



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DE UN TALLER DE  
ESTRUCTURA METÁLICA PARA FABRICAR VIGAS  
ALIGERADAS ESPECIALES**

Autor: D. Pablo Maximiliano Canicio Gómez  
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán  
Tutor: D. Jesús Magdaleno Martín

Valladolid, septiembre, 2021



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DE UN TALLER DE  
ESTRUCTURA METÁLICA PARA FABRICAR VIGAS  
ALIGERADAS ESPECIALES**

Autor: D. Pablo Maximiliano Canicio Gómez  
Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán  
Tutor: D. Jesús Magdaleno Martín

Valladolid, septiembre, 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos aquellos que han hecho que este camino haya sido más fácil en una situación tan complicada.

Este trabajo es tan vuestro como mío.

*“ Everybody stays positive no matter how negative life gets ”.*

# Índice

0. INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS.....	9
2. EMPLAZAMIENTO.....	11
2.1- Antecedentes y localización.....	11
2.2- Descripción de la nave.....	13
2.3- Requisitos con el CTE.....	15
2.4- Visualización espacial y geográfica de la nave industrial.....	16
2.5- LAYOUT del proceso.....	17
3. LÍNEA DE PRODUCTOS DE FABRICACIÓN.....	19
3.1- Viga alveolar.....	19
4. MERCADO.....	35
5. NUEVA LÍNEA PRODUCTIVA.....	39
5.1- Viga aligerada armada.....	39
5.2- Viga contraflechada.....	44
6. COSTES FABRICACIÓN.....	47
6.1- Cálculo de costes.....	47
6.2- Comparación de costes.....	54
7. ADAPTACIÓN DEL TALLER.....	57
7.1- Renovación del taller.....	57
7.2- Nuevo LAYOUT.....	60
8. REFUERZO DE LA OFICINA TÉCNICA.....	63
9. VIABILIDAD DE LA ADAPTACIÓN DEL TALLER.....	67
10. CONCLUSIONES.....	75
11. LINEAS FUTURAS.....	77
12. BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO I - PLANOS.....	83
I.I - Plano viga aligerada armada hueco circular.....	84
I.II - Plano viga aligerada armada hueco hexagonal.....	86
I.III - Plano viga aligerada armada curva de hueco circular.....	88
ANEXO II – COSTES FABRICACIÓN VIGAS.....	91
II.I- Coste viga alveolar hexagonal.....	91
II.II- Coste viga aligerada armada hexagonal.....	93
II.III- Coste viga aligerada armada curva de alveolo circular.....	96
ANEXO III – CARGA MÁXIMA ADMISIBLE.....	99
III.I- Viga IPE400.....	99
III.II- Viga alveolo circular.....	100

III.III- Viga alveolo hexagonal .....	101
III.IV- Resultados teóricos.....	102
ANEXO IV - MECANISMOS DE FALLO ESTRUCTURAL.....	103
ANEXO V - GENERACIÓN VIGA ALIGERADA DE GEOMETRÍA ESPECIAL (CURVA) DE HUECO CIRCULAR.....	109

## Índice de figuras

Figura 1 - Vigas alveolares de alveolo hexagonal para carril de puente grúa.....	1
Figura 2 - Puertas entrada a la Expo Mundial 'Floriade' en 1981, Amsterdam. Empleo de vigas fuertemente curvadas alveolares con alveolo hexagonal. ....	2
Figura 3 - Barra acero precalentada .....	2
Figura 4 - Barra acero entrando en el tren de laminación .....	3
Figura 5 - Tren laminación de cerca.....	3
Figura 6 - Primera entrada tren de laminación .....	3
Figura 7 - Proceso intermedio laminación .....	4
Figura 8 - Fin del proceso de laminación .....	4
Figura 9 - Esquema de una viga armada (con su cordón de soldadura).....	5
Figura 10 - Proceso constructivo que sigue la viga alveolar .....	5
Figura 11 - Viga alveolar facilitando paso de instalaciones.....	6
Figura 12 - Macizado alveolos .....	7
Figura 13 - Ubicación PARQUE EMPRESARIAL TORDESILLAS SECTOR I .....	11
Figura 14 - Plano parcelario contrastado con su ubicación vista aérea.....	12
Figura 15 - Ubicación parcelas en plano parcelario y plano catastral.....	12
Figura 16 - Contenedor para residuos .....	14
Figura 17 - Volcado residuos en contenedor.....	15
Figura 18 - Visualización 3D nave industria.....	16
Figura 19 - Vista en planta según plano catastral.....	16
Figura 20 - Zona interior de la nave con el puente grúa .....	17
Figura 21 - LAYOUT del proceso .....	18
Figura 22 - Ejemplos de alveolos de viga Boyd.....	19
Figura 23 - Proceso corte de viga.....	20
Figura 24 - Proceso constructivo que sigue la viga alveolar .....	21
Figura 25 - Proceso viga alveolar octogonal .....	21
Figura 26 - Proceso constructivo viga alveolar sección variable .....	22
Figura 27 - Retoque de defecto.....	23
Figura 28 - Extremos sobrante viga tras ser soldada.....	23
Figura 29 - Escoria cordón soldadura .....	24
Figura 30 - Preparación uniones (IZQ: Placa de testa / DCHA: Ala y alma atornillada) .....	24
Figura 31 - Viga pintada.....	25
Figura 32 - Datamatrix .....	25
Figura 33 - Cortadora PIONEER PFP-4010 .....	26
Figura 34 - Parámetros técnicos de PIONEER PFP-4010 .....	26
Figura 35- Equipo corte manual.....	27
Figura 36 - LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine .....	28
Figura 37 - Parámetros técnicos LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine .....	28
Figura 38 - Equipo soldadura manual .....	29
Figura 39 - Marcado Portatil E-Touch .....	29
Figura 40 - Características mecánicas y técnicas .....	30
Figura 41 - Procedimiento método de líquidos penetrantes .....	31
Figura 42 - Paso de diversos tipos instalaciones .....	32
Figura 43 - Vigas colaborativas con hormigón .....	32
Figura 44 - Configuración en forma de pilar.....	33
Figura 45 - Enclave estratégico de la nave.....	35
Figura 46 - Mapa de las plantas industriales de ArcelorMittal en España.....	36
Figura 47 - Box oficial CrossFit de Reebok One .....	37
Figura 48 - Vigas aligerada en box de CrossFit Ourense.....	37

Figura 49 - Estructura polideportivo de viga armada presentando curvatura .....	38
Figura 50 - Fabricación de una viga carrilera .....	39
Figura 51 - Viga con alveolo hexagonal .....	41
Figura 52 - Fallo por exceder material del alma .....	41
Figura 53 - Alma con alveolo poco común .....	42
Figura 54 - Viga armada final .....	42
Figura 55 - Pilares pórticos sección variable .....	43
Figura 56 – Contraflechado.....	45
Figura 57 - Viga asimétrica.....	45
Figura 58 - Viga asimétrica con losa de hormigón .....	46
Figura 59 - Proceso viga celular.....	47
Figura 60 - Viga celular armada.....	50
Figura 61 - Chapa de partida para cortar el alma .....	53
Figura 62 - Viga aligerada armada curva de alveolo circular .....	54
Figura 63 - Cantilevers vigas/chapas especiales .....	57
Figura 64 - Soporte soldado vigas aligeradas armadas .....	58
Figura 65 - Soporte para soldado vigas aligeradas armadas .....	59
Figura 66 - Nueva distribución de la nave .....	60
Figura 67 - Nuevo LAYOUT de la nave.....	62
Figura 68 - Mallado viga.....	64
Figura 69 - Estudio de tensiones .....	65
Figura 70 - Análisis de la deformada de la viga.....	65
Figura 71 - Análisis de pandeo.....	66
Figura 72 - Proceso viga alveolar hexagonal .....	91
Figura 73 - Viga armada hueco hexagonal.....	93
Figura 74 - Viga biapoyada.....	99
Figura 75 - Sección equivalente viga con alveolos .....	100
Figura 76 - Fallo por cizallamiento .....	103
Figura 77 - Pandeo latero-torsional.....	104
Figura 78 - Fallo por Vierendeel (esquema) .....	104
Figura 79 - Fallo por Vierendeel .....	105
Figura 80 - Fallo por pandeo local o abolladura del ala.....	105
Figura 81 - Pandeo alma de la viga alveolar .....	106
Figura 82 - Fallo por ruptura cordón de soldadura.....	107
Figura 83 - Parámetros geométricos para el segmento circular .....	109
Figura 84 - Anchura sólida entre huecos.....	111
Figura 85 - Ángulo entre huecos .....	111
Figura 86 - Viga aligerada curva.....	112

## Índice de tablas

Tabla 1 – Datos perfiles .....	6
Tabla 2 - Distribución superficial fábrica .....	14
Tabla 3 - Longitudes proceso corte y soldadura viga alveolar de hueco circular .....	48
Tabla 4 - Costes imputados viga alveolar hueco circular.....	49
Tabla 5 – Longitud a soldar (viga macizada).....	50
Tabla 6 - Longitudes proceso corte y soldadura viga celular armada.....	51
Tabla 7 - Costes imputados viga armada celular.....	52
Tabla 8 - Nuevas longitudes de corte y soldadura (viga aligerada de hueco circular macizada) .....	52
Tabla 9 - Costes imputados viga aligerada de hueco circular macizada.....	53
Tabla 10 - Comparación coste de viga sin macizado .....	54
Tabla 11 - Comparación coste de viga con macizado.....	54
Tabla 12 - Costes viga aligerada armada curva alveolo circular.....	54
Tabla 13 - Coste anual producción de las vigas .....	67
Tabla 14 - Ventas de vigas anuales .....	68
Tabla 15 - Salarios ingenieros .....	68
Tabla 16 - Costes asociados a la formación .....	69
Tabla 17 - Gastos oficina .....	69
Tabla 18 - Coste contenedores para residuos .....	69
Tabla 19 - Coste módulos de cantilevers .....	69
Tabla 20 - Coste movimiento equipos y maquinaria.....	70
Tabla 21 - Coste almacenes.....	70
Tabla 22 - Chatarra anual .....	70
Tabla 23 - Venta de chatarra .....	71
Tabla 24 - Coste de la inversión.....	71
Tabla 25 - Coste modificación taller .....	71
Tabla 26 - Coste refuerzo de la oficina técnica .....	72
Tabla 27 - Beneficio anual .....	72
Tabla 28 - Beneficio tras inversión .....	72
Tabla 29 - Longitudes proceso corte y soldadura viga alveolar hexagonal .....	91
Tabla 30 - Costes imputados viga alveolar hexagonal.....	92
Tabla 31 – Longitud a soldar (viga macizada).....	93
Tabla 32 - Longitudes de corte y soldadura viga armada hueco hexagonal .....	93
Tabla 33 - Costes imputados viga armada hexagonal .....	94
Tabla 34 - Nuevas longitudes de corte y soldadura (viga aligerada hexagonal macizada).....	95
Tabla 35 - Costes imputados viga aligerada hexagonal macizada .....	95
Tabla 36 - Longitudes de corte y soldadura viga armada hueco hexagonal .....	96
Tabla 37 - Costes imputados viga armada hexagonal .....	97
Tabla 38 - Resultados teóricos .....	102



## 0. INTRODUCCIÓN

La ingeniería es un campo que sufre cambios continuamente y el éxito radica en adaptarse a éstos. Cada cambio implica que surjan a su paso una infinidad de normas dentro del marco nacional como del internacional, dependiendo donde se quiera llevar un proyecto a cabo.

Una empresa dedicada al mundo de la estructura metálica busca la reducción del coste en su producto y obtener el mayor beneficio posible. De aquí que puedan llegar a surgir lo que vienen siendo las vigas *Boyd* o vigas de alma aligerada o vigas alveolares. Éstas, a su vez, aparecen a partir de la realización de modificaciones a partir de técnicas del más alto nivel tecnológico a nivel de corte y soldadura en perfiles en doble T (IPE, IPN, HEB, ...) normalizados dando la forma deseada al alveolo de la viga (hueco que queda en el alma) pudiendo ser circular, hexagonal, octogonal, entre muchas otras. Usadas para una gran cantidad de aplicaciones como por ejemplo se representa en la Figura 1 a modo de viga carrilera para puentes grúa. Además, el llegar a éstas implica un alto conocimiento en términos de metodologías de corte y soldadura que implica la construcción de este tipo de vigas.



*Figura 1 - Vigas alveolares de alma aligerada con alveolos hexagonales para carril de puente grúa*

Como bien es sabido, la ingeniería está en continua evolución y el mercado que ésta mueve no iba a ser distinto ya que gracias a éste la ingeniería progresa. Por tanto, es la demanda la responsable de que se obtengan cada vez soluciones más innovadoras y complejas.

Es por todo esto que el nicho de mercado del campo de las estructuras cada vez busque ideas más creativas o especiales para que así en numerosas ocasiones se llegue a evaluar la parte estética de la misma forma o, incluso, adquiera un mayor peso frente al resistente y funcional. Esto hace que los métodos tradicionales que se usarían perfectamente para la fabricación de una viga alveolar común no puedan llegarse a emplear para estos casos.

Tal es el caso de las puertas de entrada a la Expo Mundial 'Floriade' se 1981 en Amsterdam como se aprecia en la Figura 2 donde se buscaba esa creatividad con la utilización de esta tipología de vigas y perfiles.



*Figura 2 - Puertas entrada a la Expo Mundial 'Floriade' en 1981, Amsterdam. Empleo de vigas fuertemente curvadas alveolares con alveolo hexagonal.*

Se llegan a alcanzar geometrías de la viga prácticamente sin ninguna restricción. Estas situaciones conllevan un proceso de fabricación bastante más complejo que el seguido en una simple viga alveolar llegando a ser llamadas éstas como vigas armadas en las que sobre un alma se sueldan las alas. Esto hace que se lleguen a alcanzar una serie de ventajas adicionales a las primeras como podría ser la definición de un tipo de perfil a gusto de cliente sin ser este preconcebido como es un perfil estandarizado.

Una viga es un elemento estructural lineal que tiene por cometido trabajar principalmente a flexión. Éstas se caracterizan por su dimensión predominante que es la longitud. Su conformado se hacen a raíz de un bloque de acero que es calentado a temperaturas tales que hacen que sea un material apto para ser modificada su forma por medio de trenes de laminación, ver de la Figura 3 a Figura 8. En éstos se realizarán una serie de pasadas hasta obtener el perfil deseado.



*Figura 3 - Barra acero precalentada*



Figura 4 - Barra acero entrando en el tren de laminación



Figura 5 - Tren laminación de cerca

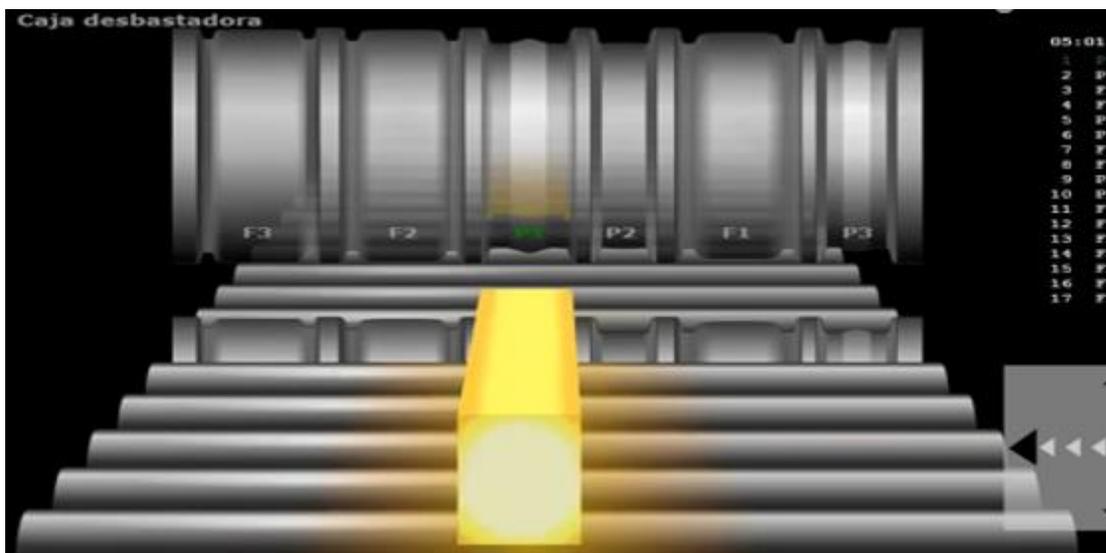
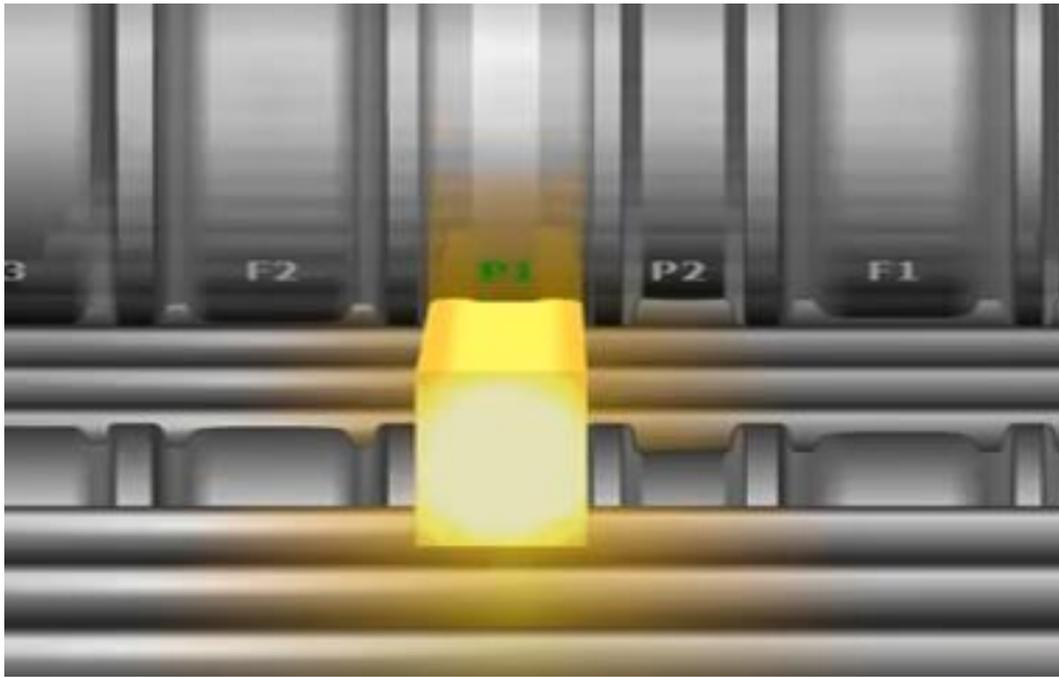
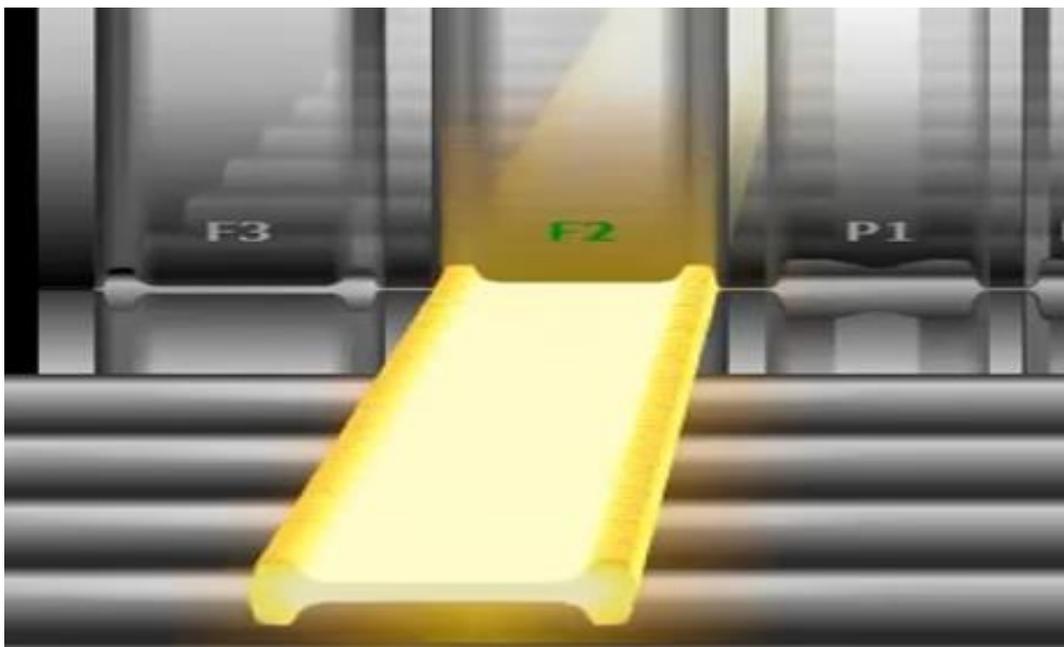


Figura 6 - Primera entrada tren de laminación



*Figura 7 - Proceso intermedio laminación*



*Figura 8 - Fin del proceso de laminación*

Esta no es la única configuración posible para la obtención de esta tipología de perfil, sino que se puede partir de una chapa que ejerza como alma y a la que se le sueldan las alas (ver Figura 9). Éstas reciben el nombre de viga armada por su proceso de fabricación.

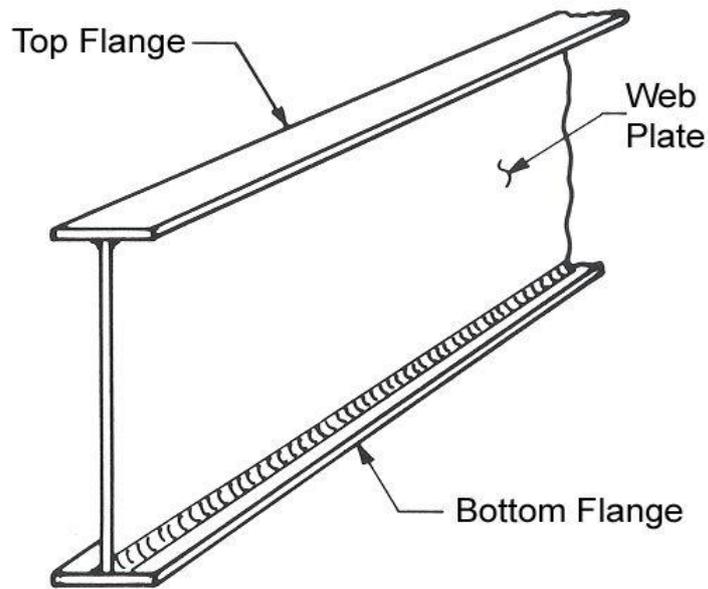


Figura 9 - Esquema de una viga armada (con su cordón de soldadura)

El taller dedica su actividad a la fabricación de vigas alveolares a partir de perfiles en doble T, es decir, perfiles compuestos por alma y alas como los que se obtiene según se aprecia desde la Figura 6 a Figura 8. También son conocidas como vigas Boyd o vigas de alma aligerada.

Su utilidad es óptima para situaciones en las que interesa que el peso de la viga sea lo más bajo posible, pero con unas prestaciones mecánicas superiores se recurre a las vigas alveolares. Estas surgen a partir de las vigas en doble T a las que se le somete a un proceso de corte y posterior desplazado y soldado, ver Figura 10. La línea discontinua muestra la directriz de corte de la viga y en color rojo los segmentos de soldadura. Así se conforma una viga aligerada.

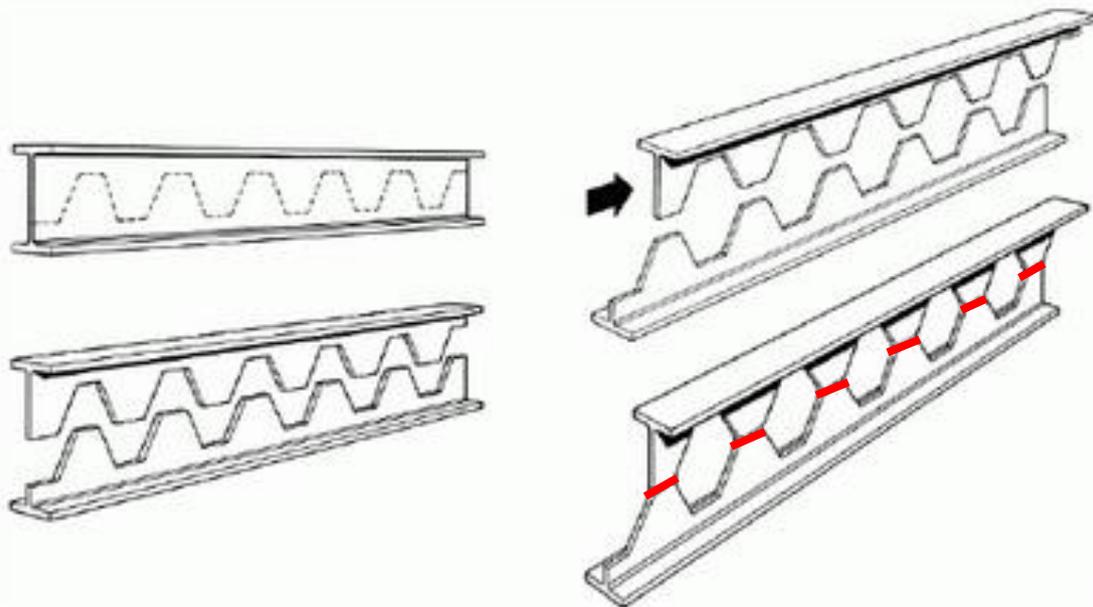


Figura 10 - Proceso constructivo que sigue la viga alveolar

Además, para situaciones en las que hay cierto tráfico de instalaciones, ver Figura 11, en una nave industrial empleando esta tipología de viga se consigue un muy fácil paso de los distintos conductos, pero ésta no es la razón de ser de esta tipología de vigas.

Estas nuevas vigas poseen unos valores de inercia superiores respecto a la viga inicial con perfil IPE400. Los valores de inercia quedan recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1 – Datos perfiles

	<i>Inercia (mm<sup>4</sup>)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Separación alveolos (mm)</i>	<i>Altura perfil (mm)</i>	<i>Altura hexágono (mm)</i>
<i>IPE400</i>	2,31·10 <sup>8</sup>	-	-	400	-
<i>Hueco circular</i>	11,661·10 <sup>8</sup>	-	210	595,10	-
<i>Hueco hexagonal</i>	11,339·10 <sup>8</sup>	420	105	600	400

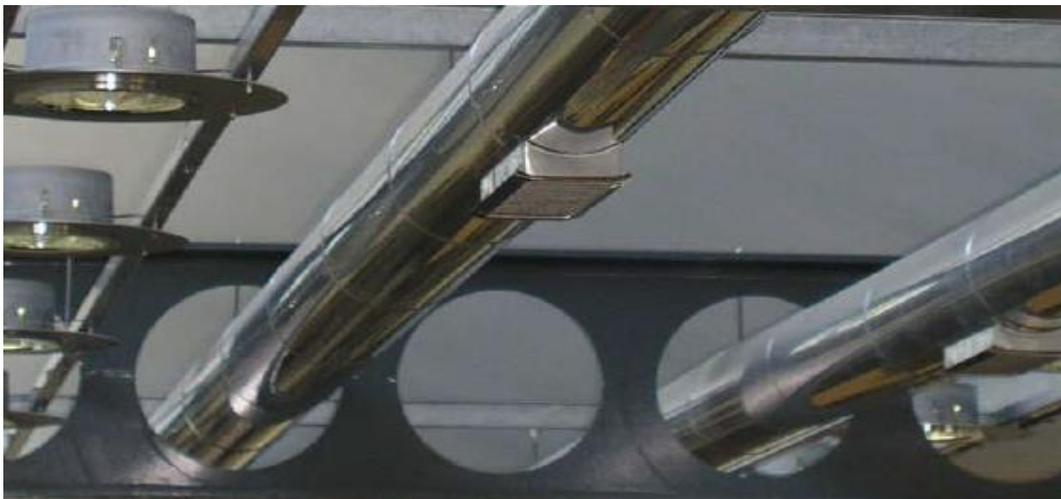


Figura 11 - Viga alveolar facilitando paso de instalaciones

Se suele hacer uso de viga alveolar tanto para cubierta como en los propios forjados. Empleados para situaciones en las que se tienen que salvar grandes luces en las que se pueden llegar a alcanzar los 50 m. La reducción de peso respecto a las vigas de alma llena es considerable lo que hace que los requerimientos de montaje sean mucho menores.

Aparece un gran abanico de fabricantes de vigas alveolares como son ArcelorMittal (1), RENEDO METAL (2), entre muchos otros.

Esta tipología de viga ofrece grandes beneficios, pero, también, hay aspectos que no lo son tanto como es la capacidad de soportar elevados esfuerzos cortantes. Esto es debido a que el alma de la viga está más debilitada que en situación de viga en doble T ya que aparecen los alveolos. En situaciones extremas en las que se tengan valores muy altos se recomienda el macizar, ver Figura 12, algunos de los alveolos próximos a los apoyos, aunque se pueden encontrar en cualquiera de estos huecos.



*Figura 12 - Macizado alveolos*

El trabajar con altos esfuerzos, no solo de tipo cortante, pueden llegar a originar ciertos problemas de inestabilidad sobre la viga y en especial en el alma.



## **1. OBJETIVOS**

La justificación de este documento está muy marcada con la idea del estudio de la implantación de una nueva línea de producción/fabricación de nuevas tipologías de vigas alveolares frente al nuevo mercado emergente y poder así expandirse.

Para ello se definen una serie de puntos definidos, como mínimo, a ser cumplidos y que se muestran a continuación.

- Decidir las tipologías de vigas que van a ser incorporadas según la nueva línea de negocio. Pasar de viga alveolar a una configuración de viga aligerada (llevada a cabo a partir del proceso de armado).
- Estimación de los costes de la viga alveolar frente a la viga aligerada armada, en el caso de que el mismo producto pueda hacerse por los dos métodos, y ver si ésta nueva alternativa es viable o no. Queda implícito que los costes de ambos procedimientos serán comparados y así poder observar el interés de la producción de este nuevo producto.
- Plantear la nueva distribución en planta del taller ya adaptado y determinar su viabilidad.
- Una vez estudiada la viabilidad técnica de las nuevas tipologías de vigas a fabricar en el taller se procede a estudiar la propuesta económica de la adaptación del taller realizando la menor cantidad de cambios sobre la nave de la que se dispone, sin plantear hacer ninguna nave anexa, y discutir que tan viable es.



## 2. EMPLAZAMIENTO

### 2.1- Antecedentes y localización

La nave industrial se encuentra en la agrupación de parcelas I-4.1 a I-4.3 del PARQUE EMPRESARIAL TORDESILLAS SECTOR 1 ubicada en la Av. De la Labranza (Tordesillas, Valladolid, Castilla y León, España) (3,4). Sus códigos catastrales (5) son 2482107UL3928S0001UZ, 2482106UL3928S0001ZZ y 2482105UL3928S0001SZ. Cada uno de ellos hace referencia a cada una de las tres parcelas.

En las Figura 13 y Figura 14 se refleja la ubicación y la distribución parcelaria del PARQUE EMPRESARIAL.



Figura 13 - Ubicación PARQUE EMPRESARIAL TORDESILLAS SECTOR I



Figura 14 - Plano parcelario contrastado con su ubicación vista aérea

La Figura 15 recoge la agrupación de parcelas pertenecientes al taller de calderería.



Figura 15 - Ubicación parcelas en plano parcelario y plano catastral

## 2.2- Descripción de la nave

En dicha nave industrial se están fabricando vigas alveolares a partir de perfiles en doble T a través del corte de estas y posterior soldado. Para llevar a cabo este proceso la nave en cuestión tiene una distribución bien delimitada. Las dimensiones de la parcela son aproximadamente 144 m de largo por 96 m de ancho, y las de la nave industrial son de 60 m de largo por 30 m de ancho con orientación Oeste.

En la nave se pueden encontrar las siguientes zonas:

- Descarga de Materia Prima: Lugar donde los camiones dejan las vigas de acero de 12 m desde proveedor.
- Descarga de Producto Terminado: Donde se depositan ya las vigas alveolares finales y listas para ser cargadas y ser llevadas a cliente.
- Almacén de Materia Prima: Espacio reservado para las vigas recién descargadas del camión.
- Almacén de Producto Terminado: Espacio reservado para las vigas ya acabadas y listas para pasar a la zona de carga en el camión.
- Residuos: Donde se depositan vigas que no han sido capaces de ser retocadas y no son válidas para cliente. También los extremos sobrantes de la viga final por su proceso de fabricación se destinan a esta zona. Esta zona está conformada por 4 contenedores de techo abierto de lona (2 por cada zona de residuos) de la empresa UNIT45 (6), ver Figura 16, de 2,5 m de ancho por 12,192 m de largo y 2,896 m de alto. De forma que se vuelque como en la Figura 17. Se disponen de dos zonas distribuidas en la planta de la nave.
- Zona de corte: Lugar reservado para que las vigas sean cortadas.
- Zona de soldadura: Lugar reservado para que las vigas sean soldadas
- Control de Calidad: Espacio reservado para que un porcentaje del lote de fabricación sean revisadas por si se produce alguna no conformidad.
- Retoque: Lugar donde se llevan vigas con alguna conformidad y son reparadas. En caso contrario se manda directamente a residuo.
- Taller de mantenimiento: Lugar donde se encuentran todos los equipos pertinentes para la realización de mantenimientos periódicas para prevención de averías e, incluso, reparaciones para cuando estas ocurran.
- Vestuarios y Aseos: Zona destinada a todo trabajador.
- Oficinas: Lugar de trabajo.
- Primeros auxilios: Zona donde está el equipo necesario en caso de accidentes.
- Centro de transformación: Zona donde se alberga en centro transformación que alimenta a todo servicio de la fábrica.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra el espacio ocupado por cada una de las zonas que conforman la fábrica.

Tabla 2 - Distribución superficial fábrica

<i>DEPENDENCIA</i>	<i>SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)</i>
<i>Descarga Materia Prima</i>	72
<i>Descarga Producto Terminado</i>	72
<i>Almacén Materia Prima</i>	144
<i>Almacén Producto Terminado</i>	144
<i>Residuos</i>	2x72
<i>Zona de Corte</i>	218,5
<i>Zona de Soldadura</i>	218,5
<i>Área de micropicado</i>	23
<i>Control de Calidad</i>	45
<i>Retoque</i>	45
<i>Taller de Mantenimiento</i>	120
<i>Vestuarios y Aseos</i>	72
<i>Oficinas</i>	136,125
<i>Primeros Auxilios</i>	7,875
<i>Centro de Transformación</i>	24

Además, para el desplazamiento de las vigas a lo largo del taller se dispone de un puente grúa de 30 toneladas que cubre todo el ancho de la nave.



Figura 16 - Contenedor para residuos



*Figura 17 - Volcado residuos en contenedor*

### **2.3- Requisitos con el CTE**

En todo momento la nave industrial está cumpliendo la siguiente ordenanza (7),

- Cumplimiento del DB-SE Seguridad Estructural

Evitar que pueda producir fallo en cualquier elemento de la estructura de la nave industrial incluyendo todos los relacionados con la cimentación, los soportes de las vigas, los forjados, los muros de carga u otros tipos de elementos estructurales, y que puedan comprometer de forma directa la resistencia mecánica y la estabilidad de ésta.

- Cumplimiento del DB-SI Seguridad contra Incendios

Debe cumplirse la normativa que hace alusión a aquellos establecimientos de origen industrial, de tal forma que los ocupantes puedan desalojarlo de una forma rápida y segura, que se pueda limitar la extensión del incendio dentro del propio edificio y de edificios colindantes y, además, que se permita la actuación de los equipos de extinción y rescate.

- Cumplimiento del DB-SU Seguridad Utilización

No se debe suponer ningún riesgo con su uso adecuado para las personas que se encuentren en su interior.

- Cumplimiento del DB-HS Salubridad

Debe alcanzarse las condiciones de salubridad y estanqueidad en el ambiente interior y que éste no deteriore el medio ambiente en su entorno inmediato, garantizando una adecuada gestión en toda clase de residuos.

- Cumplimiento del DB-HR Protección Ruido

El ruido percibido no debe poner en peligro la salud de las personas y que permita efectuar exitosamente sus actividades en cuestión.

- Cumplimiento del DB-HE Ahorro energético y aislamiento térmico

Uso adecuado y racional de la energía mínima necesaria para la adecuada utilización y ejecución de la actividad de la fábrica.

## 2.4- Visualización espacial y geográfica de la nave industrial

A continuación, se muestra en la Figura 18 y Figura 19 el renderizado de la nave industrial donde se realiza todo el proceso comentado. Además de mostrar lo que es únicamente la nave se puede observar del espacio destinado a que los camiones que llegan y se marchan puedan maniobrar sin problema alguno. También a mano izquierda se aprecia un aparcamiento destinado a toda la plantilla tanto para los trabajadores de planta como los de oficina. En la Figura 20 se aprecia el interior con el puente grúa.



Figura 18 - Visualización 3D nave industria



Figura 19 - Vista en planta según plano catastral



Figura 20 - Zona interior de la nave con el puente grúa

## 2.5- LAYOUT del proceso

Se refleja el proceso que sigue el producto por toda la fábrica desde su recepción hasta su carga en el camión y ser llevado a cliente. El proceso que sigue puede expresarse siguiendo una serie de pasos en los cuales hay puntos estratégicos de importantes tomas de decisiones.

1. Recepción de las vigas y chapas, circulares y hexagonales, para operaciones de macizado en punto de descarga.
2. Vigas son llevadas con el puente grúa al almacén de la materia prima del proceso.
3. Con la ayuda de un puente grúa se trasladan a la zona donde son cortadas según el patrón que interese. Luego se desplazan ambas partes a su posición para ser ya soldadas y los extremos sobrantes se cortan y son enviados a las zonas laterales de residuos.
4. Las vigas son soldadas por la zona del alma que sea necesario con tecnología SAW (arco sumergido).
5. Para operaciones de macizado se enviarán las chapas de tipología hexagonal o circular desde el almacén de materia prima a la zona de soldado.
6. Tras el proceso de soldadura hay que garantizar la trazabilidad de cada una de las vigas a través un datamatrix por medio de un micropicado.
7. Una vez que sale de la zona de micropicado hay varias situaciones:
  - a. Son enviadas directamente al almacén de producto terminado.
  - b. Por protocolo al tener que ser un porcentaje de la producción ser revisado por control de calidad se enviará a esta dependencia. Aquí se realizan los ensayos pertinentes al cordón de soldadura en especial. Puede ocurrir dos situaciones:
    - i. La pieza es considerada como 'BUENA' y se envía al almacén de producto terminado.
    - ii. La viga tiene alguna imperfección que debe ser corregida y se manda a retocar.

1. Si la viga no puede ser corregida en zona de retoque se envía a residuo directamente.
2. Si se consigue reparar se vuelve a enviar a zona de calidad.
  - a. La pieza retocada pasa satisfactoriamente el control de calidad y se manda al almacén de producto terminado.
  - b. Si no pasa este segundo control de calidad se concibe como una viga 'MALA' y se envía esta vez a residuos.
8. Desde el almacén tienen que llevarse a la zona de descarga de producto terminado desde la que se cargará en el camión que se encuentra esperando y llevar el producto al cliente.
9. La chatarra generada durante el proceso se vende siendo esta una segunda fuente de ingresos.

Este proceso se ve reflejado gráficamente en la Figura 21 con la ayuda de un plano en el que figuran cada una de las zonas de la fábrica y su disposición en ella.

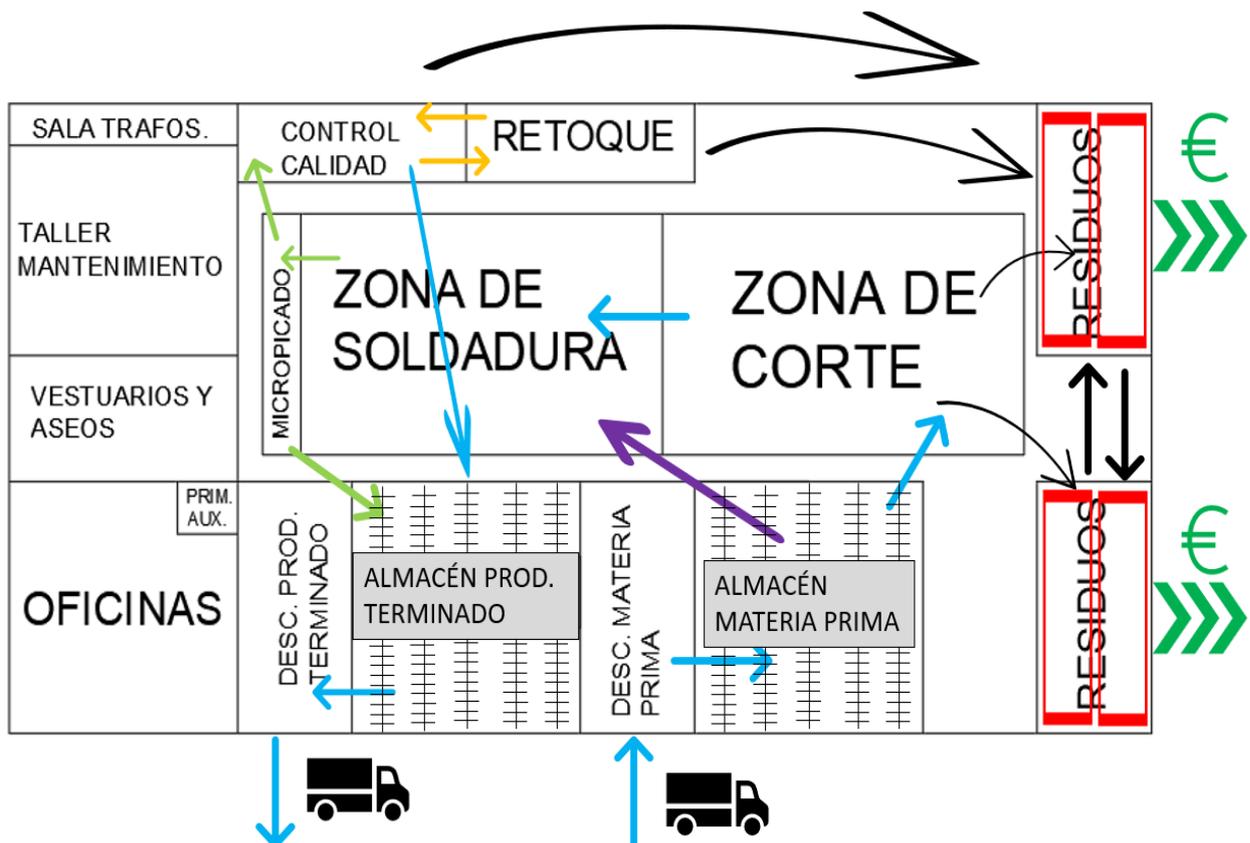


Figura 21 - LAYOUT del proceso

### 3. LÍNEA DE PRODUCTOS DE FABRICACIÓN

#### 3.1- Viga alveolar

##### 3.1.1- Proceso de fabricación

Para dar como resultado a una viga de este tipo hay que partir inicialmente de una viga inicial de perfil tipo IPN y a partir de aquí se define un proceso que consta de diez fases.

##### 1. Definición del patrón del alveolo

Existen una gran multitud de patrones, ver Figura 22, siendo algunos más comúnmente visibles que otros. Se pueden definir alveolos hexagonales, circulares, octogonales, ovalados, sinusoidales e, incluso, asimétricos. Éstos son algunos del abanico que podrían aparecer. Con esta tipología de viga lo que se busca es que se llegue a usar de manera más eficiente el material que se usa dando una mejoría a las propiedades mecánicas de la viga ya que se puede llegar a incrementar hasta en un 40 % el momento resistente.

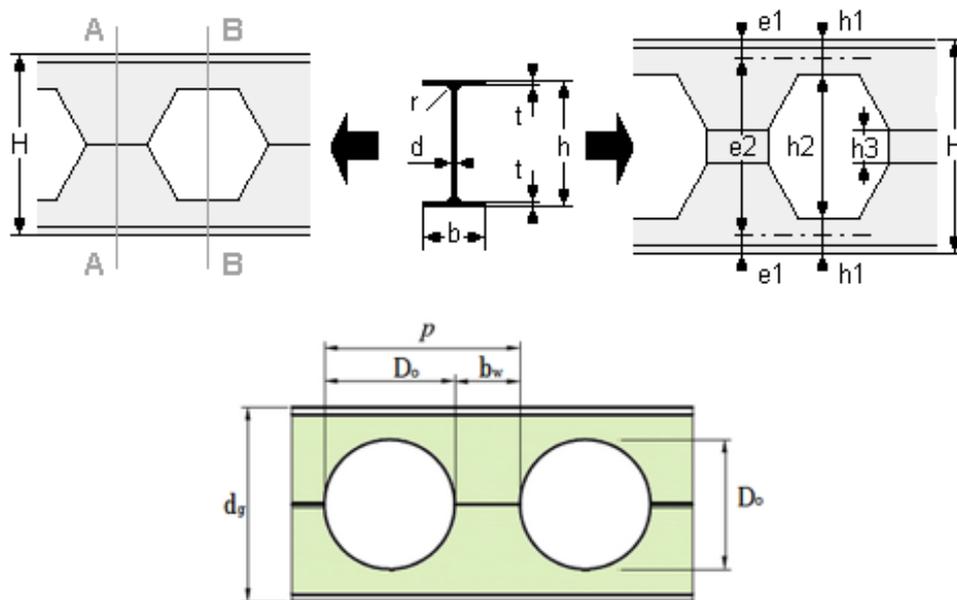


Figura 22 - Ejemplos de alveolos de viga Boyd

##### 2. Corte de la viga

Una vez que ya se tiene definido corte que se quiere seguir se debe introducir en el sistema de la máquina de corte que lo realizará de forma autónoma, ver Figura 23, proporcionando un corte limpio.

Existen dos métodos de corte muy interesantes que son el oxicorte y el corte por plasma. A continuación, se verá una breve y concisa explicación de éstos.

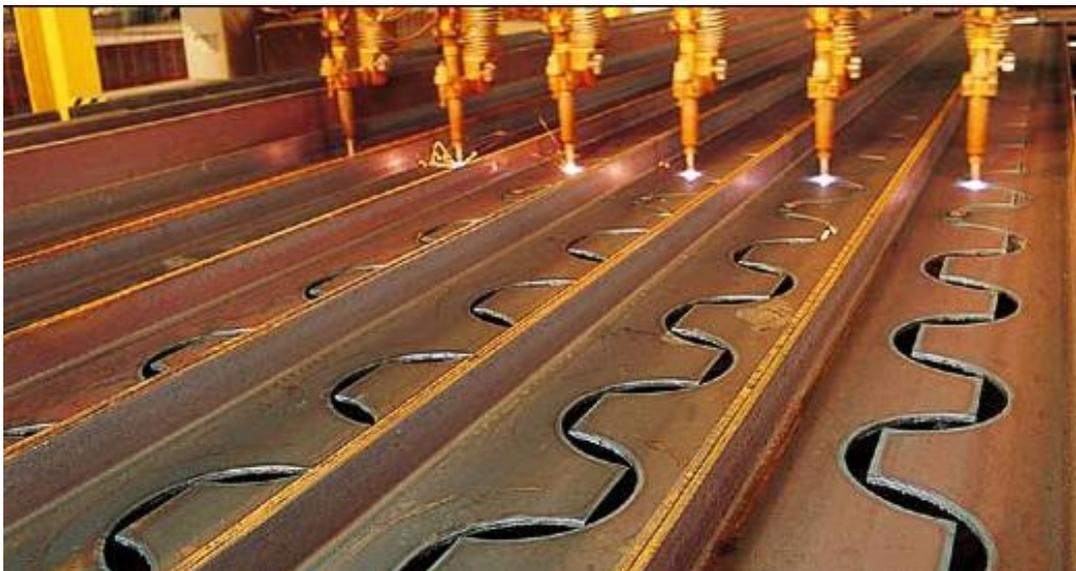
- Oxicorte: es una técnica de corte (8) a partir de un soplete que es alimentado por un acetileno y también por oxígeno, lo que hace que se genere una reacción que libera una gran cantidad de energía gracias a la oxidación del hierro al estar en contacto con el oxígeno. No puede llevarse a cabo a menos que cumpla que la reacción que da lugar es

exotérmica y que el óxido formado tenga una temperatura de fusión menor a la del metal. Estas condiciones en general suelen darse correctamente, pero en el caso de alguna aleación aparecen ciertas complicaciones para llevar a cabo la operación correctamente.

El soplete que lleva a cabo que sea posible esta técnica consta de dos elementos fuertemente diferenciados. El primero, el soplete ordinario, se encarga de elevar la temperatura de la llama de calefacción a una temperatura de 1.300°C, mientras el segundo, que es el dispositivo de aporte de oxígeno se emplea para que el proceso de oxidación se lleve a cabo. Suele denominarse oxígeno de corte.

- **Plasma:** técnica (9) que utiliza un chorro de gas ionizado a alta temperatura que conforma el plasma y que es enviado a través de orificio de constricción. Que sea a alta velocidad hace que se conduzca la electricidad desde la antorcha de plasma a la viga que interesa que se corte. Se consigue un calentamiento sobre ésta que acabará fundiendo. Suele emplearse para el corte de acero de no más de una pulgada de espesor. En casos contrarios se emplea la técnica de oxicorte.

Se pueden subdividir en dos grupos en función del valor de frecuencia con el que trabaje. Éstos son de baja frecuencia y de alta. Las de alta frecuencia destacan ya que debe haber contacto de la antorcha con el metal para que se genere el arco, lo que provoca la aparición de un campo electromagnético pudiendo llegar a alcanzar los tres metros de diámetro y con una posible afectación a componentes electrónicos que encuentre a su paso. Por otro lado, las cortadoras de baja frecuencia generan un arco piloto, lo que permite desfogar el arco sin la necesidad de estar en contacto con el metal.



*Figura 23 - Proceso corte de viga*

El taller dispone de una cortadora con tecnología de corte por plasma y que se apoyará para los procesos de retoque de manera manual con soplete con un combustible de gas propano, butano y gas natural junto a oxígeno.

### 3. Desplazar

Una vez que se tienen las dos partes de la viga cortada se procede a ser desplazadas (10), ver Figura 24, a la zona adecuada teniendo así ya la forma de la viga alveolar definitiva. Este proceso se hace de forma automática por la máquina.

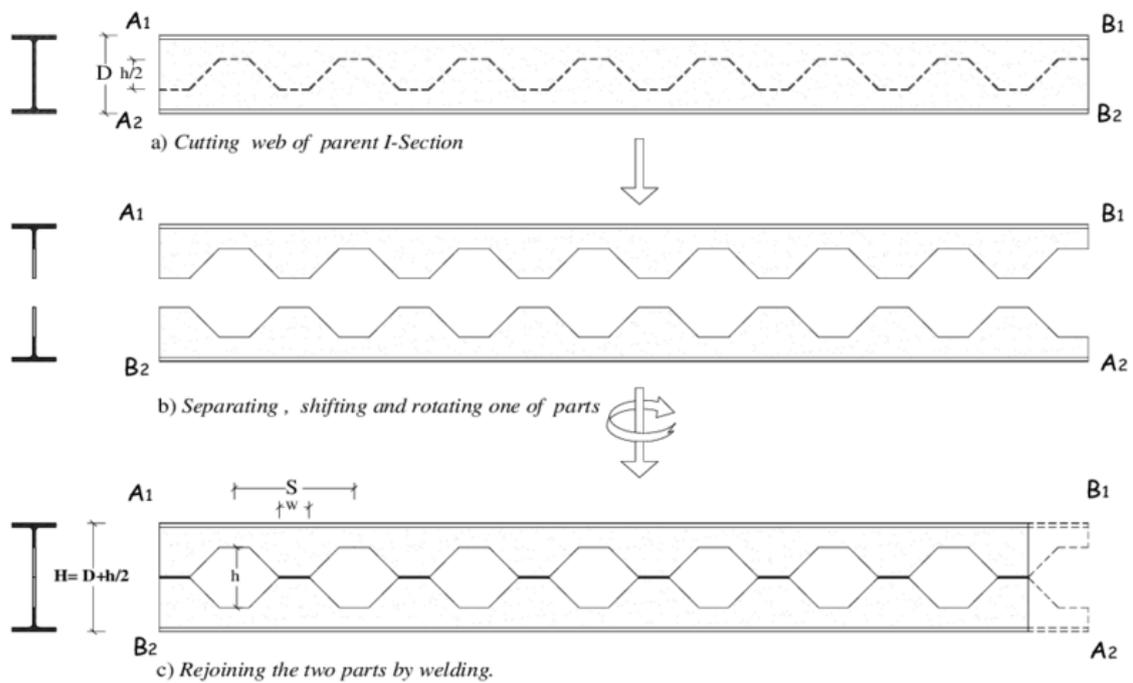


Figura 24 - Proceso constructivo que sigue la viga alveolar

Hay ciertas tipologías de vigas que no solamente vale el desplazar ambas partes de la viga ya cortadas, sino que deben introducirse una serie de pletinas, ver Figura 25, a donde se sueldan entre medias dando lugar a geometrías tipo como las octogonales.

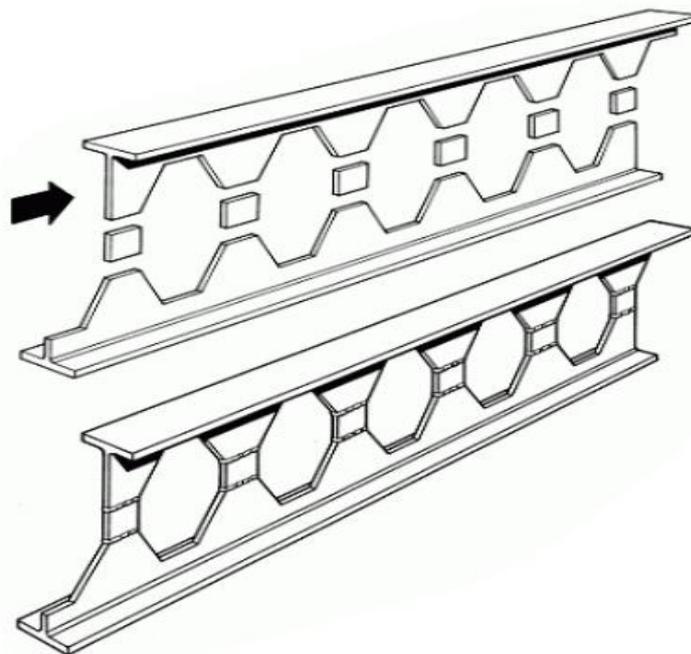


Figura 25 - Proceso viga alveolar octogonal

También es posible dar con vigas alveolares de sección variable (11), ver Figura 26. Éstas se obtienen de la misma forma que las comentadas previamente, pero al patrón de corte (o línea de corte) se le hace girar un cierto ángulo tal que ahora es inclinado y no paralelo a las alas del

perfil. Luego se desplazan y se da la vuelta a una de las dos partes. Finalmente se sueldan de misma manera que anteriores.

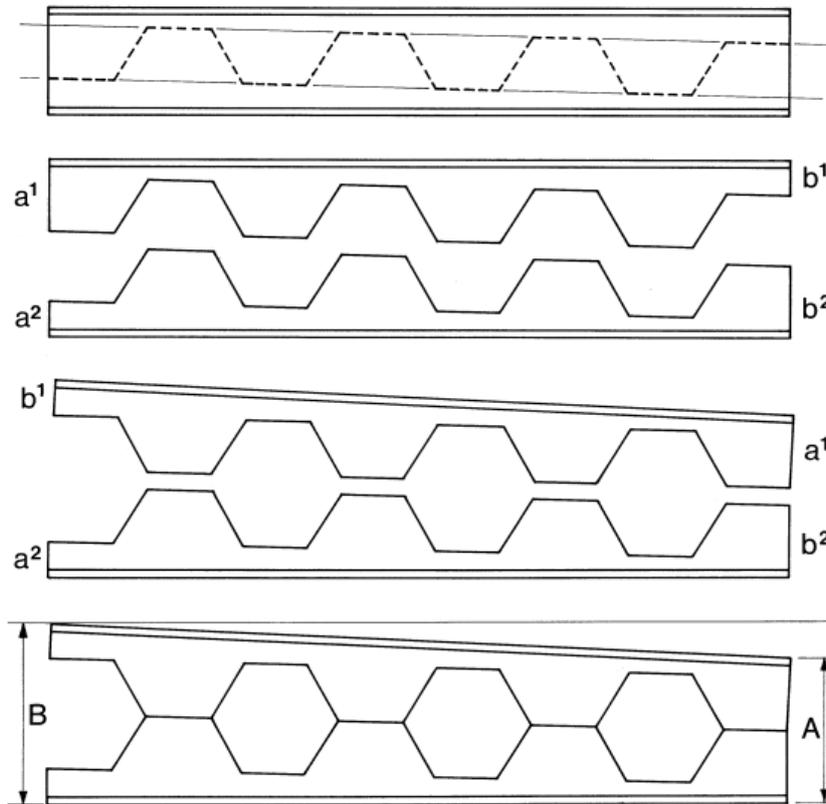


Figura 26 - Proceso constructivo viga alveolar sección variable

#### 4. Soldado de ambas partes y posible macizado

El proceso de soldadura requiere previamente una preparación de las aristas a ser soldadas. Éstas deben mantenerse secas ya que cualquier punto con cierta presencia de humedad puede acarrear que aparezcan burbujas sobre el cordón de soldadura, provocando así una deficiencia en las propiedades mecánicas de la viga.

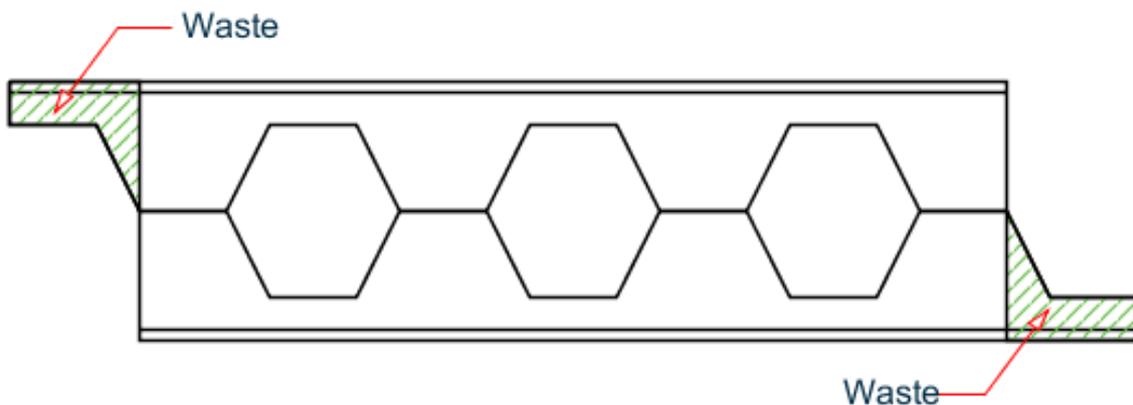
La Figura 27 muestra el proceso de retoque que se realiza manualmente.



*Figura 27 – Retoque de defecto*

#### 5. Retirada de partes sobrantes

Para finalizar el proceso de fabricación de una viga alveolar hay que retirar las partes extremas de la viga o sobrante. La Figura 28 deja bien reflejado lo que en esta fase se realiza.



*Figura 28 - Extremos sobrante viga tras ser soldada*

#### 6. Saneamiento y preparación uniones

El saneamiento tiene a finalidad de retirar la capa que se genera tras la soldadura. Ésta es denominada escoria o material vítreo. Una vez se retira ya queda el cordón de soldadura limpio (ver Figura 29).



Figura 29 - Escoria cordón soldadura

### 7. Adecuación de los extremos de la viga

Los extremos de las vigas en gran multitud de ocasiones requieren un proceso adicional que puede ser generalmente de dos tipos: soldado de placas de testa y la realización de taladrado en alas y/o alma (en cualquier punto de la viga) como se observa en la Figura 30. En el taller las vigas salen sin ninguna de estas adecuaciones a menos que el cliente lo pida bajo encargo explícitamente.



Figura 30 - Preparación uniones (IZQ: Placa de testa / DCHA: Ala y alma atornillada)

### 8. Control de calidad de uniones soldadas

Las metodologías que se siguen en el taller para la inspección de las uniones soldadas son: perfilador laser que se encuentra integrado a la soldadora, inspección visual y líquidos penetrantes. Estos últimos son los que se llevan a cabo en la zona de control de calidad.

Todas las medidas se ven explicadas con detenimiento más adelante (ver 3.1.3).

### 9. Pintado

Una de las acciones más preocupantes para las estructuras metálicas es el fuego, además de fenómenos de corrosión. Es por ello por lo que la viga es sometida a un proceso en el que se aplica pintura intumescente sobre el perfil (ver Figura 31). Según la resistencia al fuego que se requiera la capa aplicada será de mayor o menor espesor. Este taller subcontrata esta etapa, luego en el taller no se contempla esta etapa del proceso.



Figura 31 - Viga pintada

## 10. Trazabilidad

En todo momento cada viga que salga del taller debe estar identificada y registrada en el servidor. Es por ello que una vez obtenida debe ser sometida a la generación de un Datamatrix, ver Figura 32, través de un operario con una máquina con tecnología de micropercusión. Se queda grabado el Datamatrix que es un código QR individualizado a esa viga. Con éste es posible identificar cada detalle asociado a la viga (fecha, hora, etc.) en el caso que ocurra algún problema con la viga o vigas implicadas.



Figura 32 - Datamatrix

### 3.1.2- Maquinaria

Maquinaria tanto para proceso de corte como para soldadura.

#### 3.1.2.1- Máquina de corte

En la fábrica se dispone de una máquina de corte con multi cabezal, lo que quiere decir que se pueden estar cortando varias vigas en el mismo instante. Todo ello gracias al sistema de control numérico por computador (CNC).

La máquina funciona por plasma. El modelo es 'PFP-4010' de la marca comercial de origen chino PIONEER (12) y se puede observar en la Figura 33. Con ésta no hay problema en ningún momento en cuanto a longitud de viga se refiere ya que el carro que lleva (donde van apoyadas

las vigas) es de un total de 20 m y las vigas que se tratan son de 12 m. Las velocidades de corte son elevadas pudiendo tener una capacidad de producción considerable.

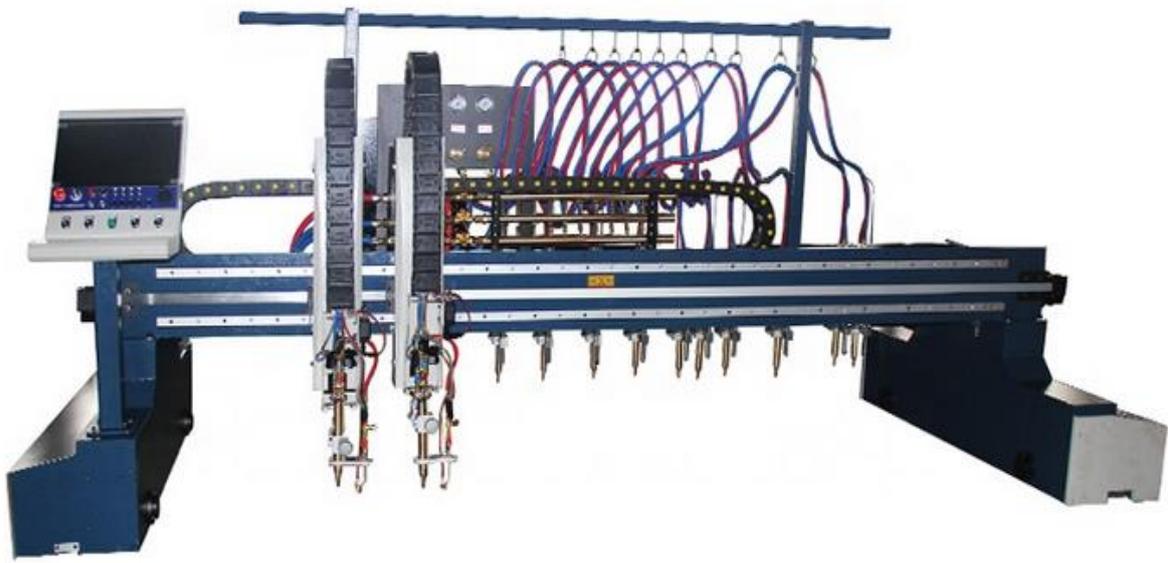


Figura 33 - Cortadora PIONEER PFP-4010

Algunas de sus características más generales es su alta velocidad de corte que puede alcanzar valores desde 500 mm hasta los 3500 mm por minuto. Tiene una potencia igual a 5,5 kW. A continuación, se refleja una tabla explicativa, ver Figura 34, con los aspectos técnicos que se acaban de comentar.

Dimensions:	4550x1980x1980	Motor Type:	SERVO MOTOR
Condition:	New	Place of Origin:	Shandong, China
Brand Name:	Pioneer	Model Number:	PFP-4010
Voltage:	3 Phase 380V/50HZ + Single Phase 220V 50Hz	Rated Power:	5.5KW
Dimension(L*W*H):	Effective cutting range is 3150x8000mm	Certification:	CE & ISO
Weight (KG):	1500KGS	Year:	2021
Warranty:	1 Year	After-sales Service ...	Video technical support, Field maintenance and repair service...
Key Selling Points:	High-accuracy	Applicable Industri...	Building Material Shops, Machinery Repair Shops, Manufactur...
After Warranty Serv...	Video technical support, Online support, Spare parts, Field ma...	Local Service Locat...	None
Showroom Location:	None	Marketing Type:	New Product 2021
Machinery Test Re...	Provided	Video outgoing-ins...	Provided
Warranty of core co...	1 Year	Core Components:	Gear, Gearbox, PLC, Engine, Servo Motor, CNC Controller Syst...
Plasma Cutting Pre...	±1.0mm	Cutting Model:	Plasma and flame
Flame Cutting thick...	Flame cutting thickness 6-400mm	Plasma cutting thik...	According to plasma power Amp
Plasma Cutting spe...	500-3500mm/min	Flame cutting Speed:	50-1200mm/min
CNC controller syst...	Shanghai etc System	Nesting Software:	FastCAM or StarCAM or Pronest etc
Torch Height Contr...	HYD THC or Sensor THC etc	Machine Rail Spec/...	30/38/43/50 kgs/m + 2m/sections

Figura 34 - Parámetros técnicos de PIONEER PFP-4010

El sistema de corte que se emplea para el taller de retoque, tras el control de calidad, es de técnica manual (13), ver Figura 35. A partir de una tecnología de soplete con un combustible de gas propano, butano y gas natural junto a oxígeno se es capaz de cortar espesores de hasta 300 milímetros, lo que es más que suficiente para la actividad desarrollada.



Figura 35- Equipo corte manual

### **3.1.2.2- Máquina soldadura**

El proceso de soldadura es llevado por dos máquina de doble cabezal de soldado automático (14). La máquina emplea un engranaje convertidor de frecuencia para así poder controlar la velocidad y garantizando que su funcionamiento sea estable. Dispone del equipo de centrado para que la pistola genere el cordón de forma precisa y automática. Emplea arco sumergido (SAW).

La máquina es la denominada 'LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine' de la casa comercial FENGWEI MACHINERY (ver Figura 36), que coincide con la de la máquina de corte. Permite que se pueda trabajar sin paradas, es decir, que trabaje las 24 horas del día durante los 7 días de la semana.



Figura 36 - LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine

Las especificaciones técnicas, ver Figura 37, que ofrece son las siguientes,

规格型号	Type	LHA
腹板高度 ( mm )	Web Height (mm)	200-1500
翼板宽度 ( mm )	Flange Plate Width (mm)	200-800
焊机型号	The type of welding machine	MZ-1000型自动埋弧焊机 2 台 2 MZ-100 automatic submerged arc
焊接形式	The form of welding	船形焊 Boat Welding
焊接速度 ( m/min )	The welding speed	0.15-1.5
返程速度 ( m/min )	The returning speed	1.5
轨距 ( mm )	Rack distance	4000
气源压力 ( Mpa )	The pressure of air supply	0.2-0.8
整机功率 ( KW )	The power of complete machine	10 ( 不含焊机 ) Without welding machine

Figura 37 - Parámetros técnicos LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine

Al igual que para el proceso de corte se emplea una tecnología de tipo manual de soldadura, ver Figura 38, a partir de oxiacetileno para el taller de retoque. La unión entre elementos vendrá debido al calor que se da en la combustión de oxígeno con acetileno. El aporte de material no es necesario, aunque no habría problema alguno si se aportase.

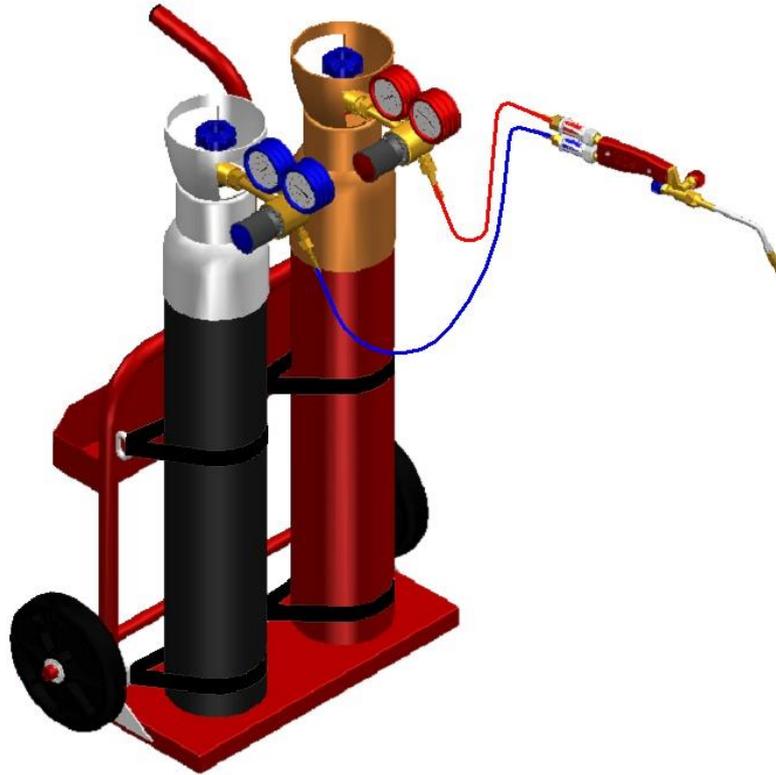


Figura 38 - Equipo soldadura manual

### **3.1.2.3- Máquina de micropicado**

Empleo de una máquina manual para efectuar en la etapa final y previo almacenado de la viga ya acabada de un marcaje para sea trazable, la viga, en cualquier momento. El modelo de máquina a emplear, ver Figura 39, es el *Sistema de Marcado Portatil E-Touch* de la marca SIC Marking (15). Sus especificaciones técnicas se ven en las Figura 40.



Figura 39 - Marcado Portatil E-Touch

e-touch	
Ventana de marcado	60 x 25 mm
Dimensiones Externas	210 x 125 x 220 mm
Peso	1,9 kg
Material de la punta	Carburo de Tungsteno
Longitud del cable	5 m
Controlador e1	
Pantalla LCD	Color HD, 95 x 55 mm
Cambio de orientación de la pantalla	Si, adaptación a diferentes aplicaciones de columna
Teclado	Pantalla Táctil
Poder	100 Watt
Fuente de Poder	18V / 3A
Entradas / Salidas	Jack socket
Software para PC	Creación, respaldo y transferencia de archivos
Memoria	>100 Mo
Variabes	alfanuméricos, incrementales, de tiempo, código de barras
Logos	Descarga desde PC o USB
Fonts	Arial, Comic, Comic_B, Courier, OCR, OCR_BOLD, OCRA, 4x6
Lenguaje	17 Disponibles
Punta	Angular, radiante, lineal, radial, datamatrix, logo
Tamaño de caracteres	Desde 1 mm hasta 60 mm (limitado a la ventana de marcado)
Fuerza de impacto	9 niveles ajustables
Profundidad	Hasta 0,3 mm (dependiendo del material)
Resolución entre impactos	variable, 0,22 mm MAX
Password	2 niveles de seguridad

Figura 40 - Características mecánicas y técnicas

### 3.1.3- Control de calidad

Durante el proceso productivo se lleva a cabo una serie de inspecciones sobre el control de la soldadura. Todos ellos serán ensayos no destructivos o también conocidos bajo sus siglas “END’s”. Sobre la totalidad de las vigas que se fabriquen se les somete a un estudio con tecnología láser que proporciona todas las características del cordón de soldadura (espesor, densidad, continuidad, ...) con un perfilador láser. Otro volumen aleatorio de vigas fabricadas será sometido, a mayores del perfilador, en el taller de retoque y control de calidad, a inspección visual y a líquidos penetrantes.

- Perfilador láser 3D “Gocador 250”

Dispositivo (16) que se encontrará ubicado tras la salida del robot de soldadura ‘LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine’ y que hará un barrido total a los cordones de soldadura recogiendo valores de volumen, longitud, cordón entrecortado, anchura, como también parámetros como la porosidad y/o grietas superficiales.

- Inspección visual

El control visual por parte del operario acto seguido del propio control del perfilador láser servirá para pasar un segundo control de calidad asegurando que si ocurre algún fallo en el control anterior un operario sea capaz de solventarlo. Con él se obtiene un resultado rápido sobre la posible calidad con la que la unión soldada se ha realizado. Es la técnica de más bajo coste. Para que cobre cierta validez dicho ensayo debe ser inspeccionado por un técnico con cierta cualificación. Los operarios requieren de una formación certificada de que son aptos para desempeñar dicha posición.

○ Líquidos penetrantes

Un método bastante eficaz y económicamente de bajo coste es el análisis por medio de líquidos penetrantes (17). Especialmente pensado para las situaciones en las que una viga ha pasado por la zona de retoque para ser reparada y necesite un ensayo para dar la certificación de calidad de esta. O bien, ha sido seleccionada dentro del film de producción arbitrariamente para un análisis extra, siendo éste el tercero que habría pasado ya. El procedimiento es a partir de un líquido penetrante (*ARDROX 996 P*) que se aplica sobre la unión soldada, de color rojizo en general que luego será retirado con un líquido removedor (*ARDROX 9 D1B* o *ARDROX 9 D1*). Una vez limpia la superficie se hace uso de otro líquido revelador que muestra el lugar de las discontinuidades de la unión ya que éste aprisiona el líquido penetrante, que se aplicó anteriormente, sobre el revelador mostrando dichas discontinuidades en color rojizo. Únicamente muestra las discontinuidades a nivel superficial por lo que habrá que hacer uso de otros métodos para ver el estado interno de la unión. Además, la zona antes de ser estudiada debe estar perfectamente limpia de grasas, óxidos, aceites, escorias, entre otros. En la Figura 41 se aprecia el procedimiento de éstos.

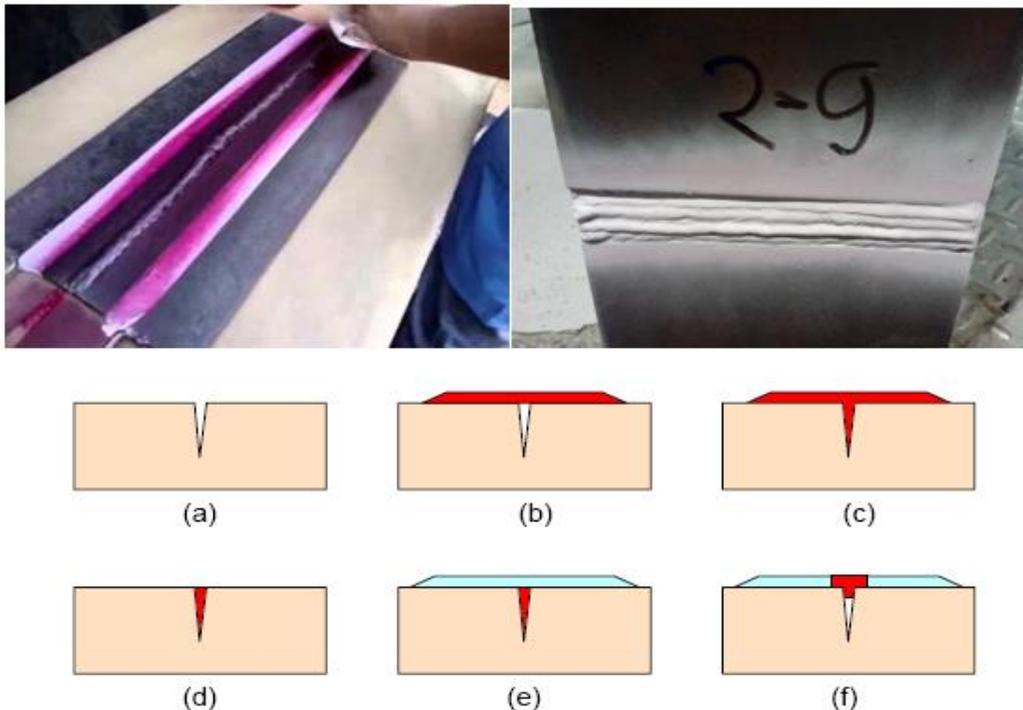


Figura 41 - Procedimiento método de líquidos penetrantes

### 3.1.4- Aplicaciones

Las aplicaciones que se tienen con esta tipología son numerosas entre las que se pueden llegar a encontrar de forma más común,

- Situaciones en los que las sollicitaciones por momento flector sean elevadas.
- Paso de instalaciones (conductos, tuberías) como se muestra en la Figura 42.

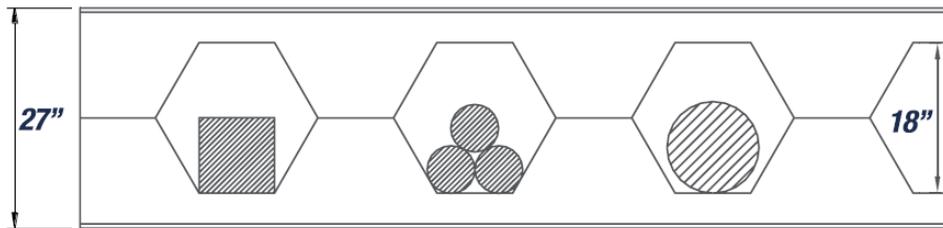


Figura 42 - Paso de diversos tipos instalaciones

- Asimétricas para forjados mixtos como en la Figura 43.

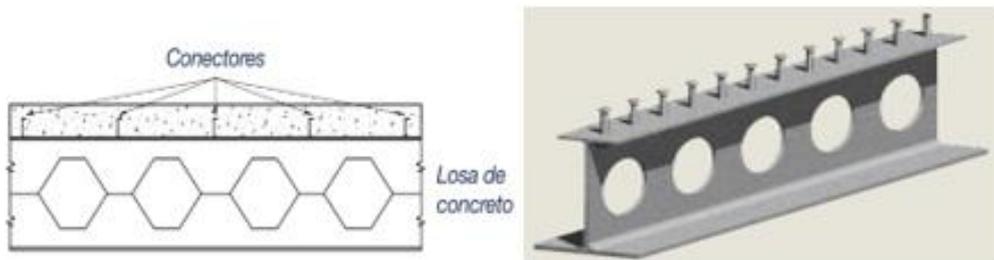
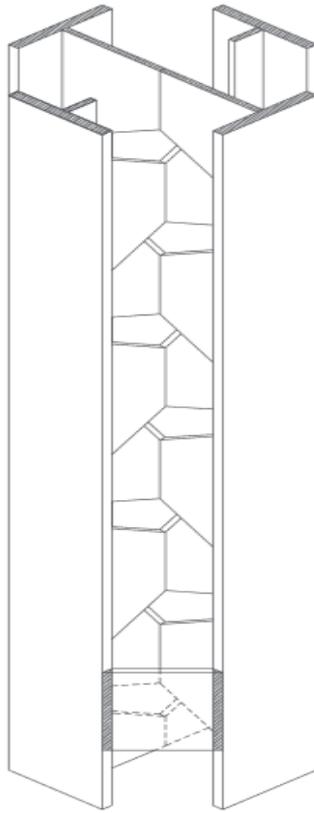


Figura 43 - Vigas colaborativas con hormigón

- Sustituir vigas estándar por este tipo que es menos pesado.
- Salvar grandes luces.
- Elementos de cubierta.
- Rehabilitaciones (Conservación de patrimonio arquitectónico, para consolidar y modernizar edificios antiguos usando este tipo de estructuras ligeras).
- Pilares y elementos de fachada (elegancia).
- Pilares con muy altas inercias. Gracias a los huecos que dejan este tipo de vigas se puede llegar a situar cada una de las partes de una nueva viga perpendicularmente al alma de la ya fabricada y soldar in situ la nueva incorporada. Para ya poder fijar y que adopte la configuración de pilar con chapas cuadradas se sueldan a ambas alas de las dos vigas (ver Figura 44).



*Figura 44 - Configuración en forma de pilar*

- Para aparcamientos.
- Estructuras tipo 'Offshore' (por su bajo peso y posibilitar paso de canalizaciones).



## 4. MERCADO

La ubicación, ver Figura 45, de la nave es un sitio puramente estratégico ya que se encuentra en un enclave con una conexión directa con varias ciudades de interés. Estas ciudades son Valladolid, Salamanca y Zamora. Es interesante ya que van a ser los proveedores principales de acero ya en forma de vigas de la fábrica. El proveedor de Valladolid es un almacén de Hierros y Aceros de Santander s.a. (18) y el de Salamanca y Zamora es HIERROS MANUEL VIDAL (19).

También se encuentra próximo a Madrid, lugar muy importante ya que ahí se hayan grandes multinacionales del sector de la construcción que, a su vez, en caso de fallo de cualquiera de las del entorno próximo y cercano, pueden dar soporte cuando se necesite.

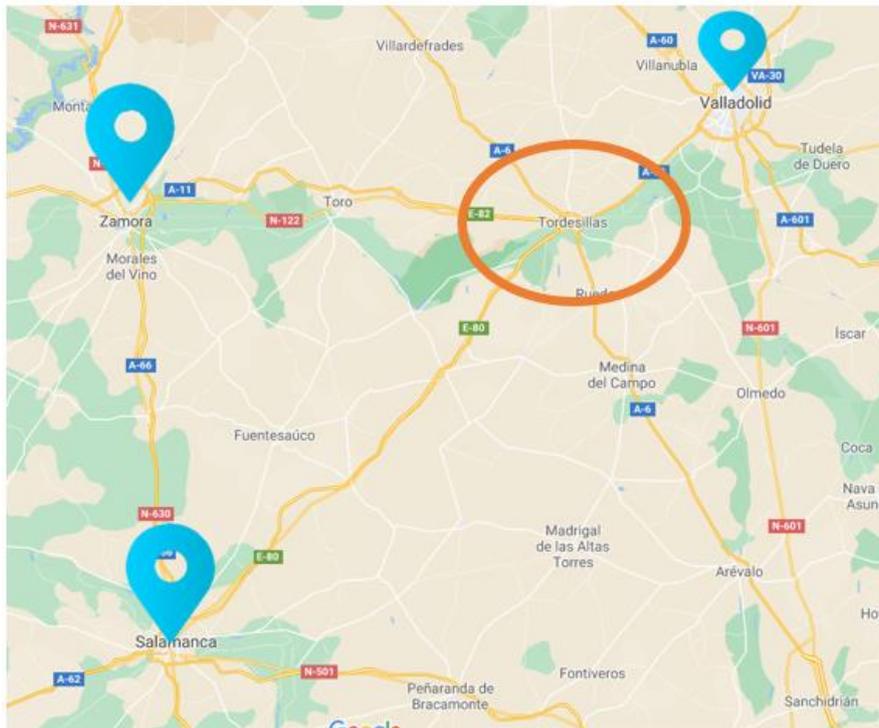


Figura 45 - Enclave estratégico de la nave

El abrirse a un nuevo mercado como es el de la fabricación de vigas especiales a través del proceso de soldado de chapas es una apuesta sobre seguro ya que en la comunidad de Castilla y León apenas es factible encontrar a alguien que sea capaz de este tipo de fabricación. Generalmente un posible motivo para ello es la alta inversión que habría que abordar.

Una de las empresas con una cierta reputación ya consolidada es RENEDO METAL (2) ubicada en Albelda de Iregua, en La Rioja. En caso de que una empresa necesitase de este tipo de recursos acudiría a ésta. Es la empresa con actividad en este campo que posiblemente se encuentre más próxima. También es cierto que Madrid, como bien se ha mencionado previamente, es la capital y donde un gran número de empresas del sector de construcción residen y tienen sus fábricas, luego sería otro punto estratégico al que poder solicitar.

Es por esto que instaurarse con una nave industrial donde se fabrica la tipología de perfil que al cliente le interesa y, además, siguiendo una tipología aligerada podría llegar serpionera o de los escasos sitios que trabajan con ello.

También, otro punto interesante que no es común dar con ello es el proceso de contraflechado o arqueado que se le aplica a la viga aligerada para contrarrestar efectos tras su puesta en servicio y que tan alta demanda llega a tener. Son pocas las empresas que ofrecen este tipo de servicio adicional.

Una de las principales empresas dedicadas a este tipo de configuraciones de vigas aligeradas es ArcelorMittal (20). Sus centros se concentran básicamente en Asturias, País Vasco y Madrid como se aprecia en la Figura 46, luego esta oportunidad en la que se tiene un proveedor cercano y una extensión tan grande en Castilla y León en la que no hay apenas actividad de fabricación de vigas aligeradas armadas y además de su propuesta del curvado de la misma por un precio apenas superior es un buen comienzo y una apuesta de futuro para el taller ubicado en Tordesillas para expandirse y hacerse un nombre en el sector siderúrgico.



Figura 46 - Mapa de las plantas industriales de ArcelorMittal en España

Son varios los campos que abogan por tipologías estructurales que permitan que el volumen de espacio dentro de sus recintos sea lo más diáfano posible como son las grandes superficies como los grandes centros comerciales como también los centros deportivos.

Tales son las propiedades estructurales que se buscan como también el aspecto estético que cada vez va cogiendo más peso. La nueva línea de negocio cubre estos dos aspectos.

Principalmente en los centros deportivos han experimentado un incremento de abonados muy alto y, en especial, la actividad deportiva del crossfit. Cada vez son más los adeptos que comienzan en este deporte. Con esto viene la apertura de mayor número de gimnasios o 'boxes' que portan la característica de que en su gran mayoría desatan su actividad en naves industriales (ver Figura 47 y Figura 48).

Al verse incrementado el número de afiliados a nivel nacional en este deporte los recintos son cada vez mayores. Por ello el plantear estructuras que salven grandes luces y con un coste más

reducido se potencia el diseño de boxes con tipologías de vigas aligeradas y especiales, como aligeradas curvas. Para un mismo valor de carga son capaces de salvar luces de hasta 50 m y con un coste más reducido.



Figura 47 - Box oficial CrossFit de Reebok One

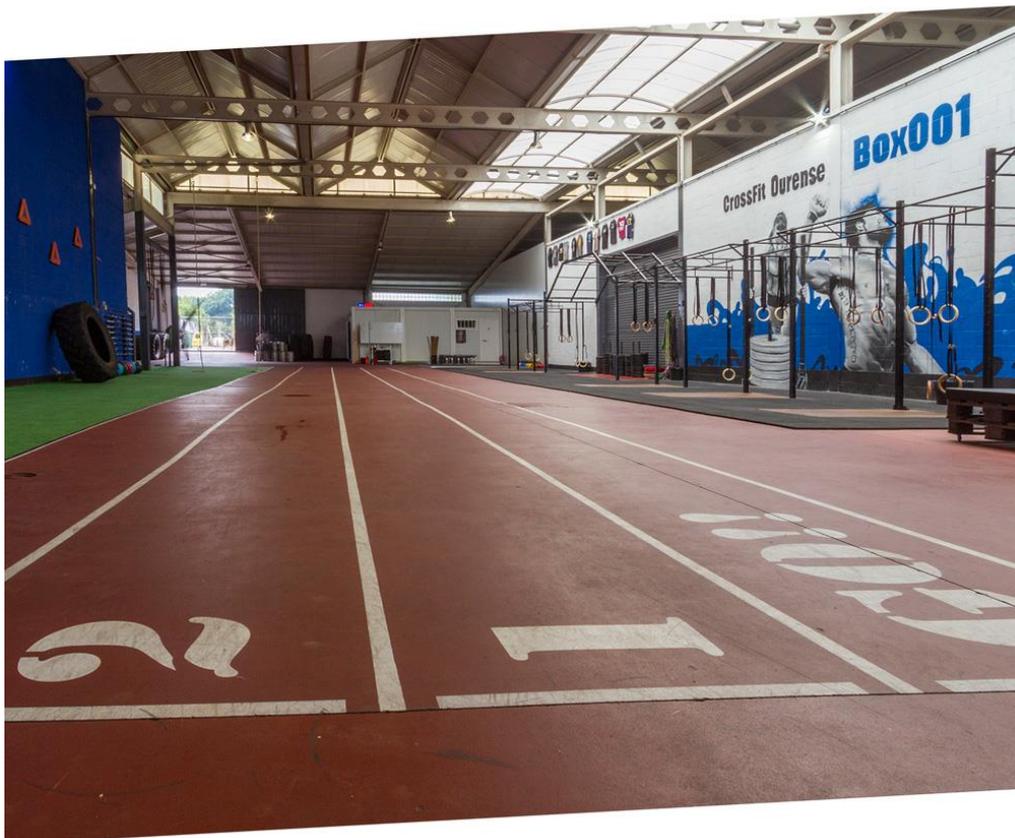


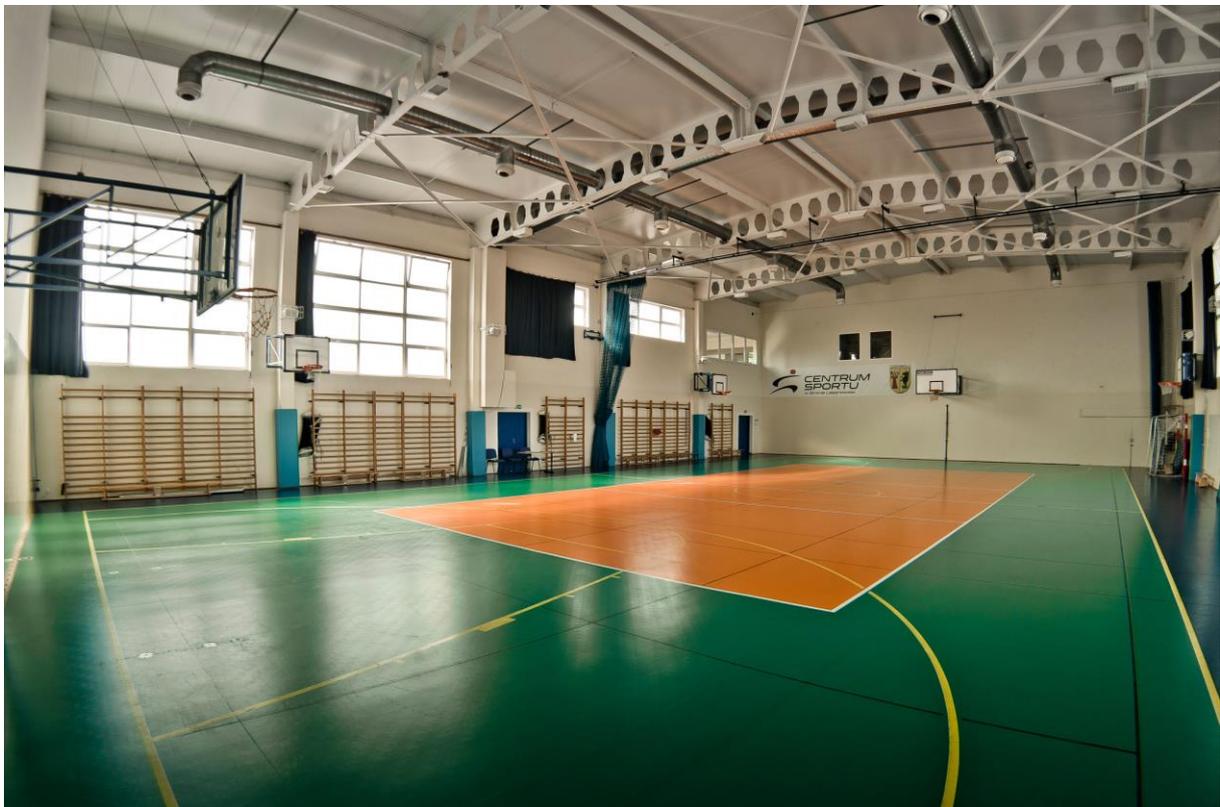
Figura 48 - Vigas aligerada en box de CrossFit Ourense

La evolución de estos centros ha sido y sigue siendo notable. En 2013 los centros oficiales de CrossFit abiertos por *Reebok* (21) eran de 78 únicamente, la Figura 47 es de aquel entonces, y alcanzando cifras de cierre anual (21) de 386 centros en 2018, de 498 en 2019 y 508 centros en

2020. Poco incremento habido este último año debido a la pandemia por la CoVid-19. Actualmente se datan 521 y con una ferviente previsión de aproximadamente 540 centros oficiales.

Todos estos datos se refieren a los centros oficiales que se registran como CrossFit. Se deben tener en cuenta el resto de las instalaciones con apertura de gimnasio con zona habilitada para ejercer este deporte, pero sin este sello.

Ambos, oficiales y no oficiales, tienen la característica común de ejercerse comúnmente en naves de estructura metálica luego la nueva línea de negocio acapararía ambos terrenos. Además, generalizando a instalaciones deportivas se le incluyen todo polideportivo (ver Figura 48) ya que portan, generalmente, la característica de ser construidos con estructura metálica y tener luces especialmente amplias y en muchas ocasiones ser muy visibles e impactantes por sus usuarios por el nivel estético que portan, como se puede apreciar en la siguiente imagen, ver Figura 49.



*Figura 49 - Estructura polideportivo de viga armada presentando curvatura*

## 5. NUEVA LÍNEA PRODUCTIVA

La fábrica se decanta por abrir su nicho de mercado con la incorporación de una nueva gama de productos que será la producción de vigas aligeradas armadas y vigas contraflechadas, así como vigas especiales como son las vigas curvas.

### 5.1- Viga aligerada armada

#### 5.1.1- ¿Qué son?

Son estructuras de acero (22) que se generan a través de la soldadura de varias chapas entre sí generando tanto las alas como el alma de esta nueva sección, ver Figura 9. Esto confiere que se lleguen a cumplir en todo momento las necesidades requeridas del cliente. En el caso de que se sea necesario un aporte extraordinario a la estructura se sitúan una serie de rigidizadores a lo largo de ella. Para que sean aligeradas previo al soldado de las chapas sobre aquella que adopte el rol de ser el alma de la viga se la somete al proceso de corte de los alveolos.

Los perfiles que suelen darse con este tipo de estructuras es la de doble T o, bien, cerradas de tipo cajón. En ocasiones una elección no del todo correcta de las chapas pueden llevar a que se pierda significativamente la eficiencia de la sección. Las propiedades de una viga armada en doble T comparadas a una en cajón son significativas. La primera presenta unas características de resistencia a la flexión lateral y a la torsión más deficientes en relación con la sección en cajón.

En la Figura 50 se presenta la fabricación de una viga carrilera,



*Figura 50 - Fabricación de una viga carrilera*

Las vigas aligeradas permiten utilizar distintas combinaciones de anchos y espesores de chapa en función de los condicionantes de inercia y de resistencia que exija el proyecto. Las variables más representativas de las estructuras de viga armada convencionales son espesores y anchura de alas y alma, sus límites elásticos, así como la distancia entre las riostras laterales.

En la gran mayoría de situaciones un aspecto clave con el que se tiene que lidiar es con el peso por unidad de longitud. Para ello surgen las vigas armadas híbridas (22,23) que son la alternativa de las vigas armadas homogéneas caracterizadas por experimentar un incremento

del límite elástico de las alas para que así se pueda reducir el espesor de éstas y reducir el canto total de la sección. Además, la chapa que cumpla la función de alma puede reducirse el límite elástico ya que el alma es la responsable de absorber el cortante percibido.

### **5.1.2- Materia prima**

Como bien se ha reflejado el proceso de fabricación que tienen esta tipología de viga es por medio de la soldadura de chapas de acero. Estas chapas pueden ser del mismo material como suele ser de carácter general o, bien, puede emplear distintos tipos de aceros para no tener un límite elástico común entre alma y alas distintos todos ellos para así conformar la tipología previamente comentada que es la viga armada híbrida.

También, las propiedades geométricas de las chapas pueden ser distintas ya que se puede generar un perfil que requiera unos espesores y anchura completamente distintas entre ellos como es el caso de perfiles asimétricos ya que portan como alas unas chapas diferentes. Estas combinaciones van dadas según la aplicación a la que vayan destinadas.

### **5.1.3- Proceso productivo**

De igual manera se hace una subdivisión donde se tiene un apartado para el proceso de fabricación y otro para la maquinaria empleada.

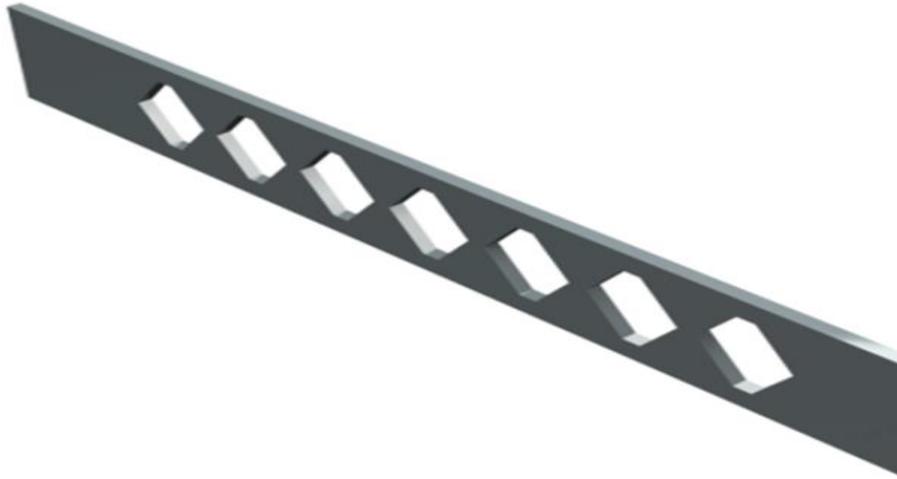
#### **5.1.3.1- Proceso de fabricación**

Al igual que en apartado *3.1-Viga alveolar* se pueden definir una serie de fases bien marcadas que coinciden en mayor o menor medida con estas.

##### **1. Definición del patrón del alveolo**

Escoger entre las geometrías diversas que suelen haber en el mercado como la que verdaderamente interese en función de la finalidad resistente.

Pueden encontrarse huecos o alveolos hexagonales, cuadrados, circulares, ovalados, etc., ver Figura 51, y todos ellos con las dimensiones que realmente interesen y que sean capaces de fabricarse. El exceder un máximo de material retirado puede llegar a generar fallos, ver Figura 52, diversos durante el servicio de esta viga.



*Figura 51 - Viga con alveolo hexagonal*



*Figura 52 - Fallo por exceder material del alma*

## 2. Corte alveolos

Sobre la chapa (24,25) que hace la función de alma se realiza los cortes de los huecos o alveolos con el patrón escogido en el paso previo (ver Figura 53).



Figura 53 - Alma con alveolo poco común

### 3. Soldado de las alas

En esta ya última fase se procesa a soldar las alas de la sección de tal forma que se obtiene una viga alveolar ejecutada armando todos los elementos. En la Figura 54 se aprecia una imagen en la que se ve perfectamente todos los pasos comentados en su proceso de fabricación. Además, se presenta el caso más asimétrico posible que es aquel con ambas alas totalmente distintas (en términos de espesor y ancho).

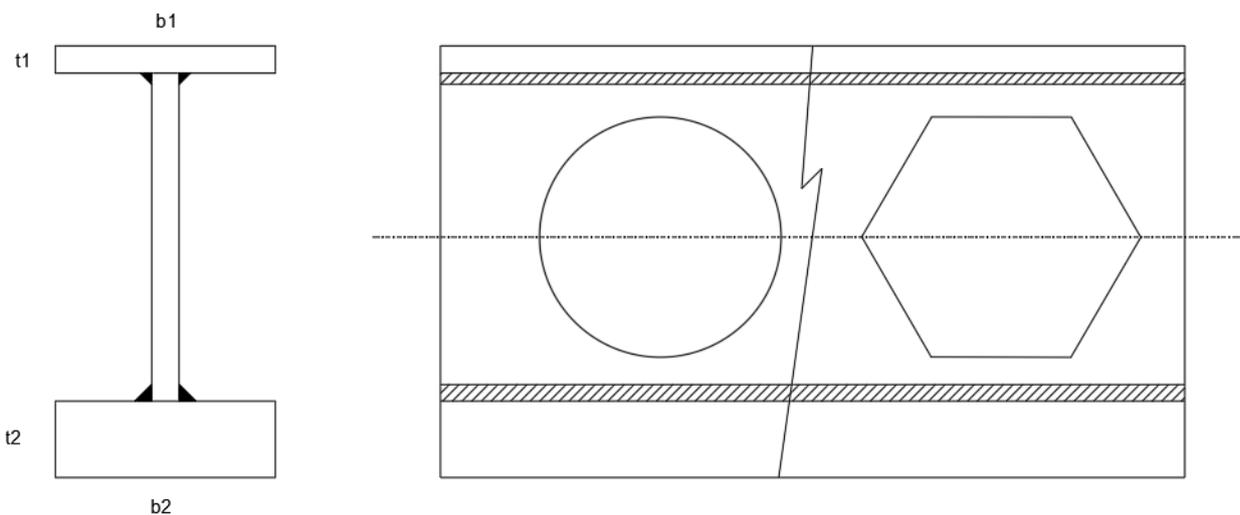


Figura 54 - Viga armada final

Existen otras tipologías de vigas que recurriendo a esta tecnología de fabricación (o procedimiento) como es el caso de las vigas de sección variable que también tienen un nicho de mercado bastante utilizados.

Luego éstas tienen también varios procesos con los que se llega al producto terminado. Se comenta a continuación,

- a. La primera forma radica en la misma ideología que ha llevado a cabo este apartado. Se parte de una chapa que ocupara la posición central o del alma y a ella se le soldarán otras dos a modo de alas. Éstas pueden ser también de geometrías diferentes e, incluso, de aceros distintos a modo de tener unos límites elásticos como en el caso de las vigas alveolares híbridas. Para finalizar se procedería a generar los huecos o alveolos con la geometría que más interesase, pero sin contrarior el patrón a lo largo de la viga sino cortando el elemento geométrico directamente.
- b. La segunda opción es partir con una chapa rectangular y proceder a soldarle las alas y luego, como en la situación de la viga alveolar se define el patrón de corte en diagonal, como en la Figura 55, y una vez cortada darle la vuelta y soldarla.



*Figura 55 - Pilares pórticos sección variable*

#### 4. Saneamiento y preparación de las uniones

Proceso idéntico al previamente mencionado apartado 3.1.1.

#### 5. Control de calidad de las uniones soldadas

Proceso idéntico al previamente mencionado apartado 3.1.1.

#### 6. Pintado

Proceso idéntico al previamente mencionado apartado 3.1.1.

#### 7. Trazabilidad

Proceso idéntico al previamente mencionado apartado 3.1.1.

### **5.1.3.2- Maquinaria**

No se producen cambios en lo que respecta al campo de maquinaria. Coincide con la comentada en el apartado 3.1.2.

### **5.1.4- Control de calidad**

No se producen cambios en lo que respecta a las herramientas empleadas en el proceso de control de calidad. Coincide con la comentada en el apartado 3.1.3.

## **5.2- Viga contraflechada**

Basándose en lo que significa únicamente el término contraflechar (26,27) se puede decir que es el proceso de arqueo, doblado o curvado según la dirección vertical. El que se aplique sobre una viga tiene la finalidad de contrarrestar la curva natural que adoptará al ser puesta en servicio debida a peso propio de la misma, ver Figura 56.

El proceso de combado aplicado a las vigas de acero puede expresarse como: "la predeformación de un miembro para que, en estado de carga, se aproxime más a su forma teórica " (28).

Con el nuevo sistema de fabricación de vigas armadas, este proceso se simplifica ya que se consigue el objetivo cortando de forma ligeramente curva la chapa que hace de alma. Posteriormente se soldarán las alas a dicha placa curvada. Nótese que la rigidez a flexión del ala es pequeña y se puede forzar fácilmente para que se adapte a la forma curva del alma.

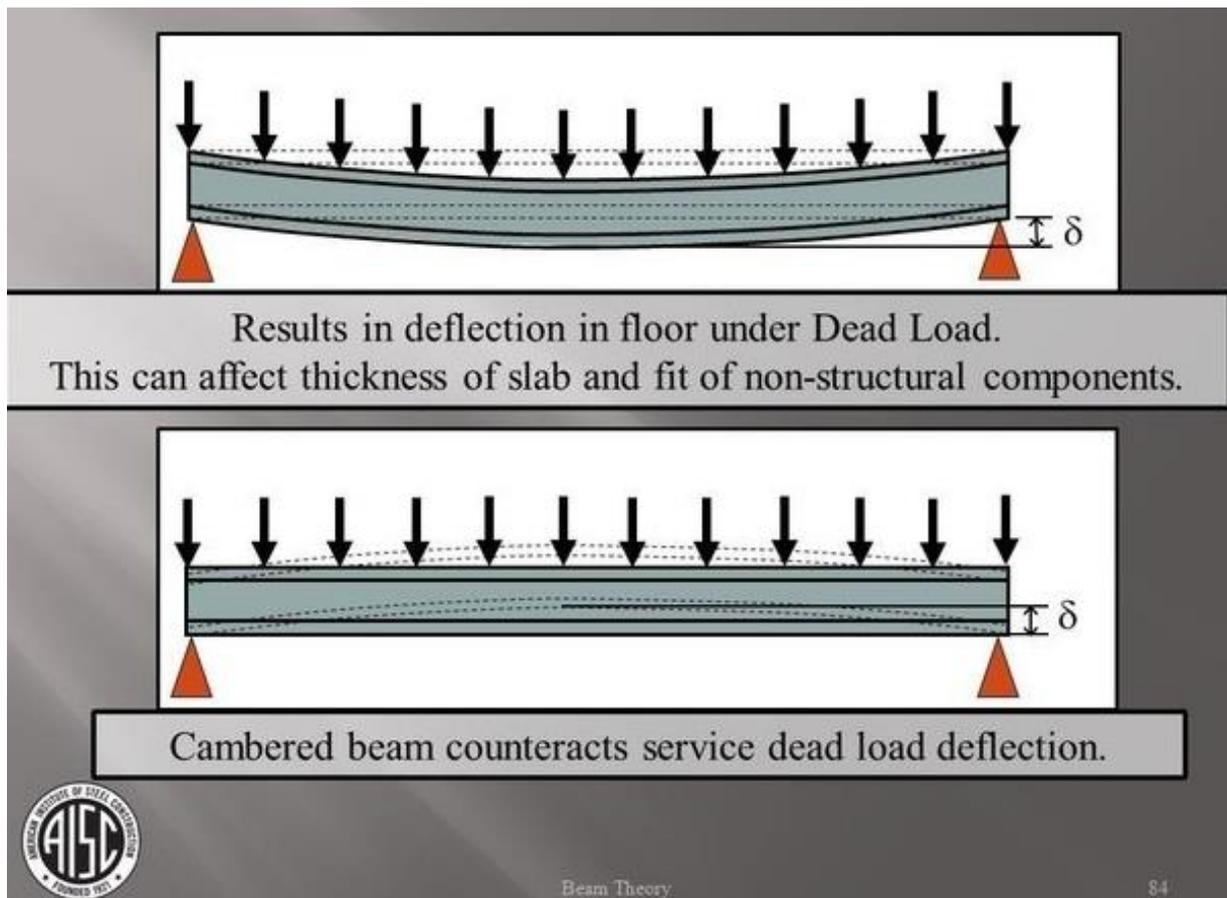


Figura 56 – Contraflechado

Estos tratamientos son muy frecuentes para aquellas vigas alveolares que van a trabajar solidariamente con losas de hormigón, ver Figura 57 y Figura 58, y éstas quedarán fijadas a la viga de acero debido a unos salientes (como pernos soldados) que poseen sobre el ala superior que dará lugar a una fuerte adherencia con el hormigón ya fraguado.

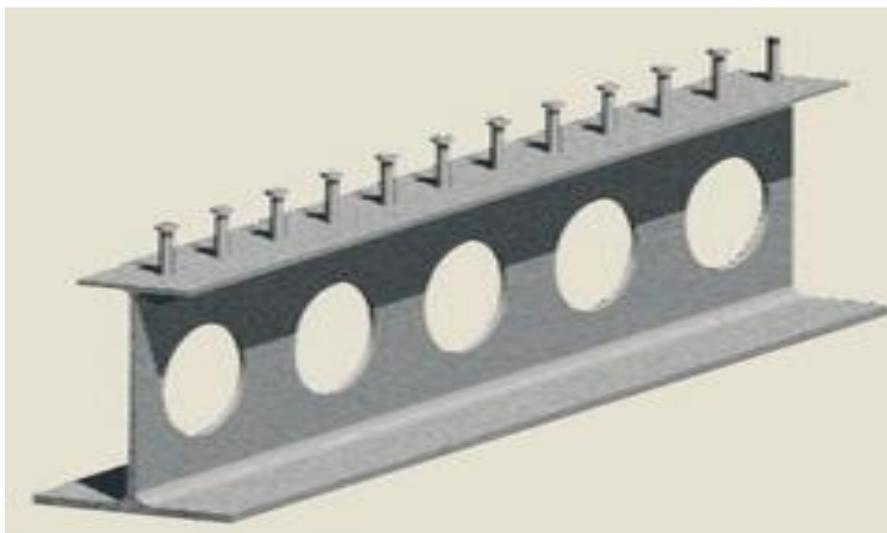


Figura 57 - Viga asimétrica

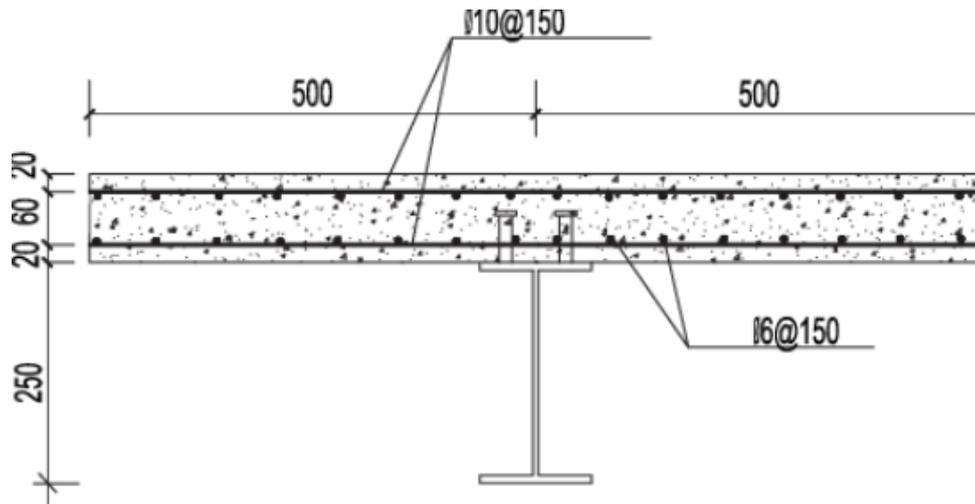


Figura 58 - Viga asimétrica con losa de hormigón

El proceso de contraflechado tradicional se realiza cuando ya la viga está perfectamente consolidada y acabada. Sin embargo, es un proceso costoso que requiere maquinaria adecuada. Además, aplicarlo a vigas alveolares suele dar problemas, precisamente por las altas solicitaciones que se inducen en el alma debilitada por los alveolos. Con el nuevo procedimiento se simplifica notablemente. Aquí radica una de las ideas de la nueva línea de negocio.

## 6. COSTES FABRICACIÓN

En este capítulo se realiza un análisis/estudio de lo que supondría fabricar tanto una viga alveolar con hueco hexagonal como una de hueco circular. Se trata de ver cuánto es más rentable o cuánto no rentable supone el homólogo a la viga alveolar como viga armada.

### 6.1- Cálculo de costes

El precio del kilogramo de acero es muy oscilante. Los cálculos se toman con referencian al precio del kilogramo de una viga de perfil IPE400 de la base de precios proporcionados por el GRUPO METASOL (29) y que se encuentra a 1,10 €/kg para perfiles laminados en bruto y a 1,20 €/kg para chapas con espesores por encima de 8 mm.

Las vigas de perfil IPE400 llegan a la nave desde cualquiera de los puntos nacionales pero la empresa HIERROS MANUEL VIDAL S.A. (30) ubicados en Zamora y Salamanca es de los más próximos y con una capacidad de producción que permite satisfacer esta demanda de vigas con longitud de 12 m.

Haciendo consulta de prontuarios (31) se aprecia que esta sección posee una masa por metro lineal de 66,3 kg. Por tanto, el precio de cada una de las vigas que se tratan tiene un coste de 875,16 € y si se fabricase por armado de chapas sería de 954,72 €.

También la empresa HIERROS MANUEL VIDAL S.A. será quien proporcione las chapas ya cortadas, en forma hexagonal y circular, con las dimensiones especificadas por HORFASA (32) a un precio igual a 2,57 €/kg.

#### 6.1.1- Coste viga alveolar de hueco circular

Los aspectos que son determinantes para cuantificar los costes es saber cuánto tiempo consumirá la viga en los procesos de corte y en el de soldadura. Esto se puede contemplar haciendo uso de la tabla de especificaciones técnicas (14,33) con sus distintas velocidades.

Como bien se explica se parte de una viga IPE400 de 12 m pero que finalmente la viga alveolar no portará esta longitud, sino que será algo inferior, exactamente será de 11,655 m, y su motivo es que al ser cortada y desplazada las partes laterales son retiradas dejando así una longitud inferior.

Las especificaciones geométricas (34) que se han seguido han sido las proporcionadas por el fabricante de vigas alveoladas HORFASA (32).

El resultado final se observa en la Figura 59.

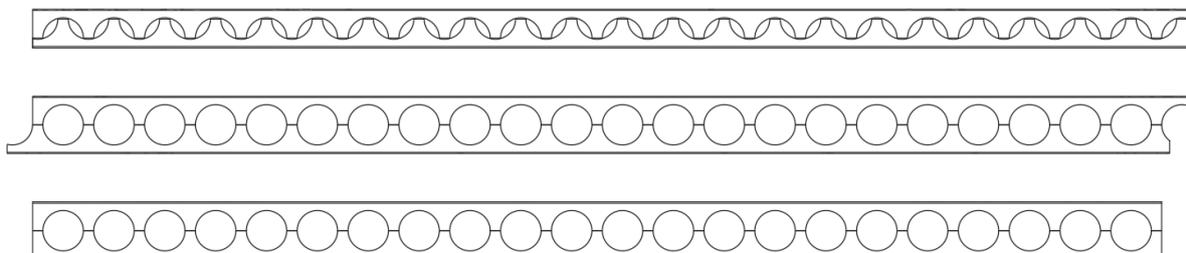


Figura 59 - Proceso viga celular

Finalmente resulta una viga con una totalidad de 22 huecos o alveolos circulares. El canto de la viga es de 595,1 mm con alveolos de 410 mm de diámetro y una separación entre ellos de 105 mm. La inercia pasa a ser de  $9,078 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$ .

Es importante saber que para la fabricación de esta tipología de viga aligerada hay que realizar dos pasadas de corte a diferencia de cualquier otra que solamente requieren una. Para la soldadura con 2 pasadas es suficiente.

Las longitudes totales que se van a cortar y soldar quedan reflejadas en la Tabla 3.

*Tabla 3 - Longitudes proceso corte y soldadura viga alveolar de hueco circular*

**LONGITUDES TOTALES**

<i>Proceso de corte</i>	34,39 m
<i>Proceso de soldadura</i>	4,83 m

La máquina de corte por plasma es capaz de trabajar a una velocidad de corte igual a 3,5 m/minuto por lo que tiempo que se emplea en este primer paso de la viga por zona de fabricación es igual a 9,83 minutos.

Una vez cortada se procede a su soldado. La máquina es capaz de soldar hasta una velocidad de 1,5 m/minuto. Finalmente, el tiempo que se emplea en soldar es igual a 3,22 minutos, pero a mayores se le suma aproximadamente otro minuto que corresponde con el volteo de la viga para el soldado del otro lado. Por tanto, el tiempo total en esta fase es de 4,22 minutos.

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de 14,05 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 4,27 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 8,54 piezas a la hora.

Según el convenio del metal (35) anualmente se trabaja una totalidad de 222 días.

Si la producción anual fuese a un 100 % de productividad y eficiencia con el dato proporcionado de los días de trabajo anuales se alcanzaría una producción de 30.192 vigas anuales. En cambio, estas cifras son ideales, nunca va a ser real por distintos motivos. Se debe de introducir un coeficiente de rendimiento OEE (Overall Equipment Effectiveness). Este rendimiento operacional se encuentra frecuentemente entre el 80 % y el 90 % y depende de tres factores como son:

- Disponibilidad: Tener en cuenta las paradas de producción ya sean por averías, cambio de herramientas, etc. Se admite un valor del 91 %.
- Rendimiento: Incluye el absentismo de la plantilla y otros motivos que provocan la disminución de la velocidad de fabricación respecto a la planteada. Se admite un valor del 92 %.
- Calidad: Según cantidad de piezas que requieran ser observadas por la zona de control de calidad y luego ser retocadas o no. Se admite un valor del 95 %.

Esto da un valor total del OEE igual al 80 %.

Por tanto, ahora se puede estimar la producción anual en relación al OEE. La producción finalmente será de 24.153 vigas al año.

Se tiene calculado el valor de la viga de acero de perfil IPE400 a 875,16 €. Sabiendo la producción anual se puede estimar que el coste de material prima anual ascenderá a 21.137.739,48 €.

Respecto a número de trabajadores se van a estimar un total de cinco. Tres de ellos se encargan de la zona productiva de la fábrica y los otros dos se encontrarán en áreas de retoque y calidad. Todos ellos tienen un salario de 22 € cada hora. Por tanto, el trabajar a 2 turnos de 8 horas diarias durante 222 días anuales asciende a una cifra igual a 390.720 € imputados a la mano de obra directa.

La mano de obra indirecta se considera que será un 25 % de la parte directa. Esto asciende a 97.680 € al año.

Se considera la imputación de la amortización de la maquinaria. Toda ella es a 10 años. La máquina de corte (9.000€) supone un total de 900 € al año y las de soldadura (50.000 €) suponen 5.000 €. Esto hace un total de 5.900 €/año de amortizaciones de maquinaria.

El coste de mantenimiento se le imputa un 2,5 % del valor de la máquina. Para el mantenimiento de la máquina de corte son 225 € y para las de soldadura 1.250 €. El mantenimiento hace un total de 1.475 € por año.

El coste de la energía eléctrica (35) de las máquinas irá según una parte fija (0,1146 €/kW día) y otra variable (0,0939 €/kWh) a manos de Endesa.

- Coste fijo = 0,1146 €/kWd · 222 d · (5,5 + 9,7) kW = 492,66 €/año
- Coste variable = 0,0939 €/kWh · 16 h/d · 222 d · (5,5 + 9,7) kW = 5.069,70 €/año

Por tanto, el coste energético total consumido por la maquinaria es de 5.562,35 €/año.

Recogemos bajo la Tabla 4 la totalidad de los costes,

*Tabla 4 - Costes imputados viga alveolar hueco circular*

<i>COSTES (€)</i>	
<i>MATERIA PRIMA</i>	21.137.739,48
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>21.639.076,83</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga alveolar hueco circular} = \frac{21.639.076,83}{24.153} = 895,92 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 895,92 €.

Adicionalmente, se piensa en una segunda actividad para una misma viga y es el proceso de macizado de cualquier alveolo de la viga en cuestión. En este caso se va a evaluar el coste que supondría el macizar el primer y último hueco. Dos alveolos por viga suponen un total de 18,46 kg. Esto hace un total de 47,44 €.

Para el caso de las vigas alveolares supone un incremento en la longitud de corte como en la de soldadura (ver Tabla 5).

Tabla 5 – Longitud a soldar (viga macizada)

	Longitud
Proceso de soldadura	5,28 m

La parte proporcional de consumo energético que se imputa a una única viga para 5,28 m es igual a 0,146 €.

Por tanto, el coste final de la viga macizada asciende a 943,51 €.

### 6.1.2- Coste viga aligerada armada celular

Se deben cumplir las características geométricas que poseen las vigas alveolares celulares ya que se trata de generar un modelo exacto, pero con un proceso de fabricación totalmente distinto. Para ello no es más que necesario tres chapas de las que dos de ellas serán idénticas ya que serán las alas de la viga y la restante el alma.

Las dimensiones planas son las siguientes,

- Ala: 180 mm x 13,5 mm ( $A=2,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ).
- Alma: 568,1 mm x 8,6 mm ( $A=4,885 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ).

Por tanto, se tiene ya el valor del área total de la sección que es igual a  $9,745 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Si se considera un valor promedio de la densidad del acero igual a  $7.750 \text{ kg/m}^3$  es posible saber cuál es la masa por metro lineal. Ésta es igual a 75,52 kg/m.

La viga tiene una longitud total de 12 m. Ya que con este proceso constructivo no se pierde material.

El coste de los materiales que consolidan la viga asciende a 954,72 €.

El resultado final de la viga se observa en la Figura 60.



Figura 60 - Viga celular armada

Finalmente resulta en una viga con una totalidad de 22 huecos o alveolos circulares.

La zona a soldar, ahora, es únicamente un total de cuatro cordones (dos por ala) que recorren de principio a fin la viga.

Las longitudes totales que se van a cortar y soldar quedan reflejadas en la Tabla 6.

Tabla 6 - Longitudes proceso corte y soldadura viga celular armada

**LONGITUDES TOTALES**

<i>Proceso de corte</i>	29,03 m
<i>Proceso de soldadura</i>	48,00 m

La máquina de corte por plasma es capaz de trabajar a una velocidad de corte igual a 3,5 m/minuto por lo que tiempo que se emplea en este primer paso de la viga por zona de fabricación es igual a 8,30 minutos.

Una vez cortada se procede a su soldado. La máquina es capaz de soldar hasta una velocidad de 1,5 m/minuto. Finalmente, el tiempo que se emplea en soldar es igual a 32 minutos, pero a mayores se le suma aproximadamente otro minuto que corresponde con el volteo de la viga para el soldado del otro lado. Por tanto, el tiempo total en esta fase es de 33 minutos.

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de 41,10 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 1,45 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 2,90 piezas a la hora.

Según el convenio del metal (35) anualmente se trabaja una totalidad de 222 días.

Si la producción anual fuese a un 100 % de productividad y eficiencia con el dato proporcionado de los días de trabajo anuales se alcanzaría una producción de 10.300 vigas anuales. Pero considerando el OEE del 80 % la producción definitivamente sería de 8.240 vigas.

Se tiene calculado el valor de la viga de acero generada a partir de chapas a 954,72 €. Sabiendo la producción anual se puede estimar que el coste de material prima anual ascenderá a 7.866.892,80 €.

La mano de obra directa se conserva al igual que la indirecta. La primera son 390.720 € y la parte indirecta son 97.680 €.

El coste por mantenimiento, amortizaciones y energéticos se conservan. Éstos son 1.475 €, 5.900 € y 5.562,35 €, respectivamente.

Recogemos en la Tabla 7 la totalidad de los costes,

Tabla 7 - Costes imputados viga armada celular

<i>COSTES (€)</i>	
<i>MATERIA PRIMA</i>	7.866.892,80
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b>TOTAL</b>	<b>8.368.230,15</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga celular} = \frac{8.368.230,15}{8.240} = 1.015,56 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 1.015,56 €.

Se piensa en la opción de generar un macizado para la viga en la zona de los apoyos de la viga. En este caso se va a evaluar el coste que supondría el macizar el primer y último hueco.

Gracias al proceso de fabricación de las vigas armadas el macizado se genera no cortando el alveolo que interese, que en ese caso son los huecos extremos. Se observan las nuevas longitudes que van a ser cortadas y soldadas bajo la Tabla 8.

Tabla 8 - Nuevas longitudes de corte y soldadura (viga aligerada de hueco circular macizada)

<i>LONGITUD TOTAL</i>	
<i>Proceso de corte</i>	26,39 m
<i>Proceso de soldadura</i>	48,00 m

Esto implica que los tiempos de operación se incrementen los tiempos de operación de cortado y soldado (considerando el volteo de la viga de un minuto) alcanzan unos tiempos de 7,54 y 33 minutos.

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de 40,54 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 1,48 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 2,96 vigas/hora. Y anualmente hacen un total de 10.513 vigas a plena carga, es decir al 100 %. Estimando un OEE del 80 % la producción anual sería de 8.410 vigas.

El coste de materia prima asciende a una totalidad de 8.029.195,20 €.

Conservando el resto de los costes se observa en la Tabla 9 el nuevo coste total,

Tabla 9 - Costes imputados viga aligerada de hueco circular macizada

**COSTES (€)**

<i>MATERIA PRIMA</i>	8.029.195,20
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b>TOTAL</b>	<b>8.530.532,55</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga celular} = \frac{8.530.532,55}{8.410} = 1.014,33,10 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 1.014,33 €.

### 6.1.3- Coste viga alveolar hexagonal

El coste de la viga alveolar de hueco hexagonal es igual a 891,58 € y el de su respectiva viga con apoyos macizados es igual a 932,76 €.

Todos los cálculos se muestran en el *ANEXO II*.

### 6.1.4- Coste viga aligerada armada hexagonal

El coste de la viga alveolar armada de hueco hexagonal es igual a 1.151,04 € y el de su respectiva viga con apoyos macizados es igual a 1.149,89 €.

Todos los cálculos se muestran en el *ANEXO II*.

### 6.1.5- Costes viga aligerada armada curva de alveolo circular

En este caso se procede a calcular el coste de la viga aligerada armada especial. Se trata de una viga curva. En el *ANEXO V* viene todo el diseño de la viga curva. Además, presentarán una totalidad de 20 alveolos en vez de los 22 que se proponen para la viga plana. Se parte de una chapa de grandes dimensiones, ver Figura 61, de donde se corta el alma con la curvatura deseada dejando mucho material sin aprovechar. En cambio, para las alas la totalidad de la chapa empleada se aprovecha.

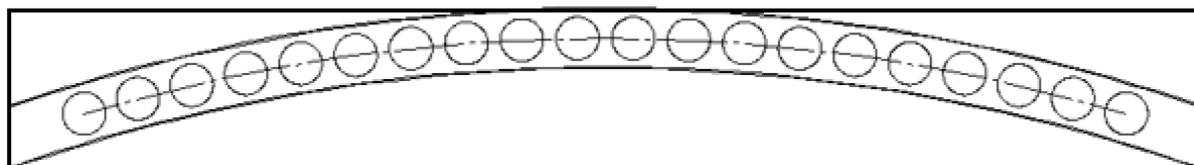


Figura 61 - Chapa de partida para cortar el alma

El resultado final, ver Figura 62, de la viga es el siguiente,

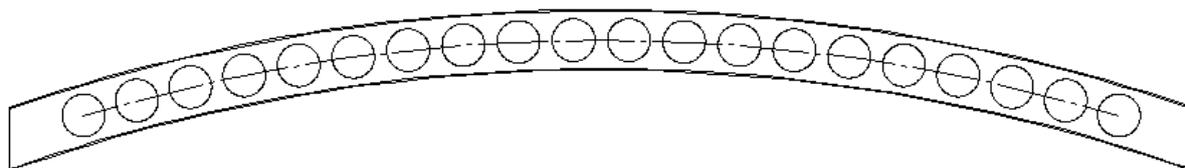


Figura 62 - Viga aligerada armada curva de alveolo circular

Finalmente, el coste de la viga alveolar de hueco hexagonal es igual a 2.020,30 €

## 6.2- Comparación de costes

La finalidad es comparar el precio de fabricar la viga aligerada por cualquiera de las dos metodologías de fabricación e, incluso, aplicando un proceso de contraflechado o curvado en el caso de que fuese de interés para el cliente sobre la nueva gama de fabricación. Todos los costes quedan reflejados en la Tabla 10 a Tabla 12.

Tabla 10 - Comparación coste de viga sin macizado

	VIGA ALVEOLAR	VIGA ALIGERADA ARMADA
Hueco circular	895,92 €	1.015,56 €
Hueco hexagonal	891,58 €	1.151,04 €

Tabla 11 - Comparación coste de viga con macizado

	VIGA ALVEOLAR CON MACIZADO	VIGA ALIGERADA ARMADA CON MACIZADO
Hueco circular	943,51 €	1.014,33 €
Hueco hexagonal	932,76 €	1.149,89 €

Tabla 12 - Costes viga aligerada armada curva alveolo circular

Hueco circular	VIGA ALIGERADA ARMADA CURVA
Coste	2.020,30 €

Tanto de la Tabla 10 como de la Tabla 11 se extrae la conclusión de que el mayor coste cae sobre la viga fabricada por soldado de chapas, como era de esperar. El coste de la materia prima como su paso por las distintas máquinas es superior por lo que el coste también lo será.

También se observa la diferencia de costes para las vigas con el macizado en los extremos de cómo son más baratas para el caso de una viga aligerada armada, ya que se reduce el trabajo sobre la viga, respecto a la viga aligerada ya que hay que hacer trabajo extra sobre ellas.

Como era de esperar el coste de una viga de hueco hexagonal frente a una circular es menor ya que hay menor longitud de corte (se realiza en una pasada y la de alveolo circular de dos).

Los métodos tradicionales del taller actual no permiten la fabricación de las vigas aligeradas contraflechadas y/o curvadas a ningún coste.



## 7. ADAPTACIÓN DEL TALLER

### 7.1- Renovación del taller

La nueva línea de negocio ha hecho que la zona interior de la nave deba sufrir alguna que otra modificación y tener que incrementar las líneas de movimiento de la viga dentro de esta.

Las zonas de corte y soldadura han sido reducidas ya que inicialmente se tenía espacio de sobra y se han movido de ubicación. Esta reducción ha sido de aproximadamente un 21 % pasando de 218,5 m<sup>2</sup> a 172,5 m<sup>2</sup>.

También la zona de residuos se ha visto afectada teniendo que ser ampliada ya que ahora se genera un volumen bastante superior de chatarra que posteriormente será otro foco de ingresos para el taller con su venta. El incremento ha sido de un 87,5 % pasando de 144 m<sup>2</sup> a 270 m<sup>2</sup>. Se incrementan en 4 más haciendo un total de 8 contenedores.

El almacén de materia prima se ha visto ampliado ya que se podrá tener, a mayores de las vigas, la recepción de chapas de grandes dimensiones e, incluso, ya cortadas y con ciertas curvaturas que hacen que el espacio necesario sea importante. A parte se le incorporan cantilevers de doble brazo (Figura 63) de altas dimensiones para estas últimas.



Figura 63 - Cantilevers vigas/chapas especiales

Al igual que el almacén para la recepción de la materia prima el almacén de producto terminado se amplía de igual forma. También se le incorpora una estantería como la de la Figura 63 para toda viga que se fabrique de grandes dimensiones.

Estas ampliaciones realizadas en los almacenes serán precisamente destinadas para esta recepción o envío de vigas de grandes dimensiones o de curvaturas bastante acentuadas y que requieran de bastante espacio.

Se van a incorporar en esta ampliación una totalidad de dos filas de cantilevers que hacen un total de una incorporación de 10 módulos por almacén. Esto hace un total de 20 módulos. Poseen una altura de 3 m y una longitud de brazo de 80 cm. Son suministrados por la empresa CHARLES SERVICE (36).

Se consigue pasar de los 144 m<sup>2</sup> iniciales a 225 m<sup>2</sup> lo que supone un 56,25 % de incremento.

La empresa REITEMAN Madrid S.L.U. (6) es la responsable de demolición y gestión de residuos del tabique de ambos almacenes además de responsabilizarse del montaje del nuevo.

Para aprovechar de forma eficiente la planta de la nave se ven también afectadas las zonas para el control de calidad y de retoque. Únicamente cambiarán de localización dentro de la planta.

Para la fabricación de las vigas aligeradas armadas se emplea un soporte que hace que la chapa del alma esté perfectamente perpendicular con las alas a la hora de soldar como se representa en la Figura 64 y Figura 65.



*Figura 64 - Soporte soldado vigas aligeradas armadas*



*Figura 65 - Soporte para soldado vigas aligeradas armadas*

Las zonas de retoque y la de control de calidad sufren un cambio de distribución permaneciendo prácticamente en la misma zona.

Todas las labores de movimiento y traslado de maquinaria pesada industrial (máquina de corte, máquinas de soldadura, etc.) se encarga la empresa Etxeguren Zerbitzuak S.L. (6).

La parte de oficina técnica se ve fuertemente afectada ya que se va a reforzar con la incorporación de dos ingenieros que van a llevar a cabo funciones de diseño asistido por ordenador a partir del software SOLIDWORKS (37). Todo análisis va a verse reforzado ya que se facilita al cliente el informe técnico de especificaciones.

En la Figura 66 se puede observar como la planta del taller ha resultado tras todas las modificaciones.

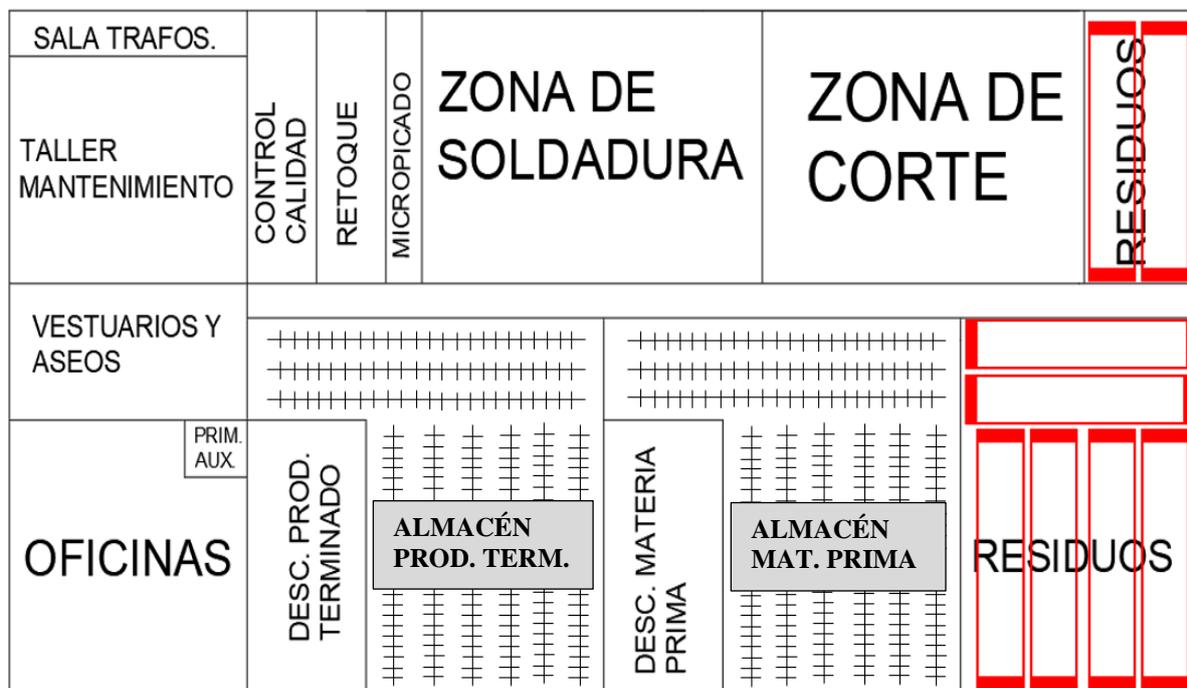


Figura 66 - Nueva distribución de la nave

## 7.2- Nuevo LAYOUT

El proceso renovado que sigue es muy similar a la configuración inicial, pero aparecen situaciones nuevas debido a la nueva gama de producción. Viene expresado siguiendo una serie de pasos donde hay puntos estratégicos de importantes tomas de decisiones.

1. Recepción de las vigas y chapas mecanizadas, circulares y hexagonales, para operaciones de macizado en punto de descarga, así como chapas destinadas a ser empleadas para la fabricación de vigas contraflechadas o curvas.
2. Vigas son llevadas con el puente grúa al almacén de la materia prima del proceso dónde se establecen zonas para chapas de todo tamaño como para las chapas mecanizadas para los macizados.
3. Con la ayuda de un puente grúa se trasladan a la zona donde son cortadas según el patrón que interese. Luego se desplazan ambas partes a su posición para ser ya soldadas y los extremos sobrantes se cortan y son enviados a los contenedores ubicados en el lateral derecho para chatarra.
4. Las vigas son soldadas por la zona del alma que sea necesario con tecnología SAW (arco sumergido).
5. Para operaciones de macizado se enviarán las chapas de tipología hexagonal o circular desde el almacén de materia prima a la zona de soldado.
6. Si la viga que se está fabricando es de tipología aligerada armada o aligerada armada contraflechada o curva se reciben directamente las chapas desde el almacén de materia prima. Posteriormente se sigue el proceso normal.
7. Tras el proceso de soldadura hay que garantizar la trazabilidad de cada una de las vigas a través un datamatrix por medio de un micropicado en el alma o en alguna de sus alas.
8. Una vez que sale de la zona de micropicado hay varias situaciones:
  - a. Son enviadas directamente al almacén de producto terminado.

- b. Por protocolo al tener que ser un porcentaje de la producción ser revisado por control de calidad se enviará a esta dependencia. Aquí se realizan los ensayos pertinentes al cordón de soldadura en especial. Puede ocurrir dos situaciones:
  - i. La pieza es considerada como ‘BUENA’ y se envía al almacén de producto terminado.
  - ii. La viga tiene alguna imperfección que debe ser corregida y se manda a retocar.
    - 1. Si la viga no puede ser corregida en zona de retoque se envía a residuo directamente.
    - 2. Si se consigue reparar se vuelve a enviar a zona de calidad.
      - a. La pieza retocada pasa satisfactoriamente el control de calidad y se manda al almacén de producto terminado.
      - b. Si no pasa este segundo control de calidad se concibe como una viga ‘MALA’ y se envía esta vez a residuos.
- 9. Desde el almacén tienen que llevarse a la zona de descarga de producto terminado desde la que se cargará en el camión que se encuentra esperando y llevar el producto al cliente.
- 10. La chatarra generada durante el proceso se vende siendo esta una segunda fuente de ingresos.

Este proceso se ve reflejado gráficamente a continuación en la Figura 67 con la ayuda de un plano en el que figuran cada una de las zonas de la fábrica y su disposición en ella.

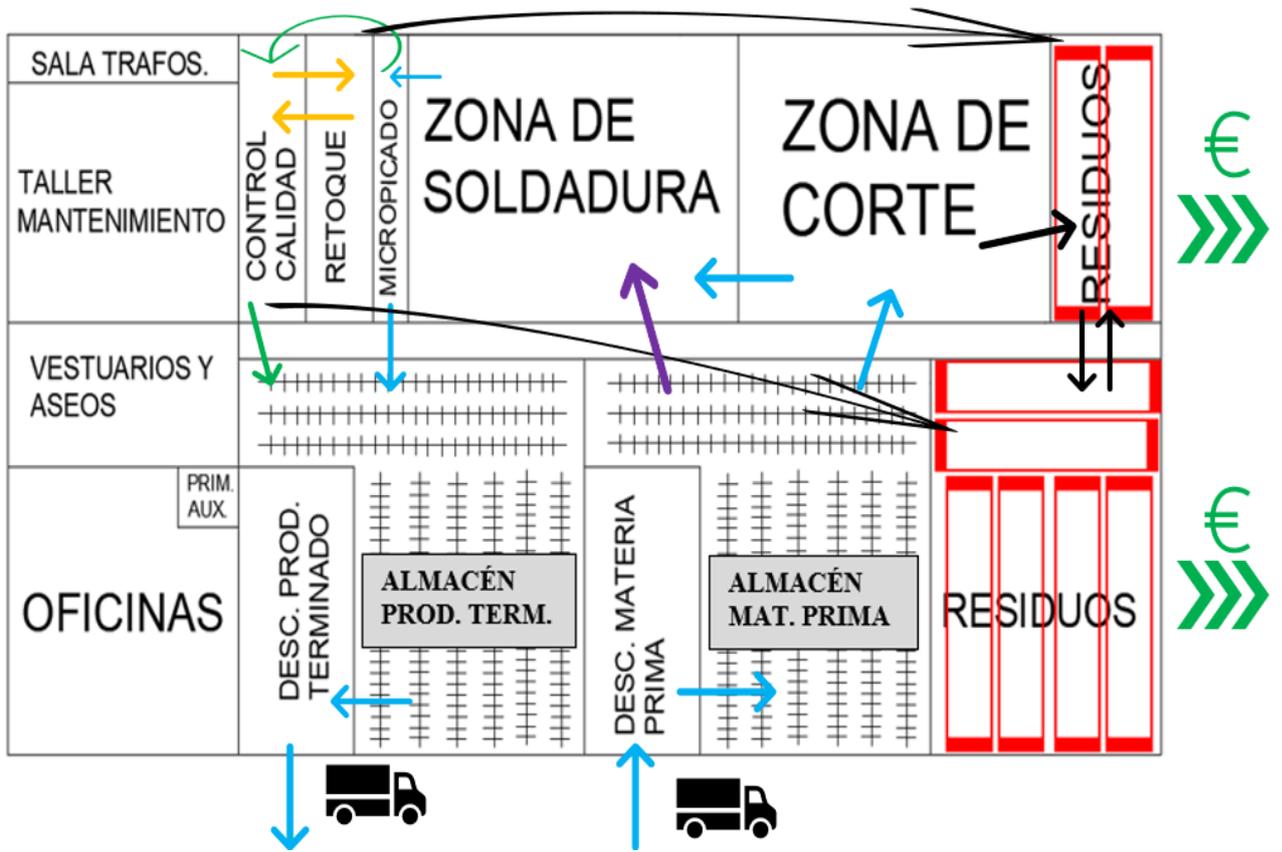


Figura 67 - Nuevo LAYOUT de la nave

## 8. REFUERZO DE LA OFICINA TÉCNICA

Tras la incorporación de los nuevos modelos de vigas que se van a fabricar el departamento de ingeniería se ha visto reforzado con una ampliación de plantilla de dos ingenieros. Uno de ellos asume el rol como Ingeniero de Diseño y el segundo el de Ingeniero de Producción, pero siempre ligado al departamento de ingeniería.

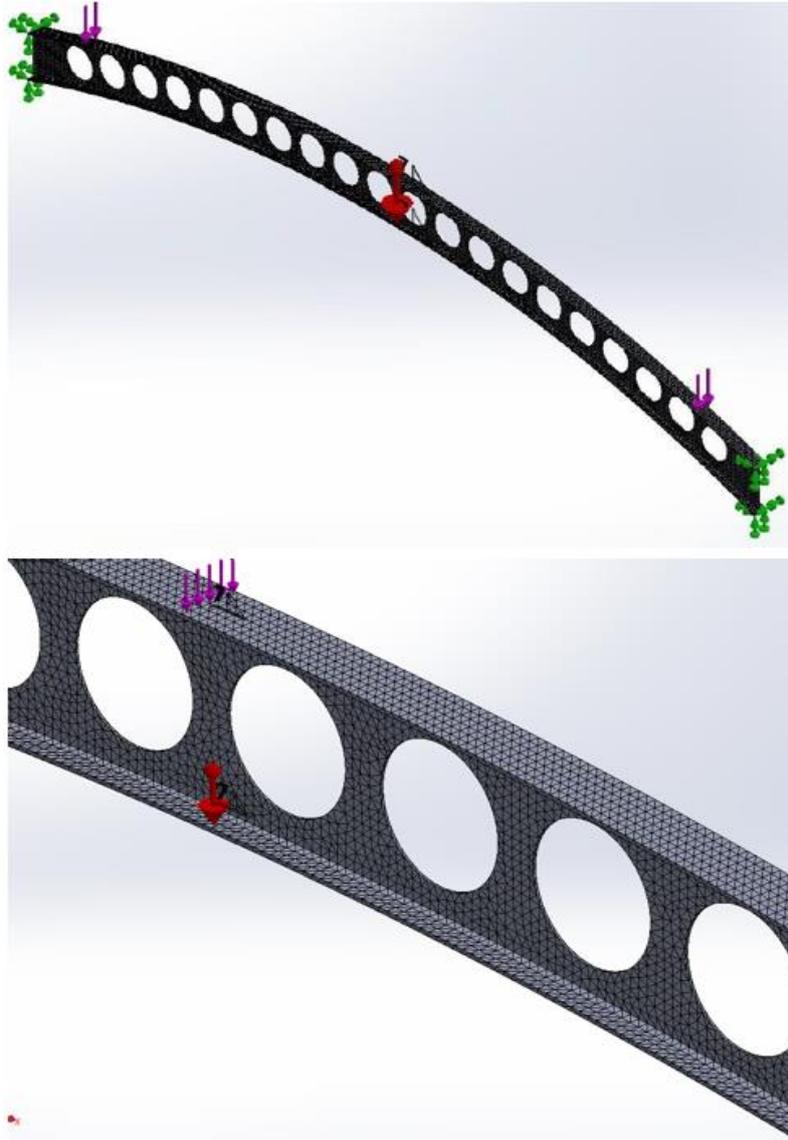
El objetivo de estas contrataciones es el de controlar que todo lo que se produce y sale del taller se está realizando de tal forma que cumpla en todo momento su comportamiento resistente. Para que esto se lleve a cabo la oficina técnica incorpora dos licencias del software SOLIDWORKS (37). Es un programa de diseño paramétrico, es decir, permite que se diseñe a través de parámetros como dimensiones, formas, etc. y cualquier rectificación o modificación podrá ser ejecutada de forma instantánea sin ocasionar error. Luego, todo este diseño lo vuelca a formato 3D donde se permite realizar los ensayos estáticos y de pandeo usando una muy alta capacidad de computación a través de metodología de elementos finitos.

Se recurre a esta actividad, implementar en la oficina técnica el software, ya que los nuevos productos especiales requieren de cálculo. Ahora se es capaz de fabricar vigas aligeradas especiales con la capacidad de poder configurar de la forma más conveniente o de la manera que el cliente solicite. Tanto la posición como la forma del alveolo pueden generarse de manera arbitraria. Es por ello que, ahora, esta nueva línea de productos no pueda hacer frente a un estudio resistente por medio de formulación matemática como el que se venía haciendo hasta ahora. En el *ANEXO V* se aprecia como se procede para el diseño de una viga aligerada armada curvada.

En todo momento se debe tener en cuenta la capacidad de carga que la viga es capaz de soportar. Es por ello que bajo el *ANEXO III* se obtiene por medio de formulación matemática y consideración de viga equivalente del os valores máximos de carga que podrían soportar. Junto a ello, y con conocimiento de los enormes problemas que pueden llegar a esta familia de vigas aligeradas y armadas, en el *ANEXO IV* se contemplan los fenómenos de fallo más característicos de estas tipologías de vigas.

No solo se permite el cálculo estático, pandeo, etc. variando la configuración que se le de a la viga sino que también se puede trabajar con vigas a las que además de ello tengan los espesores que se quieran así como que el módulo elástico de sus materiales sean diferentes (22) como ocurre con las vigas aligeradas armadas híbridas. Respecto a la geometría de la viga se puede calcular con curvaturas más o menos acentuadas sin ningún problema.

Solidworks calcula cualquier elemento a partir del método por elementos finitos (MEF). Realiza una fuerte discretización de la viga reduciéndola a elementos muy pequeños, denominado mallado del elemento, y un número finito (pero que puede llegar a ser muy elevado) generando en la viga un mallado más o menos fino de elementos los cuales todos y cada uno es sometido al análisis al que este sometándose. La Figura 68 muestra el mallado de una viga aligerada de hueco circular como la que ahora es el taller capaz de fabricar. Los resultado que se extraen no podrían obtenerse por la formulación que se presenta en el prontuario de ingeniería civil (31). De una forma gráfica te dice el estado de cada elemento de la malla a la que se le sometió a la viga.



*Figura 68 - Mallado viga*

Que con este proceso de análisis previo a la fabricación de una viga se pueda obtener el informe técnico que será adjuntado al cliente provoca un gran valor añadido para el taller. En la Figura 69 a Figura 71 se observan imágenes de cómo se ven las simulaciones, y de donde se extraerán todos los resultados que serán volcados al informe técnico, que los dos nuevos ingenieros deben realizar y entender, cada uno de los dos en mayor o menor medida, a partir del software SOLIDWORKS instaurado en el taller.

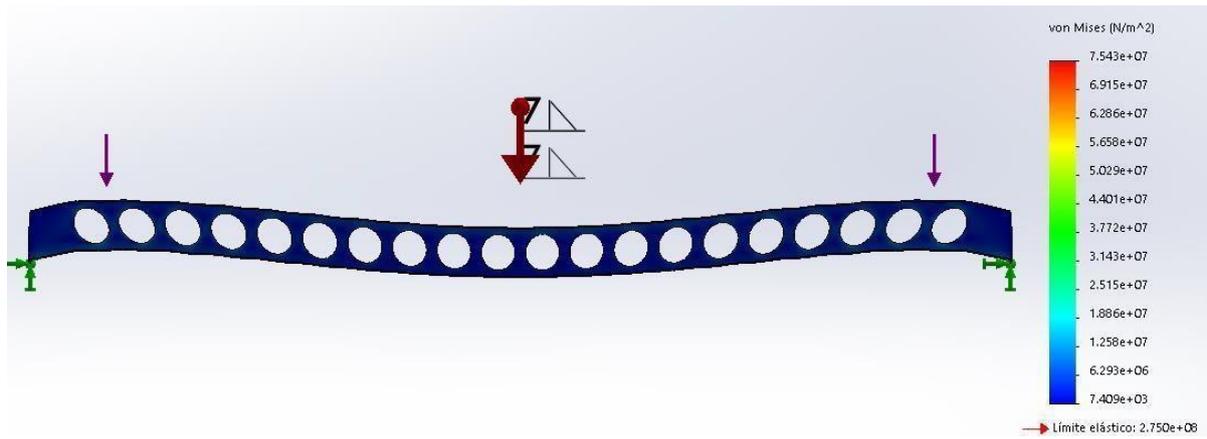


Figura 69 - Estudio de tensiones

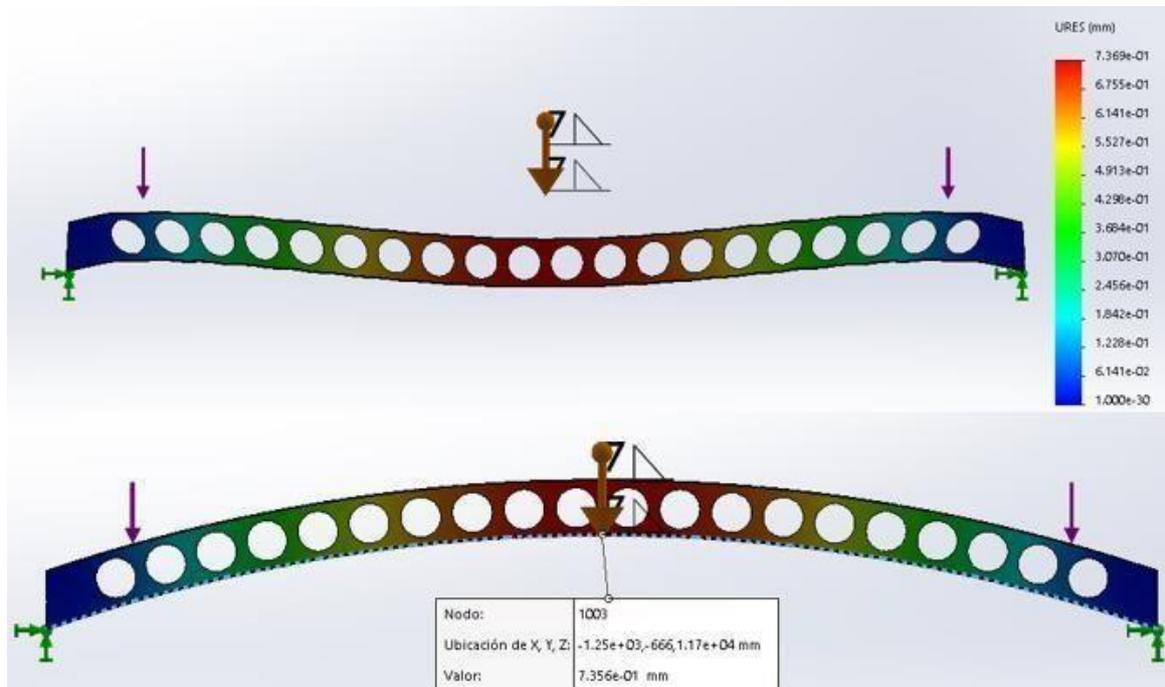


Figura 70 - Análisis de la deformada de la viga

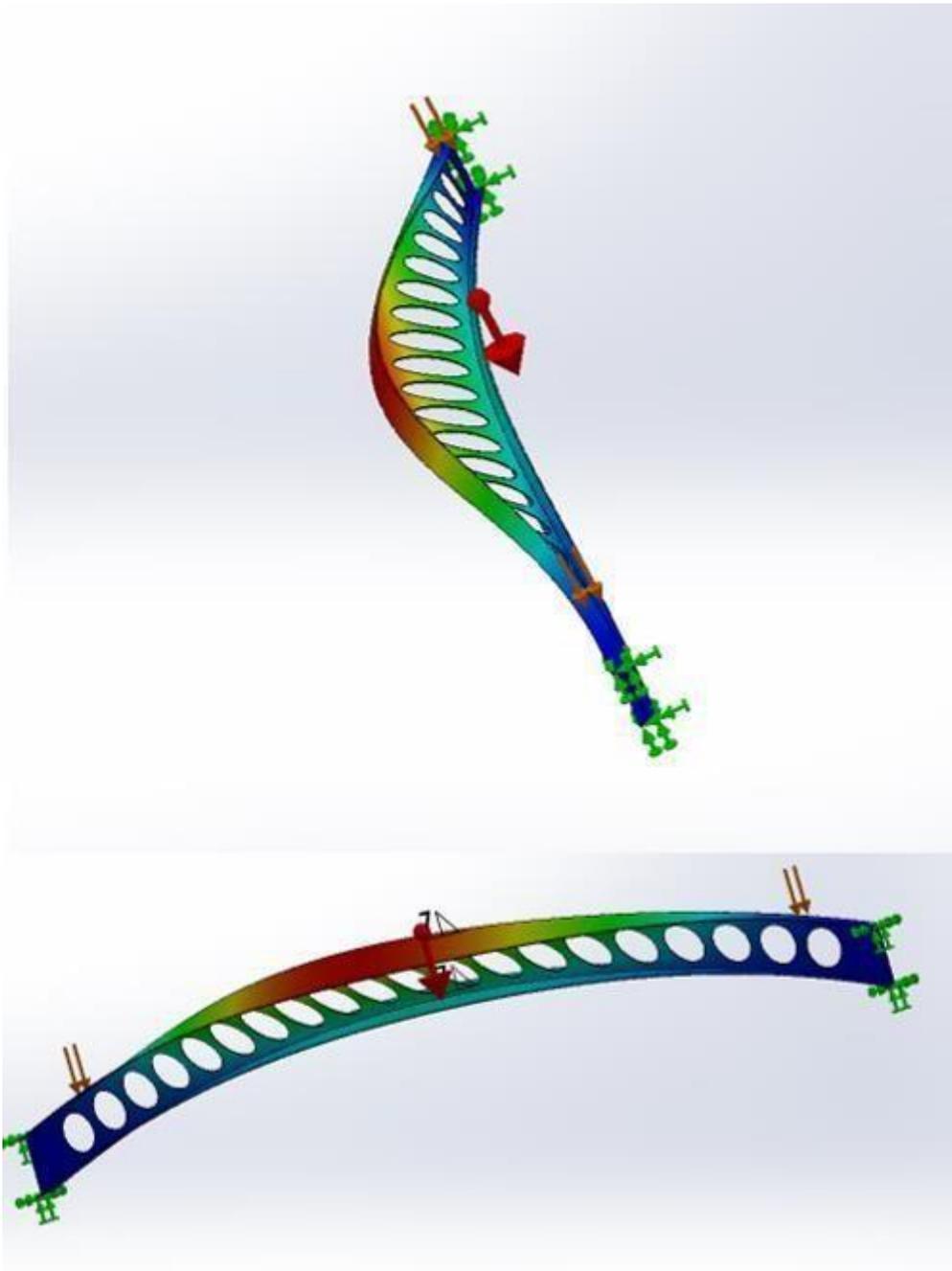


Figura 71 - Análisis de pandeo

## 9. VIABILIDAD DE LA ADAPTACIÓN DEL TALLER

La adaptación del taller según la nueva distribución en planta inicial, ver *Figura 17*, a su nueva propuesta, ver *Figura 63*, ha supuesto una nueva distribución que va a llevar una fuerte inversión pero que va a reportar un alto beneficio. El mayor trabajo se centra en el movimiento de la maquinaria, la ampliación de los almacenes y el refuerzo tanto de las áreas de residuos como de la oficina técnica.

La producción anual del taller para el año 2.022 se estima un incremento del 25 % de vigas aligeradas armadas y un 4 % de vigas aligeradas armadas curvas. Esto hace que la producción total sea de 71.078 vigas.

La política seguida será la de no generar ningún stock por lo que todo aquello que se fabrica (ver Tabla 13) se vende, es decir, cada lote que se realice ya tiene cliente.

Tabla 13 - Coste anual producción de las vigas

	Vigas/año	€/Ud.	Coste total (€)
<i>Viga aligerada hueco circular</i>	24.153	895,92	21.639.155,76
<i>Viga aligerada hueco hexagonal</i>	30.524	891,58	27.214.587,92
<i>Viga aligerada armada de hueco circular</i>	6.834	1.015,56	6.940.337,04
<i>Viga aligerada armada de hueco hexagonal</i>	6.834	1.151,04	7.866.207,36
<i>Viga aligerada armada curva</i>	2.733	2.020,30	5.521.479,90
<b>TOTAL</b>			<b>69.181.767,98 €</b>

La venta supone un incremento sobre el coste del 10 % al precio de cada viga alveolar y un 7 % para aquella que sea armada. Queda recogido en la Tabla 14.

Tabla 14 - Ventas de vigas anuales

	Vigas/año	Coste (€/Ud.)	% asociado	Precio venta (€/Ud.)	Ventas (€)
Viga aligerada hueco circular	24.153	895,92	+10 %	985,51	23.803.023,03
Viga aligerada hueco hexagonal	30.524	891,58	+10 %	980,74	29.936.107,76
Viga aligerada armada de hueco circular	6.834	1.015,56	+7 %	1.086,65	7.426.166,10
Viga aligerada armada de hueco hexagonal	6.834	1.151,04	+7 %	1.231,61	8.416.822,74
Viga aligerada armada curva	2.733	2.020,30	+7 %	2.161,72	5.907.983,49
<b>TOTAL</b>					<b>75.490.103,12 €</b>

La plantilla del personal del taller se ha incrementado en una totalidad de dos ingenieros. Uno de ellos en el departamento de ingeniería donde se hará cargo de las funciones de diseño, modelado y validación ante cualquier tipo de análisis por elementos finitos a partir del software SOLIDWORKS (37). El segundo ingeniero será contratado como Ingeniero de Producción, y será el responsable de que todo el proceso productivo se haga con la máxima calidad y garantizando también la producción. También deberá tener acceso a software. Ambos reciben una formación de 60 horas de cálculo aplicado a la actividad del taller de SOLIDWORKS. El tiempo que se encuentren en formación serán pérdidas para el taller ya que es tiempo que el ingeniero deja de producir. Además, dos puestos en la oficina se han habilitado para éstos. También se le imputan los gastos fungibles consumibles y comunicaciones en oficina. Los salarios quedan reflejados bajo la Tabla 15, los gastos asociados al curso de formación en la Tabla 16 y los gastos de oficina en la Tabla 17.

Tabla 15 - Salarios ingenieros

Salario bruto anual (€/año)

Ingeniero de Diseño	32.500 €/año
Ingeniero de Producción	32.500 €/año
<b>TOTAL</b>	<b>65.000 €/año</b>

Cabe indicar que en el coste total anual de los dos ingenieros que han sido contratados están ya incluidos todos los trabajos de cálculos estructurales necesarios, así como todos los informes técnicos que se tengan que realizar de toda viga fabricada. Considerando una cuantía del 35 % del coste anual, por lo que no se detalla como un coste independiente. Además, este porcentaje es variable a lo largo del año por los picos de trabajo que pueda haber.

Tabla 16 - Costes asociados a la formación

	Precio	Duración	Unidades	Gastos Oficina (€)
Curso SOLIDWORKS	30 €/h	60 h/ingeniero	2	3.600 €
Coste ingeniero sin producir	18,5 €/h	60 h/ingeniero	2	2.220 €
<b>TOTAL</b>				<b>5.820 €</b>

Tabla 17 - Gastos oficina

	Precio	Unidades	Gastos Oficina (€)
Ordenador portátil	1.250 €/ud.	2	2.500 €
Silla + Mesa	500 €	2	1.000 €
Licencia SOLIDWORKS	4.000 €/licencia/año	2	8.000 €
Fungibles + Comun.	1.500 €/mes	12	18.000 €
<b>TOTAL</b>			<b>29.500 €</b>

El reforzar la parte de los residuos supone el incorporar un total de 4 contenedores (6). Su coste se refleja en la Tabla 18.

Tabla 18 - Coste contenedores para residuos

	Precio	Unidades	Coste contenedores
Contenedor techo lona	4.500 €/ud.	4	18.000 €
<b>TOTAL</b>			<b>18.000 €</b>

Se incorporan un total de 20 módulos de cantilevers de doble brazo (36) en las nuevas zonas ampliadas de los almacenes de materia prima y de producto terminado. Su coste en la Tabla 19.

Tabla 19 - Coste módulos de cantilevers

	Precio	Unidades	Coste cantilever
Módulo cantilever doble brazo	2.188 €/módulo	20	43.760 €
<b>TOTAL</b>			<b>43.760 €</b>

La empresa Etxeguren Zerbitzuak S.L. (38) es la encargada de realizar todo el movimiento de los equipos y maquinaria del taller. Su trabajo tendrá una duración de 2 jornadas de 8 horas cada una. Sus costes se reflejan en la Tabla 20.

Tabla 20 - Coste movimiento equipos y maquinaria

	<i>Unidades</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Coste movimiento equipos y maquinaria</i>
<i>Movimiento equipos y maquinaria</i>	-	-	3.000 €
<i>Mano de obra</i>	100 €/h	16 h	1.600 €
<b><i>TOTAL</i></b>			<b>4.600 €</b>

La reforma de los almacenes se lleva a cabo por medio de la empresa REITEMAN MADRID S.L.U. (39). Se consideran en la Tabla 21 los costes de la demolición y gestión de residuos como la de la instalación de la nueva partición.

Tabla 21 - Coste almacenes

	<i>Precio</i>	<i>Superficie</i>	<i>Nueva partición almacenes</i>
<i>Demolición y gestión de residuos</i>	6,36 €/m <sup>2</sup>	96 m <sup>2</sup>	610,56 €
<i>Instalación nueva partición</i>	24,25 €/m <sup>2</sup>	162 m <sup>2</sup>	3.928,50 €
<b><i>TOTAL</i></b>			<b>4.539,06 €</b>

La segunda fuente de ingresos que se tiene es la venta de la chatarra. El precio de venta es de 0,35 €/kg según la información proporcionada por el GRUPO METASOL (29).

Se saben que se destina a residuos como chatarra todas las partes sobrantes de las vigas alveoladas así como todos los alveolos que se cortan de las chapas para conformar una viga aligerada armada y las partes de las chapas que sobran junto a los huecos del alma de la viga aligerada armada curva. En la Tabla 22 se puede ver los kilogramos que surgen de una sola viga así como de toda la producción anual.

Tabla 22 - Chatarra anual

	<i>Vigas</i>	<i>Kg/Viga</i>	<i>kg/año</i>
<i>Viga aligerada hueco circular</i>	24.153	26,02	682.461,06
<i>Viga aligerada hueco hexagonal</i>	30.524	19,97	609.564,28
<i>Viga aligerada armada de hueco circular</i>	6.834	203,15	1.388.327,10
<i>Viga aligerada armada de hueco hexagonal</i>	6.834	151,96	1.038.494,64
<i>Viga aligerada armada curva</i>	2.733	1.100,89	3.008.732,37
<b><i>TOTAL</i></b>			<b>6.727.579,45</b>

El beneficio que reporta la chatarra anual se aprecia en la Tabla 23.

Tabla 23 - Venta de chatarra

	Precio (€/kg)	Cantidad (kg)	Venta chatarra (€)
Chatarra anual	0,35	6.727.579,45	2.354.652,81
<b>TOTAL</b>			<b>2.354.652,81 €</b>

Una vez ya definidos todos los costes y las ventas se proceda a obtener lo que es púramente inversión para su adaptación (ver Tabla 24).

Tabla 24 - Coste de la inversión

<i>Inversión adaptación taller</i>	
Salarios (Tabla 15)	65.000 €
Costes asociados a la formación (Tabla 16)	5.820 €
Gastos oficina (Tabla 17)	29.500 €
Coste contenedores (Tabla 18)	18.000 €
Coste cantilevers (Tabla 19)	43.760 €
Coste movimiento equipos (Tabla 20)	4.600 €
Coste almacenes (Tabla 21)	4.539,06 €
<b>TOTAL</b>	<b>171.219,06 €</b>

El coste que se asocia únicamente a la modificación del taller sin tener en cuenta la oficina técnica se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25 - Coste modificación taller

<i>Coste modif. taller</i>	
Coste contenedores (Tabla 18)	18.000 €
Coste cantilevers (Tabla 19)	43.760 €
Coste movimiento equipos (Tabla 20)	4.600 €
Coste almacenes (Tabla 21)	4.539,06 €
<b>TOTAL</b>	<b>70.899,06 €</b>

El coste que se asocia a reforzar la oficina técnica se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26 - Coste refuerzo de la oficina técnica

<i>Coste refuerzo oficina</i>	
<i>Salarios (Tabla 15)</i>	65.000 €
<i>Costes asociados a la formación (Tabla 16)</i>	5.820 €
<i>Gastos oficina (Tabla 17)</i>	29.500 €
<b>TOTAL</b>	<b>100.320 €</b>

Para obtener el beneficio (ver Tabla 27 y Tabla 28) se tiene únicamente las ventas de las vigas y chatarra, los costes de la inversión del taller y de la oficina técnica, y los costes procedentes de la fabricación de las vigas.

Tabla 27 - Beneficio anual

<i>Beneficio</i>	
<i>Venta de vigas anuales (Tabla 15)</i>	75.490.103,12 €
<i>Venta de chatarra (Tabla 23)</i>	2.354.652,81 €
<i>- Coste producción vigas (Tabla 13)</i>	- 69.181.767,98 €
<b>TOTAL</b>	<b>8.662.987,95 €</b>

Tabla 28 - Beneficio tras inversión

<i>Beneficio - Inversión</i>	
<i>Beneficio (Tabla 27)</i>	8.662.987,95 €
<i>- Coste inversión (Tabla 24)</i>	- 171.219,06 €
<b>TOTAL</b>	<b>8.491.768,89 €</b>

El taller tras realizar semejante inversión genera una suma de 8.662.987,95 €.

Partiendo ya desde este último punto se tiene que establece el tiempo hasta recuperar la inversión hecha (payback). También se podrá definir el ROI que es el indicativo que muestra la cantidad de dinero que se pierde o se gana tras la inversión en cuestión.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Invertido}}{\text{Beneficio}} = \frac{171.219,06}{8.662.987,95} = 0,0198 \text{ años} = 0,237 \text{ meses} = 7,12 \text{ días}$$

Se aprecia que la inversión en apenas un mes se ha recuperado y además obteniendo uso valores de beneficio bastante altos.

El ROI es el siguiente,

$$\text{ROI} = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} = \frac{8.491.768,89}{171.219,06} = 49,59$$

Un valor del ROI de 49,59 se traduce que las ganancias previstas para el año 2.022 sean de un 4.959,59 %.

Se puede concluir diciendo que el proyecto planteado para inversión en la adaptación de un taller hacia un mercado más moderno es totalmente viable.



## 10. CONCLUSIONES

Tras la realización de este documento se extraen las siguientes conclusiones,

- Se ha propuesto una nueva gama de fabricación de vigas con las que se ha demostrado su capacidad técnica tanto en el campo de su diseño con el refuerzo en la parte de oficina técnica en la que ahora van a poder realizar todas las simulaciones pertinentes aportando un valor más robusto gracias a incluir sus informes técnicos avalando la capacidad resistente de éstas como su viabilidad de fabricación en el taller.
  - Se alcanza a presentar un estudio de los costes que conlleva la fabricación de cada una de las vigas que ahora ya se fabrican en el taller.
  - Ha sido totalmente viable la reestructuración del taller aportando el nuevo layout. Esto se cuantifica con una suma total de 70.899,06 € en cuanto al taller se refiere. Para llevar a cabo esta reestructuración del taller se ha hecho falta la contratación de un ingeniero de diseño y otro de producción con una cuantía salarial bruta total de 65.000 €. Esta contratación lleva consigo unos gastos de oficina que ascienden a 29.500 €.
  - Se hace una compra de dos licencias anuales del software que manejarán estos ingenieros con un coste de 4.000 € cada una. Por tanto, el coste total suma 8.000 €.
  - Ambos ingenieros son sometidos a un curso de 60 h en donde se les formara acerca del empleo de SOLIDWORKS como herramienta de cálculo para la actividad que desempeña el taller con un coste de 3.600 €. Esta formación repercute en una pérdida para el taller ya que en todo ese tiempo el ingeniero no está produciendo. Esta pérdida equivale a 2.220 €. La suma total de la formación impartida asciende a 5.820 €.
  - Se concluye que el coste de la inversión realizada para adaptar el taller a las nuevas solicitudes debidas a la nueva línea de fabricación es de una cuantía total de 171.219,06 €.
  - El beneficio que obtendrá el taller al cerrar el año 2022 tras retirar todos los cargos y la propia inversión a las ventas es de 8.662.987,95 €.
- Con esto se puede decir que tras hacer el análisis del retorno sobre la inversión (ROI) se obtiene un valor de 51,37 lo que es muy positivo para el taller ya que reportara el retorno bastante rápido, consiguiéndose en 6,87 días, es decir, en 8 días laborales ya estaría retornada la inversión.

Además también se concluye tras la realización del presente Trabajo de Fin de Máster con lo siguiente,

- El poder haber abordado una problemática real como la adaptación de un taller que desempeña una actividad industrial, siendo la fabricación de vigas aligeradas especiales, realizando las mínimas modificaciones sobre la nave de partida.
- Con este trabajo he aprendido lo costosa que es la labor de un Ingeniero Industrial enfrentándose a situaciones cotidianas en su puesto de trabajo, comprendiendo la gran complejidad de aspectos técnicos y situaciones a las que se encarar.
- La combinación de los conocimientos adquiridos del Grado en Ingeniería Mecánica con el Máster en Ingeniería Industrial han hecho que haya sido posible la realización de este documento.
- El precio del acero es muy volátil y su valor cambia diariamente, lo que provoca que el coste de fabricación de las vigas que plantea esta adaptación del taller puede que sufra modificaciones en la utilización de este documento en futuras situaciones.



## 11. LINEAS FUTURAS

Una vez concluido el documento aparecen una serie de aspectos que lo pueden complementar de una forma muy beneficiosa para la actividad que se desarrolla ahora en el taller. A continuación, aparecen enumerados:

- Una vez que se haya llevado a cabo la adaptación del taller se debe proceder a certificar el taller en términos de calidad con la Norma ISO 9001:2015 (40), medioambientalmente con la Norma ISO 14001:2015 (41) y, también, en términos de riesgos laborales con la Norma ISO 45001:2018 de Seguridad y salud en el trabajo (42).
- Se propone realizar un estudio minucioso con SOLIDWORKS (37) de cada una de las tipologías de vigas que se han propuesto para la adaptación y compararlo con las que inicialmente fabricaba el taller. Se pretenden observar los mecanismos de fallo que aparecen en cada viga y analizar los mecanismos de fallo que se comentan en el *ANEXO IV* y cómo evolucionan a medida que las cargas varían. También se comparan los estudios realizados con un programa que trabaja a partir del método de elementos finitos con la formulación matemática del *ANEXO III*.
- El taller en términos de fabricación de vigas no cubre la totalidad de las fases. Por ello, se plantea un futuro estudio de ampliación de la nave del taller para ejecutar la operación de pintado (para acciones accidentales como el fuego o para evitar el fenómeno de corrosión) sobre la parte de parcela que aún no ha sido edificada. Aproximadamente todavía 5.100 m<sup>2</sup> son útiles para que se pueda llevar a cabo.
- Reforzar tanto la oficina técnica como el taller con la incorporación de la misma tipología de viga aligerada armada pero con materiales de distinto módulo elástico (23).
- Iniciar una línea de investigación I+D+i por parte de los ingenieros de la oficina técnica acerca de las técnicas basadas en topología matemática de optimización de estructuras (43) y estudiar la viabilidad en incorporar en el taller la tecnología más actual para poder llevar a cabo la fabricación de esta nueva línea de productos.



## 12. BIBLIOGRAFÍA

1. ACB - Cellular Beams - ARCELORMITTAL Long - Catálogo PDF | Documentación | Brochure [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://pdf.archiexpo.es/pdf-en/arcelormittal-long/acb-cellular-beams/55693-253986.html>
2. Vigas alveolares | Renedo Metal [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <http://www.renedometal.es/vigas-alveolares/>
3. De Tordesillas TO. TORDESILLAS SECTOR I TORDESILLAS-VALLADOLID [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://tordesillas.ayuntamientosdevalladolid.es/documents/302070/438428/ec2843dc62bfdcfea4f15ac6d2fb4a0f.pdf/3eb5ab47-bdb3-49e0-84da-d5aab6b49aec>
4. tordesillas poligono industrial - Bing Maps [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.bing.com/maps?q=tordesillas+poligono+industrial&FORM=HDRSC4>
5. Sede Electrónica del Catastro - Fondo mapa de España [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?pest=rustica&from=OVCBusqueda&ZV=NO&ZR=NO&anyoZV=&tematicos=&RCCompleta=&pol=&par=&DescProv=VALLADOLID&prov=47&muni=166&DescMuni=TORDESILLAS&TipUR=R&tc=R&del=47&mun=166>
6. Home | UNIT45 Containers [Internet]. [cited 2021 Aug 26]. Available from: <https://unit45.com/es/>
7. Documentos CTE [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/DocumentosCTE.html>
8. TÉCNICAS Y METALURGIA DEL OXICORTE [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: [http://www1.frm.utn.edu.ar/cmateriales/Trab.Inves.\(alum\)/Técnicas de oxicorte/BENITES.htm](http://www1.frm.utn.edu.ar/cmateriales/Trab.Inves.(alum)/Técnicas de oxicorte/BENITES.htm)
9. Fundamentos Corte por Plasma [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.lincolnelectric.com/es-es/support/welding-how-to/Pages/plasma-cutting-basics-detail.aspx>
10. Grunbauer BV - Diemen, Nederland [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <http://www.grunbauer.nl/>
11. What makes castellated beams so desirable as a constructional element? [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <http://www.grunbauer.nl/eng/waarom.htm>
12. Gantry Cnc Fine Plasma Oxyfuel Oxy Flame Straight Strips Cutting Machine For H Beam Welding Production Line - Buy Cheap Cnc Plasma Cutter,Mini Plasma Cnc,Cnc Plasma Water Table Product on Alibaba.com [Internet]. [cited 2021 Jul 11]. Available from: [https://www.alibaba.com/product-detail/Gantry-CNC-Fine-plasma-Oxyfuel-Oxy\\_1700006721044.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_image.35e721873KKoS2](https://www.alibaba.com/product-detail/Gantry-CNC-Fine-plasma-Oxyfuel-Oxy_1700006721044.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.35e721873KKoS2)
13. Soplete 62-3 [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: [https://soybra.com/soplete\\_62-3.htm](https://soybra.com/soplete_62-3.htm)
14. FENGWEI MACHINERY / LHA Gantry-Type Auto-Welding Machine [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from:

- <https://www.wxfengwei.com/uploads/file/5e96ca0bab67e.pdf>
15. SIC Marking. Marcadora portátil por micropercusion E-Touch.
  16. Sistema integral de inspección automática de soldaduras - Automática y Robótica [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://automatica-robotica.es/producto/producto-Sistema-integral-de-inspeccion-automatica-de-soldaduras-308381.html>
  17. ARDROX SPRAY PENETRANTE 996PB 400ML - Soldadura.shop [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://soldadura.shop/accesorios-soldadura/279-ardrox-996pb.html>
  18. Hierros Santander I Almacen metalúrgico en Cantabria I venta de vigas Cantabria I venta metales Cantabria I almacen chapa acero Cantabria, corte de acero Cantabria, venta de tubos acero Cantabria, [Internet]. [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://hierrossantander.com/>
  19. Hierros Manuel Vidal - Almacén de Hierros en Zamora y Salamanca [Internet]. [cited 2021 Aug 18]. Available from: <https://www.hierrosmanuelvidal.net/>
  20. Mapa plantas :: ArcelorMittal Espanol [Internet]. [cited 2021 Aug 5]. Available from: <https://spain.arcelormittal.com/what-we-do/mapa-plantas.aspx>
  21. Reebok ya ha abierto 78 boxes de CrossFit en España - CMD Sport [Internet]. [cited 2021 Aug 5]. Available from: <https://www.cmdsport.com/esencial/cmd-fitnessgym/reebok-ya-ha-abierto-78-boxes-de-crossfit-en-espana/>
  22. Flores C. Vigas armadas híbridas de acero. Estado del conocimiento Hybrid Steel plate girders. State of the art [Internet]. Vol. 35, Revista Ciencia e Ingeniería. Universidad de los Andes; 2014 [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507550625005>
  23. Vigas armadas híbridas de acero. Estado del conocimiento [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507550625005>
  24. Pástor M, Bocko J, Kula T, Roszkos C-S. Possibilities of Optimizing the Shape and Geometry of Castellated Beams Using Numerical and Experimental Modeling. Am J Mech Eng [Internet]. 2016 Dec 17 [cited 2021 Jul 10];4(7):357–62. Available from: <http://pubs.sciepub.com/ajme/4/7/22>
  25. Curved cellular beams: Adding strength to remove weight [Internet]. [cited 2021 Jul 10]. Available from: <http://www.dmaeuropa.com/tabid/3612/Itemid/4486/default.aspx>
  26. (No Title) [Internet]. [cited 2021 Jul 10]. Available from: [https://www.sefindia.org/forum/files/cambering\\_in\\_steel\\_beams\\_260.pdf](https://www.sefindia.org/forum/files/cambering_in_steel_beams_260.pdf)
  27. Ricker DT. Cambering Steel Beams. 2003.
  28. Cambering Machines vs Hot Bending - Bay-Lynx Manufacturing Inc. [Internet]. [cited 2021 Jul 10]. Available from: <https://bay-lynx.com/education/cambering-machines-vs-hot-bending/>
  29. GRUPO METASOL [Internet]. [cited 2021 Aug 25]. Available from: <https://www.grupometasol.com/>
  30. BASE DE PRECIOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL GOBIERNO DE EXTREMADURA [Internet]. [cited 2021 Jul 11]. Available from: <http://basepreciosconstruccion.gobex.es/p/p03al/p03al.html>

31. IPE (Sección Bruta) | PRONTUARIOS DE INGENIERÍA CIVIL [Internet]. [cited 2021 Jul 11]. Available from: <http://prontuarios.info/perfiles/IPE>
32. UTILIDADES - HORFASA - Caldereria y Transformados Metalicos en acero al carbono y acero inoxidable [Internet]. [cited 2021 Jul 11]. Available from: <http://www.horfasa.com/utilidades.php?cat=107>
33. FENGWEI MACHINERY / CNC-CG-13000 [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.wxfengwei.com/uploads/file/5e96a8038123f.pdf>
34. IPE Perfil básico Base profile Profilo di base.
35. Tarifa 3.0A: Potencia, Precio por Periodos, Condiciones y Facturas [Internet]. [cited 2021 Jul 12]. Available from: <https://comparadorluz.com/pymes/tarifas/30>
36. Cantilevers • Charles Service [Internet]. [cited 2021 Aug 27]. Available from: <https://www.charles-service.fr/produits/amenagement/cantilevers/>
37. SOLIDWORKS [Internet]. [cited 2021 Jul 9]. Available from: <https://www.solidworks.com/es>
38. Instalaciones Industriales y Mantenimientos Etxeguren. <https://www.etxeguren.com/> [Internet]. [cited 2021 Aug 26]; Available from: <https://www.etxeguren.com/>
39. Precio del pladur por m2 - Reiteman Empresa de Reformas [Internet]. [cited 2021 Aug 26]. Available from: <https://www.reiteman.com/precio-del-pladur-por-m2/>
40. Certificación ISO 9001- AENOR [Internet]. [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.aenor.com/certificacion/calidad/iso-9001>
41. Certificación ISO 14001 gestión ambiental - AENOR [Internet]. [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.aenor.com/certificacion/medio-ambiente/gestion-ambiental>
42. AENOR Certificación - Seguridad y salud en el trabajo ISO 45001 [Internet]. [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.aenor.com/certificacion/riesgos-y-seguridad/seguridad-salud-trabajo-45001>
43. Navarrina F, Muiños I, Colominas I, Casteleiro M. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ESTRUCTURAS: UNA FORMULACIÓN DE MÍNIMO PESO CON RESTRICCIONES EN TENSIÓN. [cited 2021 Aug 30]; Available from: <http://caminos.udc.es/gmni>
44. VIGA SIMPLE APOYADA: carga puntual F genérica.
45. J. Estévez Cimadevila, E. Martín Gutiérrez JAVR. VIGAS ALVEOLADAS. BELLISCO Ediciones Técnicas y Científicas; 2000. p. 166.
46. BOE.es - BOE-A-2011-10879 Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE). [Internet]. [cited 2021 Aug 5]. Available from: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-10879](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-10879)
47. Anejos Nacionales del Eurocódigo 3 | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [Internet]. [cited 2021 Aug 5]. Available from: <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-de-estructuras-de-acero/cpa/anejos-nacionales-del-eurocodigo-3>
48. (No Title) [Internet]. [cited 2021 Jul 10]. Available from: [https://menkulasi.weebly.com/uploads/1/0/9/4/10945509/menkulasi\\_et\\_al\\_castellated\\_](https://menkulasi.weebly.com/uploads/1/0/9/4/10945509/menkulasi_et_al_castellated_)

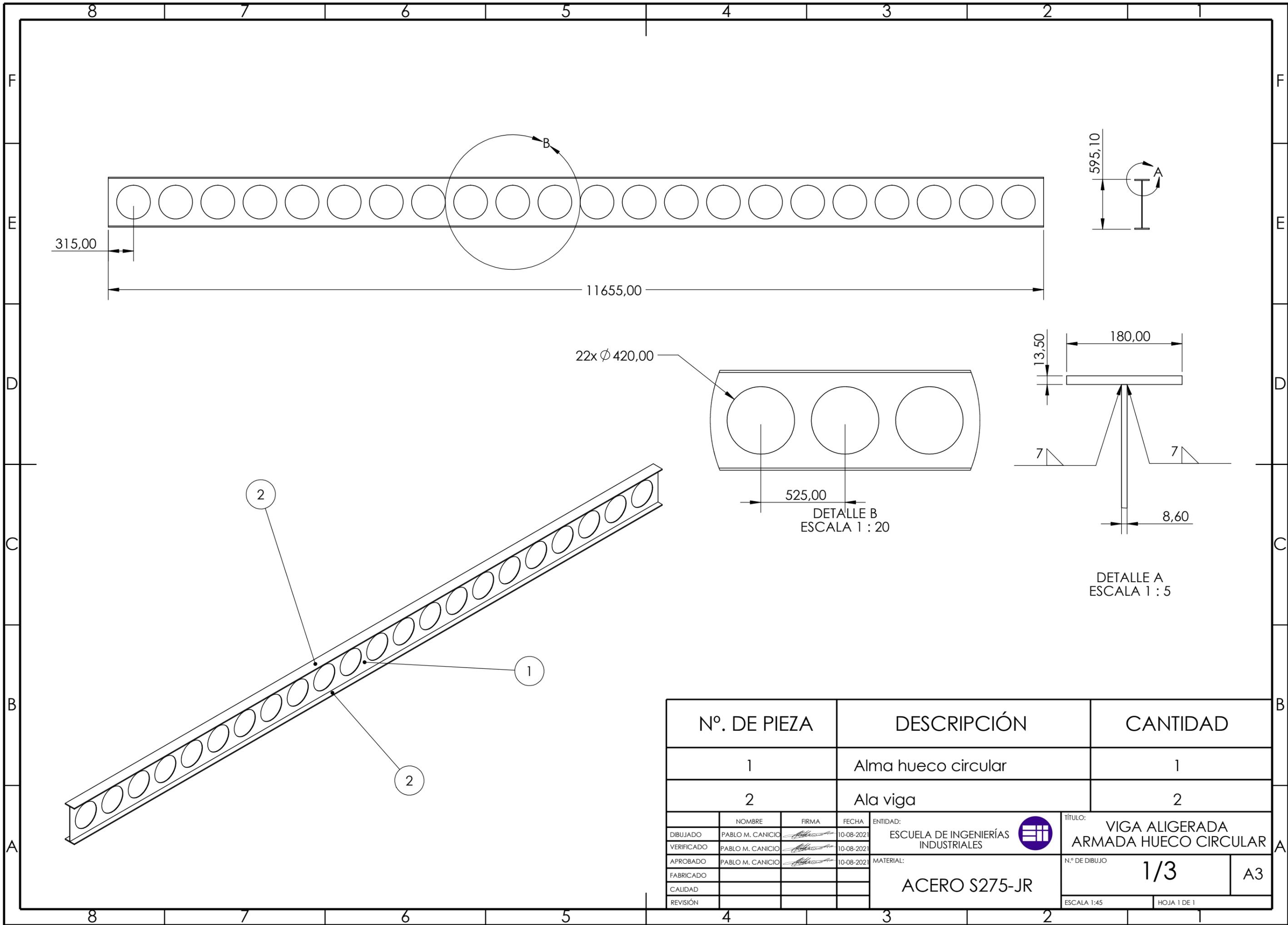
beams.pdf

49. (No Title) [Internet]. [cited 2021 Jul 10]. Available from:  
<http://doi.prz.edu.pl/pl/pdf/biis/416>
50. Failure modes determining the resistance and the stability of steel cellular beams -  
CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY  
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE  
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (4/15), październik-grudzień 20.
51. Superficie de Segmento Circular [Internet]. [cited 2021 Aug 3]. Available from:  
<https://neoparaiso.com/logo/segmento-de-circulo.html>

## **ANEXO I - PLANOS**

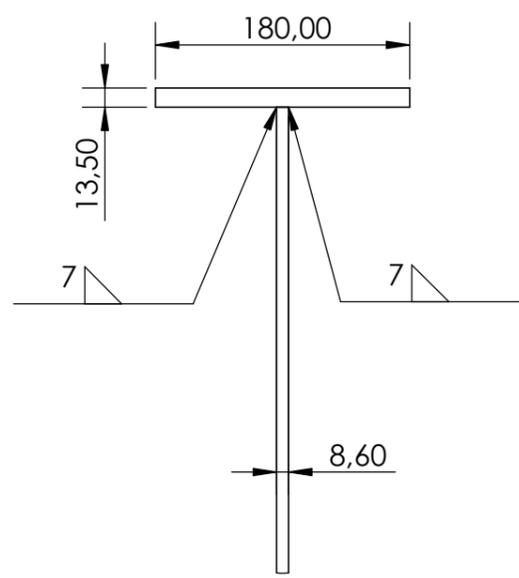
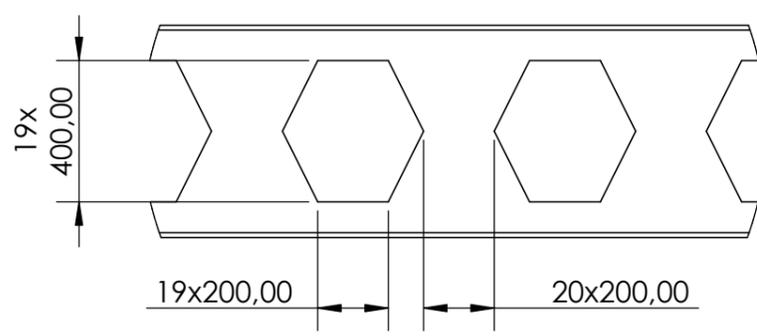
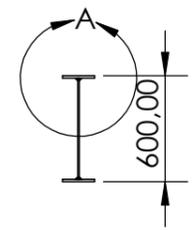
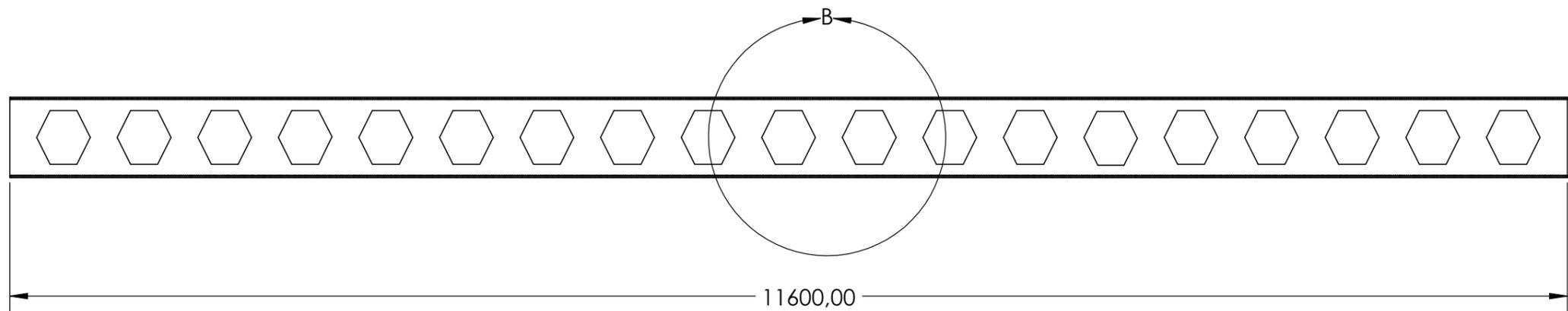
Se muestran los planos para el correcto montaje de las vigas aligeradas armadas y viga curva de alveolo circular.

## **I.I - Plano viga aligerada armada hueco circular**



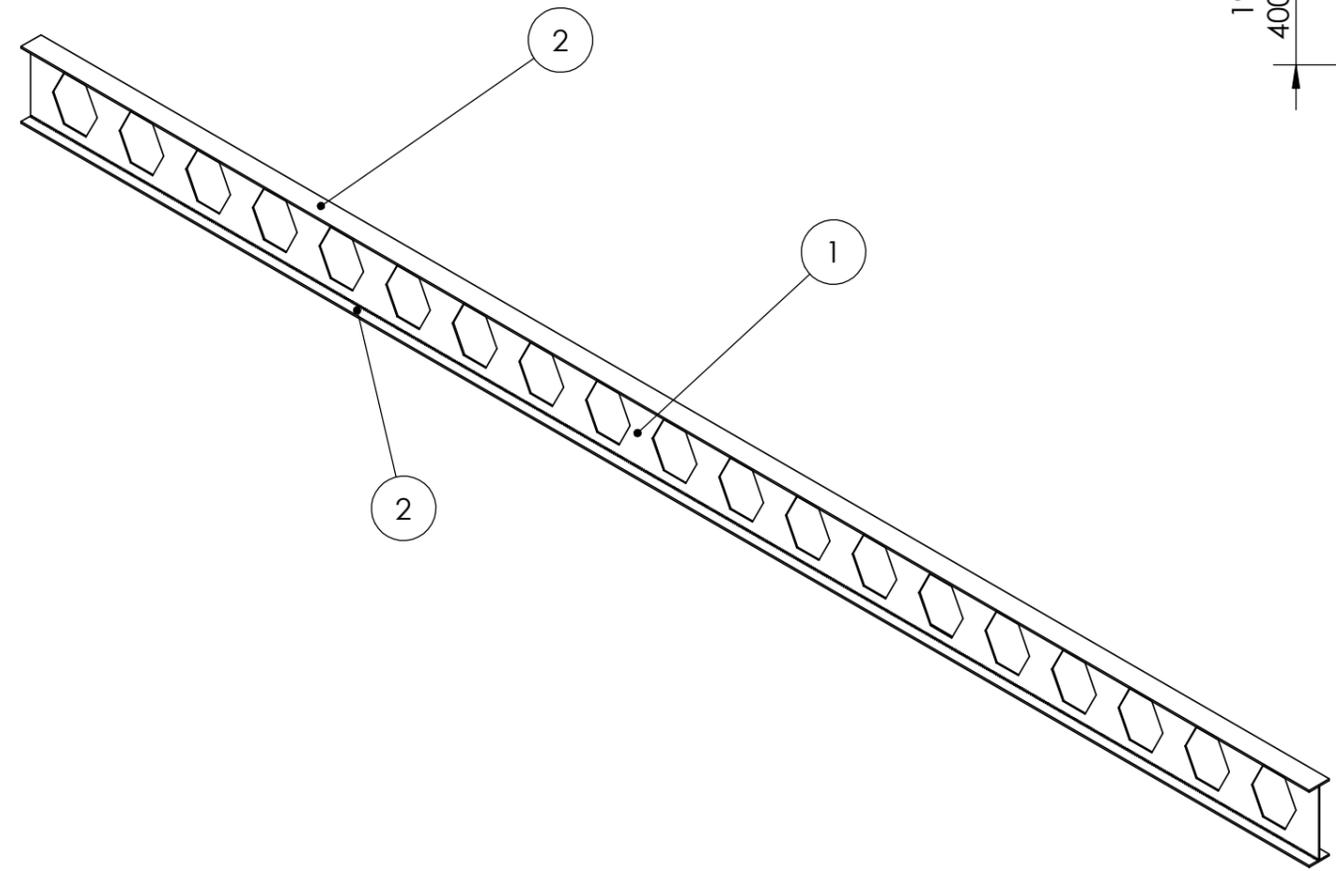
Nº. DE PIEZA		DESCRIPCIÓN		CANTIDAD	
1		Alma hueco circular		1	
2		Ala viga		2	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ENTIDAD:	TÍTULO:
DIBUJADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Firma]</i>	10-08-2021	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	VIGA ALIGERADA ARMADA HUECO CIRCULAR
VERIFICADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Firma]</i>	10-08-2021		
APROBADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Firma]</i>	10-08-2021	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
FABRICADO				ACERO S275-JR	1/3
CAUIDAD					A3
REVISIÓN					ESCALA 1:45

## **I.II - Plano viga aligerada armada hueco hexagonal**



DETALLE B  
ESCALA 1 : 20

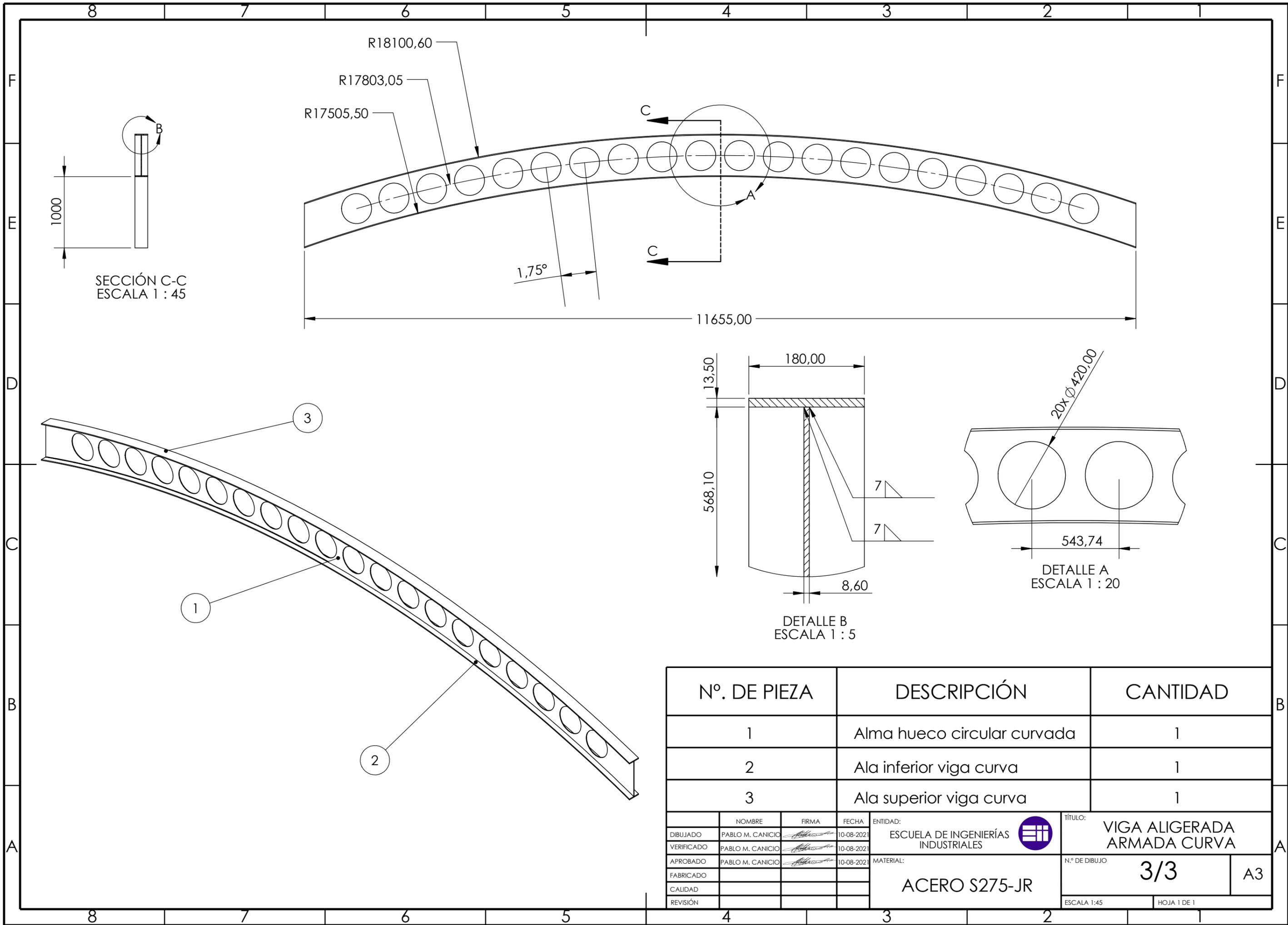
DETALLE A  
ESCALA 1 : 5



Nº. DE PIEZA		DESCRIPCIÓN		CANTIDAD		
1		Alma hueco hexagonal		1		
2		Ala viga		2		
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ENTIDAD:	TÍTULO:	
DIBUJADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Signature]</i>	10-08-2021	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	VIGA ALIGERADA ARMADA HUECO HEXAGONAL	
VERIFICADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Signature]</i>	10-08-2021			
APROBADO	PABLO M. CANICIO	<i>[Signature]</i>	10-08-2021	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
FABRICADO				ACERO S275-JR	2/3	
CAUIDAD						A3
REVISIÓN						
				ESCALA 1:40	HOJA 1 DE 1	



### **I.III - Plano viga aligerada armada curva de hueco circular**



SECCIÓN C-C  
ESCALA 1 : 45

11655,00

1,75°

R18100,60

R17803,05

R17505,50

1000

13,50

180,00

568,10

8,60

DETALLE B  
ESCALA 1 : 5

20xØ420,00

543,74

DETALLE A  
ESCALA 1 : 20

Nº. DE PIEZA		DESCRIPCIÓN		CANTIDAD	
1		Alma hueco circular curvada		1	
2		Ala inferior viga curva		1	
3		Ala superior viga curva		1	
NOMBRE		FIRMA		FECHA	
DIBUJADO		PABLO M. CANICIO		10-08-2021	
VERIFICADO		PABLO M. CANICIO		10-08-2021	
APROBADO		PABLO M. CANICIO		10-08-2021	
FABRICADO					
CALIDAD					
REVISIÓN					
ENTIDAD:				TÍTULO:	
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES				VIGA ALIGERADA ARMADA CURVA	
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
ACERO S275-JR				3/3	
ESCALA 1:45				HOJA 1 DE 1	

3/3

A3

ESCALA 1:45

HOJA 1 DE 1



## ANEXO II – COSTES FABRICACIÓN VIGAS

Se reflejan los cálculos desarrollados para la obtención de los costes para las vigas aligerada y armada de alveolo hexagonal y, también, para la viga aligerada armada curva de alveolo circular.

### II.I- Coste viga alveolar hexagonal

Todos los datos de velocidades de corte y soldadura (14,33) son determinantes, y se tienen que tener en cuenta.

La viga de partida es una IPE400 de 12 metros de longitud pero que una vez procesada y finalizada queda reducida a 11,6 metros.

Especificaciones geométricas (32) proporcionadas por el catálogo de HORFASA.

El resultado final, ver Figura 72, se observa a continuación,

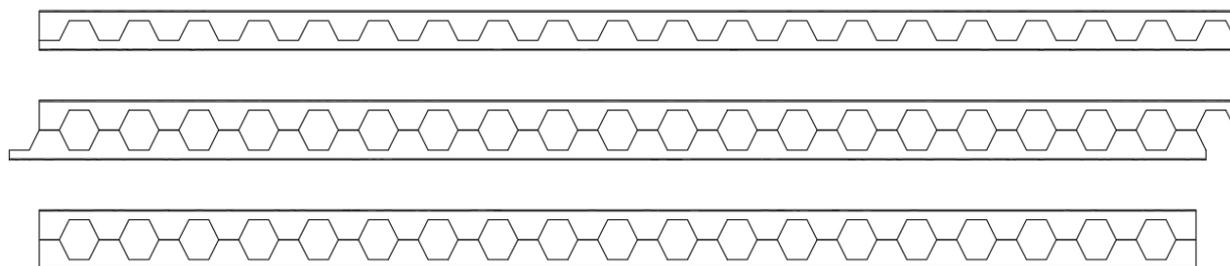


Figura 72 - Proceso viga alveolar hexagonal

Finalmente resulta en una viga con una totalidad de 19 huecos o alveolos hexagonales

Se realiza una única pasada de corte y dos para la soldadura.

Las longitudes totales que se van a cortar y soldar quedan reflejadas en la Tabla 29.

Tabla 29 - Longitudes proceso corte y soldadura viga alveolar hexagonal

#### LONGITUDES TOTALES

<i>Proceso de corte</i>	16,94 m
<i>Proceso de soldadura</i>	8,00 m

La máquina de corte por plasma es capaz de trabajar a una velocidad de corte igual a 3,5 m/minuto por lo que tiempo que se emplea en este primer paso de la viga por zona de fabricación es igual a 4,841 minutos.

Una vez cortada se procede a su soldado. La máquina es capaz de soldar hasta una velocidad de 1,5 m/minuto. Finalmente, el tiempo que se emplea en soldar es igual a 5,33 minutos, pero a mayores se le suma aproximadamente otro minuto que corresponde con el volteo de la viga para el soldado del otro lado. Por tanto, el tiempo total en esta fase es de 6,33 minutos.

El tiempo total que cada viga requiere es de 11,17 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 5,37 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 10,74 piezas a la hora.

Según el convenio del metal (35) anualmente se trabaja una totalidad de 222 días.

Si la producción anual fuese a un 100 % de productividad y eficiencia con el dato proporcionado de los días de trabajo anuales se alcanzaría una producción de 38.155,58 vigas anuales. Pero considerando el OEE del 80 % la producción definitivamente sería de 30.524 vigas.

Se tiene calculado el valor de la viga de acero generada a partir de chapas a 875,16 €. Sabiendo la producción anual se puede estimar que el coste de material prima anual ascenderá a 26.713.383,84 €.

La mano de obra directa se conserva al igual que la indirecta. La primera son 390.720 € y la parte indirecta son 97.680 €.

El coste por mantenimiento, amortizaciones y energéticos se conservan. Éstos son 1.475 €, 5.900 € y 5.562,35 €, respectivamente.

Recogemos en la Tabla 30 la totalidad de los costes,

*Tabla 30 - Costes imputados viga alveolar hexagonal*

<i>COSTES (€)</i>	
<i>MATERIA PRIMA</i>	26.713.383,84
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>27.214.721,19</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga hexagonal} = \frac{27.214.721,19}{30.524} = 891,58 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 891,58 €.

Adicionalmente, se piensa en una segunda actividad para una misma viga y es el proceso de macizado de cualquier alveolo de la viga en cuestión. En este caso se va a evaluar el coste que supondría el macizar el primer y último hueco. Dos alveolos por viga suponen un total de 16 kg. Esto hace un total de 41,11 €.

Para el caso de las vigas alveolares supone un incremento en la longitud de corte como en la de soldadura.

Tabla 31 – Longitud a soldar (viga macizada)

<i>Longitud</i>	
<i>Proceso de soldadura</i>	5,18 m

La parte proporcional de consumo energético que se imputa a una única viga para 5,18 m es igual a 0,068 €.

Por tanto, el coste final de la viga macizada asciende a 932,76 €.

### **II.II- Coste viga aligerada armada hexagonal**

Se deben cumplir las características geométricas que poseen las vigas alveolares celulares ya que se trata de generar un modelo exacto, pero con un proceso de fabricación totalmente distinto. Para ello no es más que necesario tres chapas de las que dos de ellas serán idénticas ya que serán las alas de la viga y la restante el alma.

Las dimensiones planas son las siguientes,

- Ala: 180 mm x 13,5 mm ( $A=2,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ).
- Alma: 573 mm x 8,6 mm ( $A=4,927 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ).

Por tanto, se tiene ya el valor del área total de la sección que es igual a  $9,787 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Si se considera un valor promedio de la densidad del acero igual a  $7.750 \text{ kg/m}^3$  es posible saber cuál es la masa por metro lineal. Ésta es igual a 75,849 kg/m.

La viga tiene una longitud total de 12 m.

Por tanto, el coste de los materiales que consolidan la viga asciende a 1.092,23 €.

El resultado final de la viga, ver Figura 73, es el siguiente,

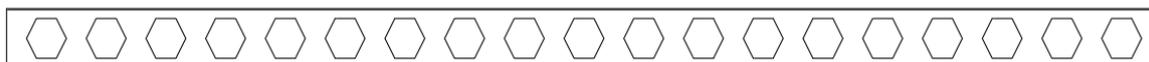


Figura 73 - Viga armada hueco hexagonal

Finalmente resulta en una viga con una totalidad de 19 huecos o alveolos circulares.

La zona a soldar, ahora, es únicamente un total de cuatro cordones (dos por ala) que recorren de principio a fin la viga.

Las longitudes totales que se van a cortar y soldar quedan reflejadas en la Tabla 32.

Tabla 32 - Longitudes de corte y soldadura viga armada hueco hexagonal

<i>LONGITUDES TOTALES</i>	
<i>Proceso de corte</i>	24,59 m
<i>Proceso de soldadura</i>	48,00 m

La máquina de corte por plasma es capaz de trabajar a una velocidad de corte igual a 3,5 m/minuto por lo que tiempo que se emplea en este primer paso de la viga por zona de fabricación es igual a 7,03 minutos.

## **RESUMEN**

En el sector de la construcción con estructura metálica es habitual la manipulación de perfiles en doble T con el fin de obtener perfiles con unas prestaciones superiores a los que se encuentran estandarizados.

En este documento se trata de adaptar el taller de calderería tradicional donde se fabrican vigas alveolares para que, además, pueda fabricar vigas aligeradas partiendo de chapas que se cortan y arman convenientemente por medio de soldadura para conformar, así, el alma y las alas, pudiendo de esta forma optimizar el material en función de las solicitaciones y crear geometrías especiales como son las curvas, entre otras.

Para evaluar la viabilidad de la adaptación se estiman los costes derivados, incluyéndose las modificaciones en el layout y la necesidad del cálculo que permita evaluar la adecuación resistente de las vigas que se fabrican, dando un valor añadido a la actividad industrial.

## **PALABRAS CLAVE**

Taller de calderería, vigas alveolares, geometrías especiales, chapas, costes.

## **ABSTRACT**

In the steel structure construction industry, it is common to manipulate double T-profiles in order to obtain profiles with higher performance than those that are standardised.

In this document, the aim is to adapt the traditional sheet metal workshop where castellated beams are manufactured so that, in addition, special beams can be made from steel sheets that are conveniently cut and assembled by welding to form the web and the flanges, thus being able to optimise the material according to the stresses and create special geometries such as curved beams, among others.

In order to assess the feasibility of the workshop adaptation, the derived costs are estimated, including the modifications in its layout and the need for the enlarged technical office to assess the technical specifications of the beams that are manufactures, giving added value to the industrial activity.

## **KEYWORDS**

Steel industry, castellated beams, special beams, steel sheets, costs.

Una vez cortada se procede a su soldado. La máquina es capaz de soldar hasta una velocidad de 1,5 m/minuto. Finalmente, el tiempo que se emplea en soldar es igual a 32 minutos, pero a mayores se le suma aproximadamente otro minuto que corresponde con el volteo de la viga para el soldado del otro lado. Por tanto, el tiempo total en esta fase es de 33 minutos.

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de 40,03 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 1,50 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 3 piezas a la hora.

Según el convenio del metal (35) anualmente se trabaja una totalidad de 222 días.

Si la producción anual fuese a un 100 % de productividad y eficiencia con el dato proporcionado de los días de trabajo anuales se alcanzaría una producción de 10.656 vigas anuales. Pero considerando el OEE del 80 % la producción definitivamente sería de 8.524 vigas.

Se tiene calculado el valor de la viga de acero generada a partir de chapas a 1.092,23 €. Sabiendo la producción anual se puede estimar que el coste de material prima anual ascenderá a 9.310.168,52 €.

La mano de obra directa se conserva al igual que la indirecta. La primera son 390.720 € y la parte indirecta son 97.680 €.

El coste por mantenimiento, amortizaciones y energéticos se conservan. Éstos son 1.475 €, 5.900 € y 5.562,35 €, respectivamente.

Recogemos en la Tabla 33 la totalidad de los costes,

*Tabla 33 - Costes imputados viga armada hexagonal*

**COSTES (€)**

<i>MATERIA PRIMA</i>	9.310.168,52
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b>TOTAL</b>	<b>9.811.505,87</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga celular} = \frac{9.811.505,87}{8.524} = 1.151,04 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 1.151,04 €.

Se piensa en la opción de generar un macizado de la zona de los apoyos de la viga. En este caso se va a evaluar el coste que supondría el macizar el primer y último hueco.

Gracias al proceso de fabricación de las vigas armadas el macizado se genera no cortando el alveolo que interese, que en ese caso son los huecos extremos. Las nuevas longitudes en la Tabla 34.

Tabla 34 - Nuevas longitudes de corte y soldadura (viga aligerada hexagonal macizada)

<i>LONGITUD TOTAL</i>	
<i>Proceso de corte</i>	22,00 m
<i>Proceso de soldadura</i>	51,80 m

Esto implica que los tiempos de operación se incrementen los tiempos de operación de cortado y soldado (considerando el volteo de la viga de un minuto) alcanzan unos tiempos de 6,29 y 33 minutos.

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de 39,29 minutos por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen 1,53 vigas.

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de 3,06 vigas/hora. Y anualmente hacen un total de 10.869 vigas a plena carga, es decir al 100 %. Estimando un OEE del 80 % la producción anual sería de 8.695 vigas.

El coste de materia prima asciende a una totalidad de 9.469.939,85 €.

Conservando el resto de los costes se observa en la Tabla 35 el nuevo coste total,

Tabla 35 - Costes imputados viga aligerada hexagonal macizada

<i>COSTES (€)</i>	
<i>MATERIA PRIMA</i>	9.469.939,85
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>9.998.277,20</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga celular} = \frac{9.998.277,20}{8.695} = 1.149,89 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 1.149,89 €.

### **II.III- Coste viga aligerada armada curva de alveolo circular**

En este caso se procede a calcular el coste de la viga aligerada armada especial. Se trata de una viga curva. En el apartado 9 viene todo el diseño de la viga curva. Además, presentarán una totalidad de 20 alveolos en vez de los 22 que se proponen para la viga plana. El volumen de la chapa de partida para cortar el alma de la viga es igual a  $0,157 \text{ m}^3$  y sabiendo que la densidad del acero es  $7.750 \text{ kg/m}^3$  hace un total de  $1.218,03 \text{ kg}$ . Sabiendo que el precio de la chapa es de  $1,2 \text{ €/kg}$  hace un total de  $1.416,63 \text{ €}$  el alma. Las dos alas hacen un total de  $401,51 \text{ kg}$  haciendo un coste total a  $481,81 \text{ €}$ . Por tanto, el coste total de la chapa para esta viga es igual a  $1.898,44 \text{ €}$ .

Las longitudes totales que se van a cortar y soldar quedan reflejadas en la Tabla 36.

*Tabla 36 - Longitudes de corte y soldadura viga armada hueco hexagonal*

#### **LONGITUDES TOTALES**

<i>Proceso de corte</i>	50,56 m
<i>Proceso de soldadura</i>	101,13 m

La máquina de corte por plasma es capaz de trabajar a una velocidad de corte igual a  $3,5 \text{ m/minuto}$  por lo que tiempo que se emplea en este primer paso de la viga por zona de fabricación es igual a  $14,45 \text{ minutos}$ .

Una vez cortada se procede a su soldado. La máquina es capaz de soldar hasta una velocidad de  $1,5 \text{ m/minuto}$ . Finalmente, el tiempo que se emplea en soldar es igual a  $67,42 \text{ minutos}$ , pero a mayores se le suma aproximadamente otro minuto que corresponde con el volteo de la viga para el soldado del otro lado. Por tanto, el tiempo total en esta fase es de  $68,42 \text{ minutos}$ .

Con estos dos datos se puede obtener el número de vigas que salen por cada cabezal (hay un total de cuatro líneas, cada una con un cabezal).

El tiempo total que cada viga requiere es de  $82,87 \text{ minutos}$  por cabezal. Por tanto, teniendo en cuenta una hora de producción, es decir, sesenta minutos, se tiene que salen  $0,724 \text{ vigas}$ .

Se determina que cada tipología usará dos cabezales (celular y hexagonal).

Luego, se tiene una totalidad de  $1,45 \text{ piezas}$  a la hora.

Según el convenio del metal (35) anualmente se trabaja una totalidad de  $222 \text{ días}$ .

Si la producción anual fuese a un  $100 \%$  de productividad y eficiencia con el dato proporcionado de los días de trabajo anuales se alcanzaría una producción de  $5.143 \text{ vigas}$  anuales. Pero considerando el OEE del  $80 \%$  la producción definitivamente sería de  $4.114 \text{ vigas}$ .

Se tiene calculado el valor de la viga de acero generada a partir de chapas para vigas curvas a  $1.898,44 \text{ €}$ . Sabiendo la producción anual se puede estimar que el coste de material prima anual ascenderá a  $7.810.182,16 \text{ €}$ .

La mano de obra directa se conserva al igual que la indirecta. La primera son  $390.720 \text{ €}$  y la parte indirecta son  $97.680 \text{ €}$ .

El coste por mantenimiento, amortizaciones y energéticos se conservan. Éstos son  $1.475 \text{ €}$ ,  $5.900 \text{ €}$  y  $5.562,35 \text{ €}$ , respectivamente.

Recogemos en la Tabla 37 la totalidad de los costes,

Tabla 37 - Costes imputados viga armada hexagonal

*COSTES (€)*

<i>MATERIA PRIMA</i>	7.810.182,16
<i>MANO DE OBRA DIRECTA</i>	390.720
<i>MANO DE OBRA INDIRECTA</i>	97.680
<i>AMORTIZACIÓN MAQUINARIA</i>	5.900
<i>MANTENIMIENTO</i>	1.475
<i>ENERGÍA</i>	5.562,35
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>8.311.519,51</b>

Para determinar finalmente el coste unitario de la viga es dividirlo por la producción anual que se estimó previamente.

$$\text{Coste viga celular} = \frac{8.311.519,51}{4.114} = 2.020,30 \text{ €}$$

El coste de cada viga siguiendo el proceso inicial de viga alveolar asciende a 2.020,30 €.



## ANEXO III – CARGA MÁXIMA ADMISIBLE

Uno de los cometidos que tienen las vigas aligeradas que salen del taller es la de actuación como salvar un vano. De esta forma un aspecto con una gran importancia es la de conocer cuál es la máxima capacidad que estas van a poder soportar.

Para ello se hace uso de las expresiones analíticas (44) para la situación de viga biapoyada (ver Figura 74) de las que a partir del límite elástico del acero estructural (acero S275) se obtiene el valor máximo del momento flector (centro del vano). Con éste se obtiene el valor de carga por metro lineal máxima que es capaz de soportar la viga. Por último, se calcula la flecha máxima que se alcanza.

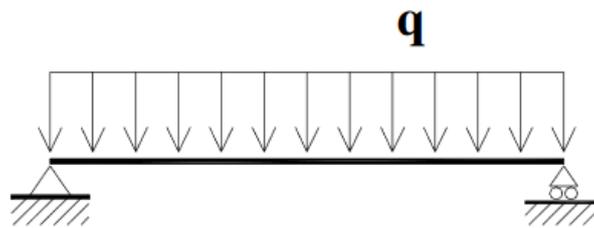


Figura 74 - Viga biapoyada

Las expresiones para calcular el momento flector, límite elástico y flecha son las siguientes,

$$[1] \quad M_{max} = \frac{q_{max} \cdot L^2}{8}$$

$$[2] \quad \sigma = \frac{M_{max}}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

$$[3] \quad \delta_{max} = \frac{5 \cdot q_{max} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Hay que hacer notar que el valor de la máxima carga se encuentra incluido el valor del peso propio de la viga. Luego, es un valor de sobrecarga (que será la máxima posible para aplicar) más el peso propio de la viga. Este peso propio es igual a 642,43 N/m aproximadamente. Por tanto, se obtiene la ecuación [4] que dice,

$$[4] \quad q_{max} = q_{sobrecarga} + q_{PP} = q_{sobrecarga \text{ MAX}} + 642,43$$

### III.I- Viga IPE400

Los datos de partida para la sección IPE400 son los especificado por el prontuario (31) de secciones y los 12 m de longitud de la viga.

El límite elástico del acero S275 es igual a 275 MPa. Y el módulo de Young para el acero es igual a  $2,1 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>.

Ya definidos todos los parámetros se entra en la ecuación [2] obteniendo el valor del momento flector,

$$M_{max} = 317.625 \text{ Nm}$$

En la ecuación [1] introduciendo el valor obtenido del momento se halla la carga máxima admisible,

$$q_{max} = 17.645,83 \frac{N}{m}$$

El valor de la flecha máxima a través de la ecuación [3],

$$\delta_{max} = 9,808 \cdot 10^{-2}m = 98,08 \text{ mm}$$

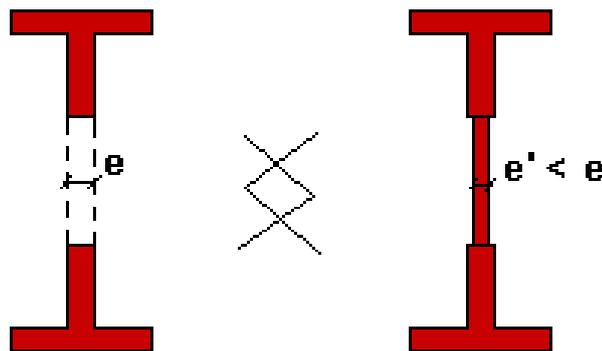
Por último, a partir de la ecuación [4] se obtiene el valor máximo que es posible aplicar para la sobre carga,

$$q_{sobrecarga \text{ MAX}} = 17.003,40 \frac{N}{m}$$

### **III.II- Viga alveolo circular**

Ahora la sección de la viga al poseer alveolos se debe actuar de una forma algo diferente. Se toma la hipótesis de sección equivalente como la que plantea la empresa Arktec S.A. (44) en su software comercial para el cálculo estructural.

Se considera que la viga no posee ningún alveolo. Esta suposición hace que la banda ocupada por estos alveolos adopte un espesor de alma inferior, ver Figura 75, que la parte de sección sólida del perfil. El nuevo momento de inercia será superior que la sección del IPE400.



*Figura 75 - Sección equivalente viga con alveolos*

La consideración que se adopta (45) es que la banda que contribuye en zona de alveolos sea de espesor igual a la mitad del alma de la sección llena.

$$e' = \frac{e}{2} = 4,3 \text{ mm}$$

El momento de inercia no se encuentra tabulado por lo que se procede a su obtención analítica según el teorema de Steiner.

$$I_{nueva} = 11,661 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 = 11,661 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Además, la viga es de una longitud de 11,655 metros.

Ya definidos todos los parámetros se entra en la ecuación [2] obteniendo el valor del momento flector,

$$M_{max} = 1.077.726,43 \text{ Nm}$$

En la ecuación [1] introduciendo el valor obtenido del momento se halla la carga máxima admisible,

$$q_{max} = 63.498,04 \frac{N}{m}$$

El valor de la flecha máxima a través de la ecuación [3],

$$\delta_{max} = 6,23 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 62,3 \text{ mm}$$

Por último, a partir de la ecuación [4] se obtiene el valor máximo que es posible aplicar para la sobre carga,

$$q_{sobrecarga \text{ MAX}} = 56.010,52 \frac{N}{m}$$

### **III.III- Viga alveolo hexagonal**

Se procede de la misma manera que el apartado 9.2.

Se mantiene la consideración del nuevo espesor y, por tanto, su valor.

$$e' = \frac{e}{2} = 4,3 \text{ mm}$$

El momento de inercia no se encuentra tabulado por lo que se procede a su obtención analítica según el teorema de Steiner.

$$I_{nueva} = 11,339 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 = 11,339 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Además, la viga es de una longitud de 11,655 metros.

Ya definidos todos los parámetros se entra en la ecuación [2] obteniendo el valor del momento flector,

$$M_{max} = 1.039.408,33 \text{ Nm}$$

En la ecuación [1] introduciendo el valor obtenido del momento se halla la carga máxima admisible,

$$q_{max} = 61.795,98 \frac{N}{m}$$

El valor de la flecha máxima a través de la ecuación [3],

$$\delta_{max} = 6,118 \cdot 10^{-2}m = 61,18 \text{ mm}$$

Por último, a partir de la ecuación [4] se obtiene el valor máximo que es posible aplicar para la sobre carga,

$$q_{sobrecarga \text{ MAX}} = 54.343,79 \frac{N}{m}$$

### **III.IV- Resultados teóricos**

Los resultados teóricos quedan recogidos la Tabla 38.

*Tabla 38 - Resultados teóricos*

	<i>IPE400</i>	<i>Alveolo Circular</i>	<i>Alveolo Hexagonal</i>
<i>Carga máx. (<math>q_{max}</math>)</i>	17.645,83 N/m	56.010,52 N/m	61.795,98 N/m
<i>Momento máx. (<math>M_{max}</math>)</i>	317.625 Nm	1.077.726,43 Nm	1.039.408,33 Nm
<i>Flecha máx. (<math>\delta_{max}</math>)</i>	98,08 mm	62,30 mm	61,18 mm

Se puede extraer la conclusión una vez con todos los resultados agrupados que el incremento de la inercia supone que se alcancen valores de cargas máximas del 58,9 % y del 61,3 % para las vigas con hueco circular y hexagonal respecto a la viga de perfil IPE400.

Debido a esto también se puede concluir en la reducción de la flecha en un 36,5 % y 37,6 % respectivamente.

## ANEXO IV - MECANISMOS DE FALLO ESTRUCTURAL

Todo elemento estructural debe ser comprobado para unas determinadas solicitaciones específicas de cargas, ambientales, etc. para saber si habrá problema de fallo o no. Es por ello que estas comprobaciones son seguidas por medio de la *Instrucción de Acero Estructural* (46) y de los *Eurocódigos* (47). Esto será seguido por la fabricación tradicional de vigas de alma llena y aligeradas con soldadura de alma. En una gran mayoría de situaciones el entendimiento y la aplicación de todas las expresiones matemáticas son difíciles de aplicar debido a la dificultad en cuanto a entendimiento de la instrucción. Para la fabricación actual propuesta estos cálculos y desarrollos matemáticos no pueden ser seguidos, sino que se hace uso del cálculo por elementos finitos (MEF) con el que todo elemento es discretizado en un número finito pero muy elevado de elementos que serán sometidos a los análisis estáticos y de pandeo. De esta forma se puede someter a estudio cualquier elemento estructural de los que se proponen sin ningún problema.

Tanto en vigas alveolares como en las de alveolo con forma circular pueden ocurrir numerosos mecanismos de fallo (48–50) entre los que los más preocupantes podrían catalogarse los referidos a los relacionados con la inestabilidad..

A continuación, se contemplan los de mayor frecuencia junto a los más críticos.

### 1. Fallo a cortante o cizallamiento

La resistencia al fenómeno de cortadura provocado por el cortante de una viga de tipo alveolar está relacionada con las perturbaciones en el flujo de tensiones tangenciales en la zona debilitada, que es aquella zona en la que se encuentre la abertura. La consecuencia de estas perturbaciones es una flexión adicional en el plano sometida tanto a las secciones transversales naves críticas de la viga como a los postes del alma de la viga situados entre las aberturas.

También la resistencia de cizallamiento se ve restringida con las aberturas de la viga. El cizallamiento, ver Figura 76, resulta de la variación del momento flector a lo largo de la totalidad de la viga.



Figura 76 - Fallo por cizallamiento

## 2. Pandeo latero-torsional

Fenómeno producido en la zona cercana a la zona intermedia del vano por la deflexión y rotación de la sección transversal mientras que al mismo tiempo las zonas próximas se ven bajo la distorsión acoplada a la inestabilidad de los postes del alma (ver Figura 77). En el caso de secciones compuesta la distorsión se ve asociada a los desplazamientos laterales de la zona que se encuentra sometida a compresión de la sección transversal de la viga.

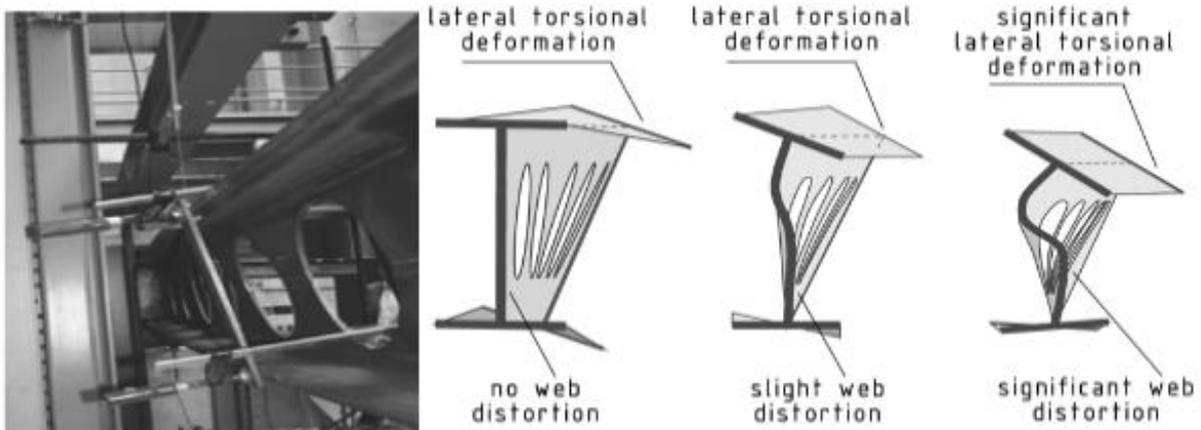


Figura 77 - Pandeo latero-torsional

## 3. Mecanismo de Vierendeel

Cuando se empiezan a generar de forma continua bisagras plásticas, ver Figura 78, en los cuatro extremos de la viga bordeando la abertura se dice que se está en el caso de fallo por el mecanismo de Vierendeel siendo su aspecto visual como el de la Figura 79. Un esfuerzo cortante actuante sobre la viga en la zona del alveolo genera una serie de momentos que esta zona sin material debe soportar sobre sus alrededores. Aparece el momento flector que es el habitual en la sección y, luego, el momento de flexión secundario o momento Vierendeel que aparece como consecuencia de estos esfuerzos en los cuatro puntos de la sección.

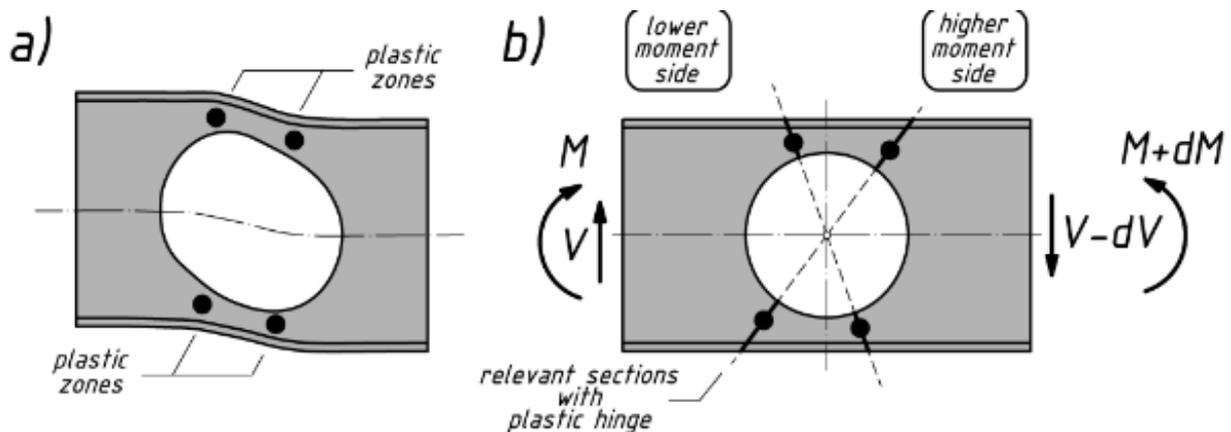


Fig. 4. Failure mode of a cellular beam when it is subjected to the M-V interaction: a) the four-hinged failure mechanism, b) location of the relevant plastic hinges

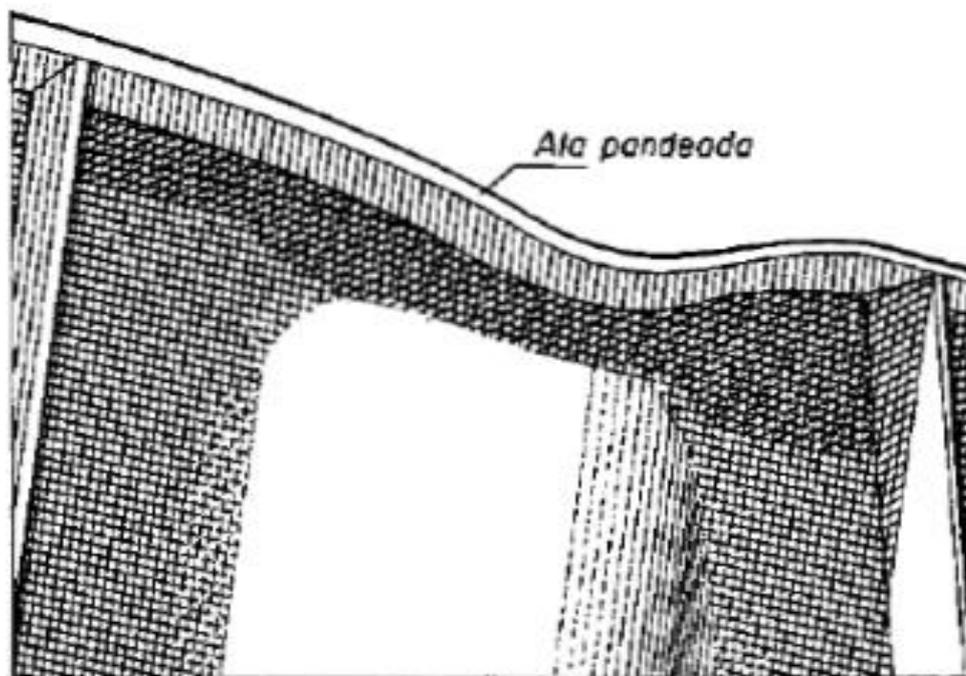
Figura 78 - Fallo por Vierendeel (esquema)



*Figura 79 - Fallo por Vierendeel*

#### 4. Pandeo local o abolladura del ala

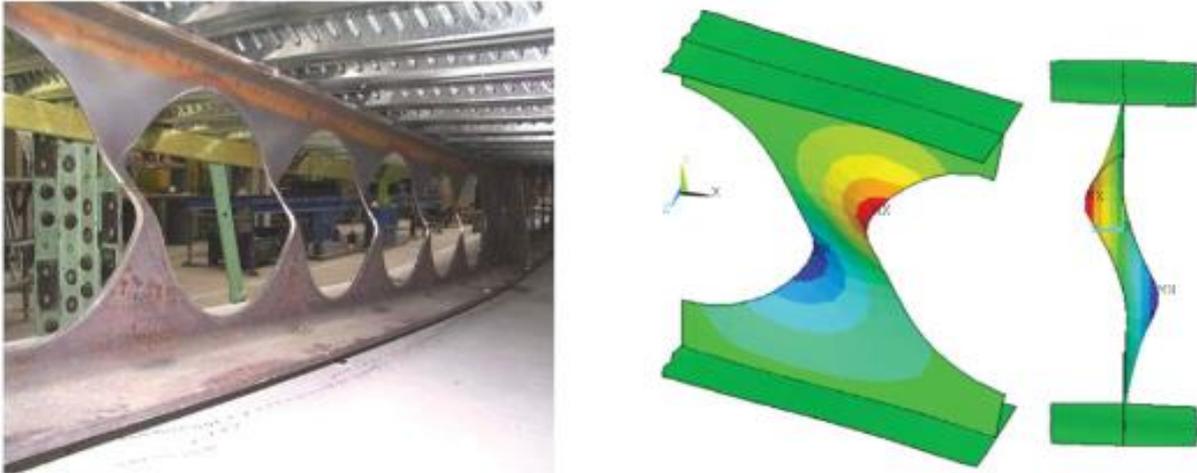
Este método de fallo localizado sobre el ala de la sección ocurre por ser secciones con una esbeltez muy elevada además de estar sometida, esa zona del ala, a esfuerzos de compresión. Y esto es debido al fallo del soporte que proporciona el alma. El ala no es capaz de aguantar acabando abollando como se observa en la Figura 80.



*Figura 80 - Fallo por pandeo local o abolladura del ala*

## 5. Pandeo del alma de la viga

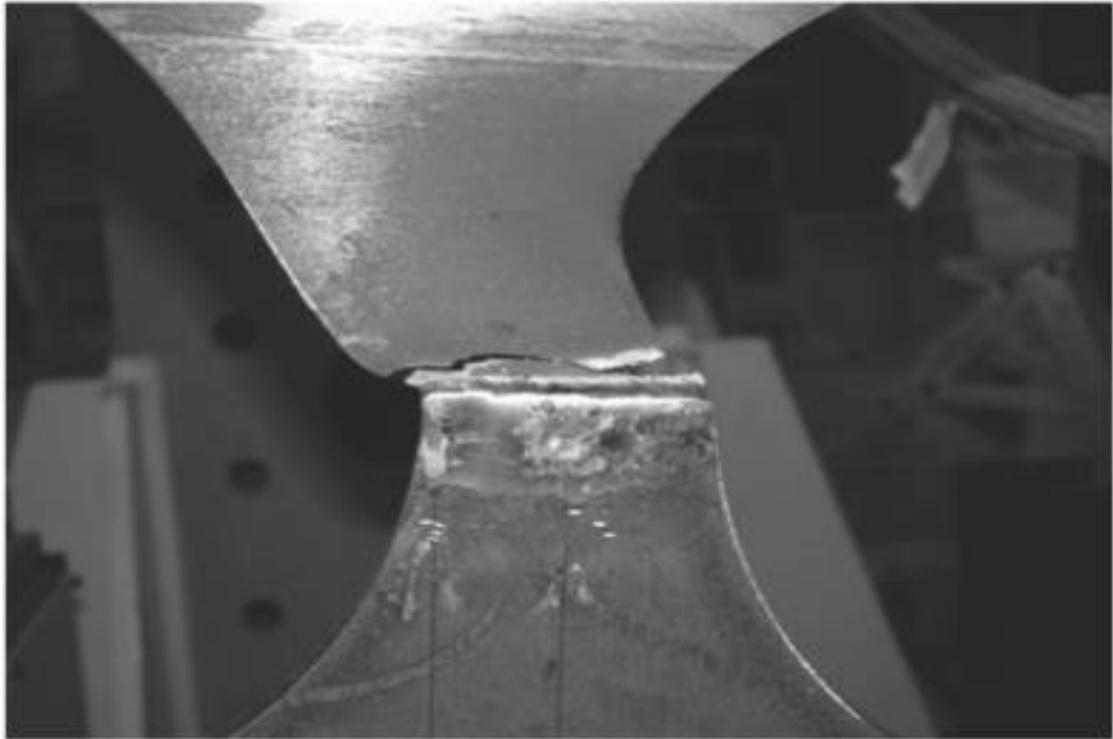
Otra de las posibilidades que hay en la destrucción de una viga es que aparezca sobre uno de los postes de ésta cualquier fenómeno de inestabilidad (ver Figura 81). Como es sabido el alveolo es el responsable de interrumpir el flujo de tensiones en el alma por lo que se genera una acumulación local tensional en las proximidades del hueco dando lugar a la aparición de la inestabilidad elástico-plástica del poste o postes del alma.



*Figura 81 - Pandeo alma de la viga alveolar*

## 6. Ruptura del cordón de soldadura

La problemática reside en que si se dispone de una distancia entre lo que es la abertura del alma y el espaciado entre éstas suficientemente pequeño genera una ruptura del cordón de soldadura, ver Figura 82, ocasionando así que se destruya toda la viga.



*Figura 82 - Fallo por ruptura cordón de soldadura*



## ANEXO V - GENERACIÓN VIGA ALIGERADA DE GEOMETRÍA ESPECIAL (CURVA) DE HUECO CIRCULAR

Se procede a justificar todo el proceso de análisis matemático que conlleva la obtención de la viga de directriz circular con una flecha de 1 metro en el centro del vano.

La presente viga de la que se parte es de la viga aligerada armada de alveolo circular. Luego la longitud de partida de la viga será de 11,655 metros. Además, la viga estará formada por 20 alveolos circulares de igual diámetro que la viga aligerada recta.

El estudio matemático se basa en las propiedades geométricas para el cálculo del segmento circular (51) siendo su esquema de partida el mostrado en la Figura 83.

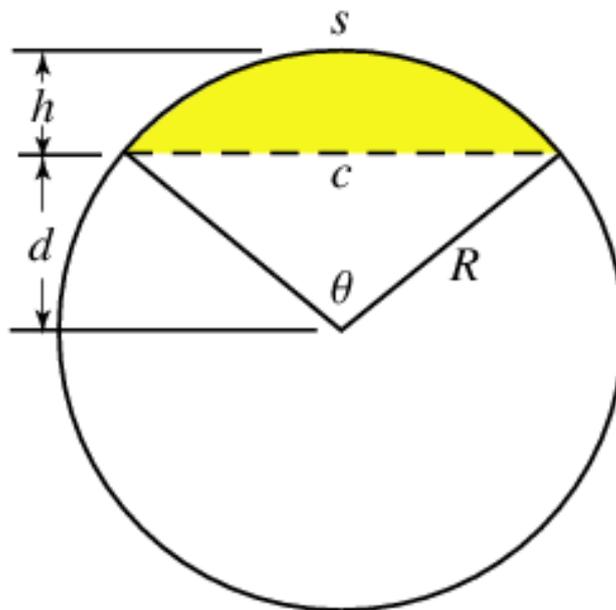


Figura 83 - Parámetros geométricos para el segmento circular

Como bien se parte de la viga aligerada armada de alveolo circular y que se quiere generar una flecha de un metro en el centro del vano se tienen dos de todas las variables de la Figura 83. Éstos son los que se muestran a continuación,

$$h = 1 \text{ m}$$

$$c = L = 11,655 \text{ m}$$

Las expresiones geométricas que definen el resto de las variables son las siguientes,

$$[5] \quad R = h + d$$

$$[6] \quad L = R \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \theta)}$$

$$[7] \quad \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{d}{R}$$

$$[8] \quad S = R \cdot \theta$$

Otra relación de interés es,

$$[9] \quad \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}}$$

La ecuación [5] se introduce en [6],

$$[10] \quad 13,655 = (1 + d) \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \theta)}$$

De la expresión obtenida [10] se despeja la 'd' dejando que ésta sea función del ángulo ( $\theta$ ).

$$[11] \quad d = \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Se vuelve a introducir la ecuación [1] junto, ahora, la relación de coseno [9] en la expresión [9] de forma que se tenga como incógnita el coseno. Es interesante mencionar que de la relación de cosenos se emplea su valor positivo ya que el negativo al resolver la expresión carece de solución.

$$\cos \theta = 0,777$$

$$\theta = 0,679 \text{ rad} = 39,904^\circ$$

El valor del coseno se introduce en [1] obteniendo,

$$d = 16,519 \text{ m}$$

Con el valor de 'd' se entra en [5] hallando de esta forma el valor del radio de la circunferencia. Ésta será la curvatura de la viga que se busca.

$$R = 17,519 \text{ m}$$

En último lugar, y para concluir este apartado se busca obtener el espaciado de los huecos de viga, así como el ángulo que espacia a éstas.

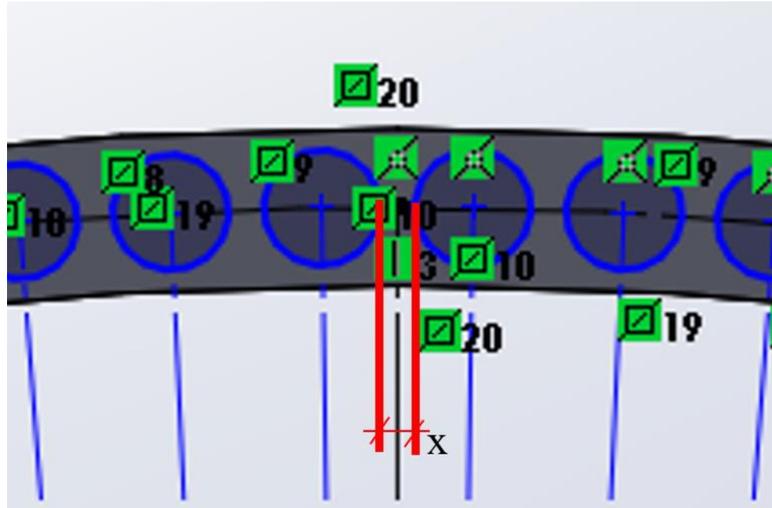


Figura 84 - Anchura sólida entre huecos

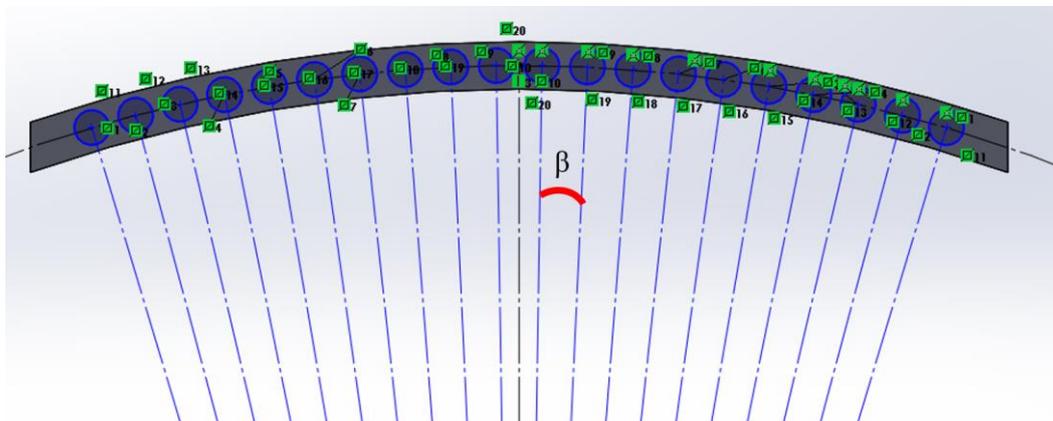


Figura 85 - Ángulo entre huecos

Inicialmente se comentó que la viga iba a portar 20 huecos, pero el cálculo para la anchura sólida entre alveolos fue realizado con 22 que son los iniciales de la propia viga plana. Por problema de espaciado se retiraron los dos extremos.

A partir de [8] obtenemos,

$$S = R \cdot \theta = 17.519 \cdot 0,679 = 12.097,44 \text{ mm}$$

$$12.097,437 = 22 \cdot 420 + 23 \cdot X$$

$$X = 124,24 \text{ mm}$$

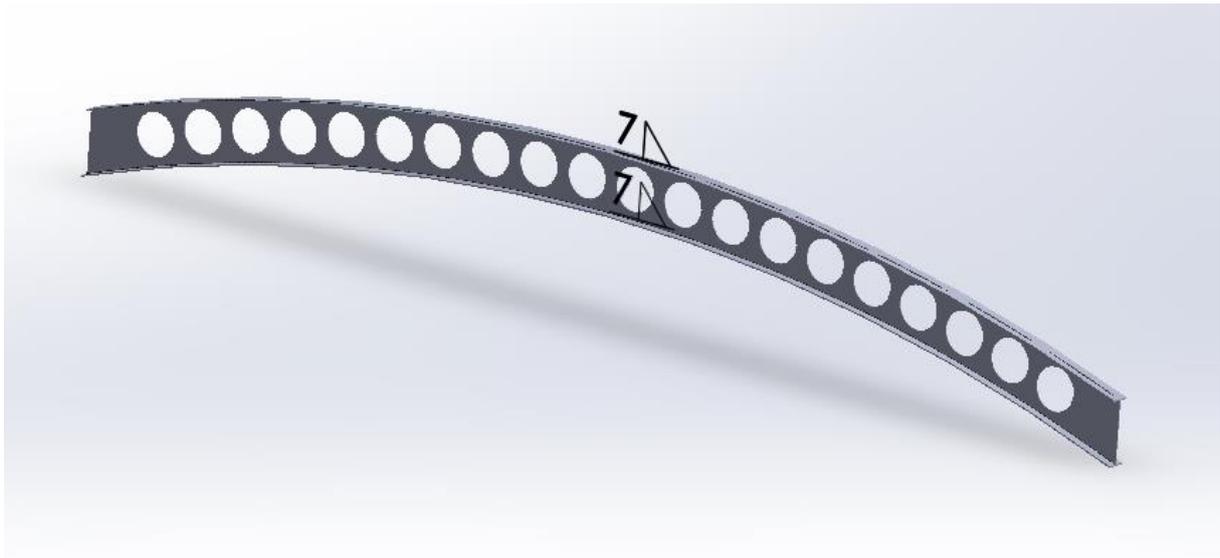
A partir de esta separación, ver Figura 84, y aplicando de nuevo la ecuación [8] se saca el ángulo de separación de los huecos como se aprecia en la Figura 85.

$$\left(\frac{124,236}{2}\right) + \left(\frac{420}{2}\right) = 17.816,55 \cdot \frac{\beta}{2}$$

Luego,

$$\beta = 1,75^\circ$$

La viga generada se presenta en la Figura 86.



*Figura 86 - Viga aligerada curva*