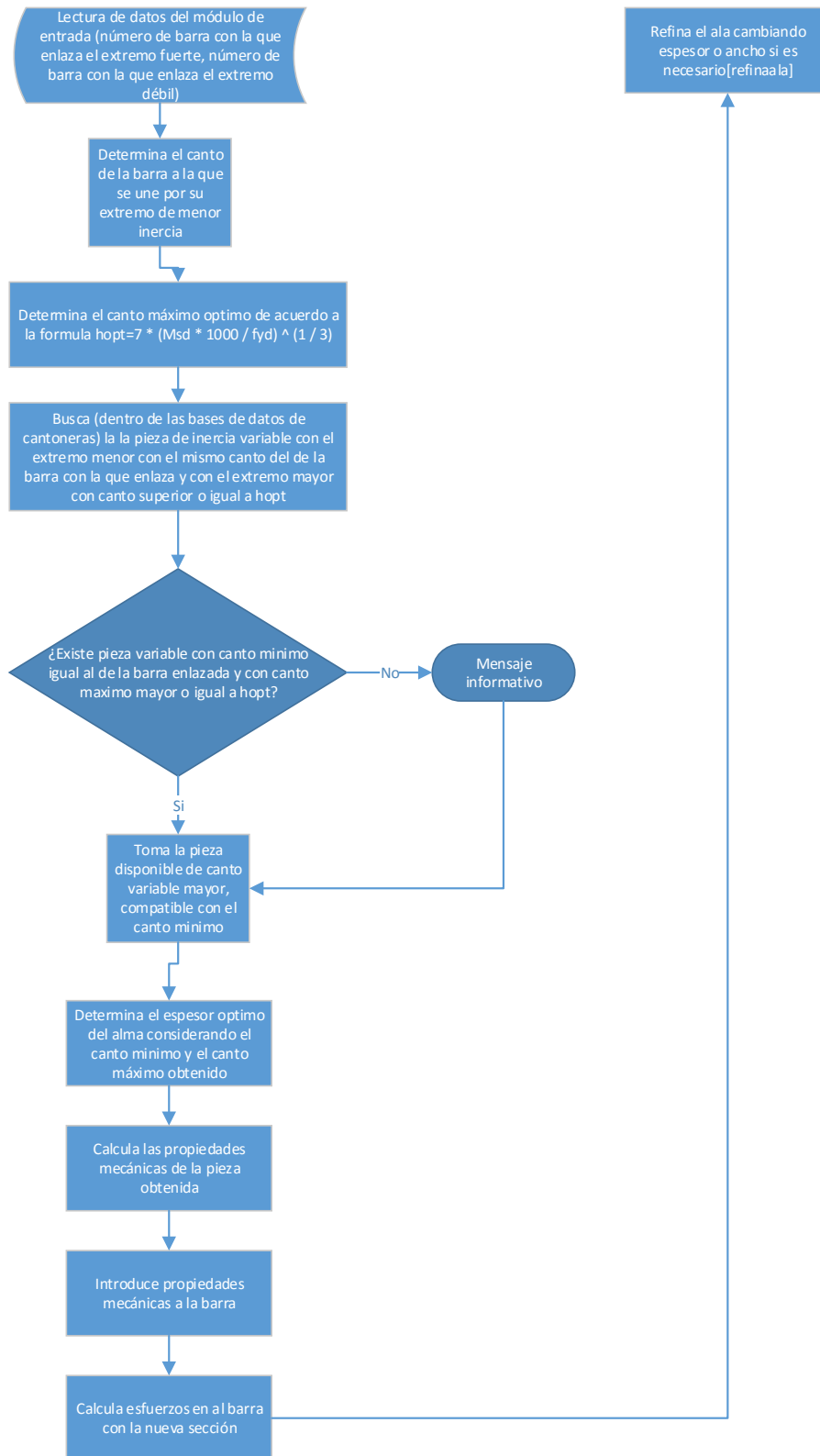


Figura 108. Diagrama de flujo algoritmo “buscacantoneravariabile”