

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E. T. S DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE MATERIALES



DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE
UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUENTE
GRÚA DE ALMA DOBLE

TRABAJO DE FIN DE MASTER

FRANCISCO J. FRAILE GRIBORIO
Ingeniero Civil

DIRECTORA DEL TRABAJO:
Mihaela Iordachescu
Dr. Ing. Industrial

MADRID, JUNIO DE 2010

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradecer a Dios por darme salud y fortaleza para afrontar gran parte de los retos que me trazo y que la vida me pone a prueba.

Agradecer a mi familia por el soporte incondicional que me dan. A Teté por estar ahí, por quererme, amarme e incluso cuidarme cuando era necesario.

Gracias a mi asesora de Trabajo de Fin de Grado, la Dra. Ing. Mihaela Iordachescu, por tomar gran parte de su tiempo para que pudiera salir este trabajo a tiempo.

Gracias a mis compañeros de clases, a su lado hicieron que el tiempo en la Universidad fuese mucho más placentero.

Gracias a las Autoridades que hicieron que este Máster Universitario se realice, la calidad académica y de instalaciones es envidiable.



INDICE

<i>AGRADECIMIENTO</i>	ii
<i>INDICE GENERAL</i>	iii
<i>RESUMEN</i>	vi
<i>LISTADO DE FIGURAS</i>	vii
<i>LISTADO DE TABLAS</i>	ix
CAP. I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESEÑA HISTÓRICA	2
1.2. ALCANCE DEL TRABAJO	3
CAP. II. MARCO TEORICO	5
2.1. ESTRUCTURAS METÁLICAS	6
2.1.1. Vigas en Celosía	6
2.1.2. Vigas de alma llena	12
2.1.3. Vigas de alma doble	14
2.1.4. Perfiles Alveolados o Vigas Boyd	15
2.2. SOLDADURA	17
2.2.1. Geometría de la soldadura	17
2.2.2. Soldadura Manual por Arco (SMAW)	19
2.2.3. Soldadura MIG – MAG	21
CAP. III. DISEÑO Y CÁLCULO DE GEOMETRÍA DE LA VIGA	23
3.1. MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO DE VIGA CON ALMA DOBLE	24
3.1.1. Cálculo de la altura de viga a partir de sus condiciones de resistencia y rigidez	24
3.1.2. Calculo de la altura de viga de alma doble de la condición de peso mínimo	25



3.1.3. Comprobación del espesor de las almas	27
3.1.4. Estabilidad de las almas	29
3.1.5. Cálculo de las sección del ala	29
3.1.6. Estabilidad de las alas	30
3.1.7. Comprobación de la tensión máxima considerando las tensiones remanente del proceso de soldeo	30
3.1.8. Cálculo de los cordones soldados	32
3.1.9. Algoritmo de cálculo de Vigas de Alma Doble	34
3.2. APLICACIÓN NUMÉRICA DE MODELO EN ESTUDIO	34
3.2.1. Información de Puente Grúa	34
3.2.1.1. Mayoración de Cargas según Norma Española	36
3.2.2. Vigas de Alma doble supuestas	37
3.2.3. Cálculo del diseño mediante programa de cálculo SAP2000..	38
3.3. CHEQUEO DE LA VIGA DEL MODELO	40
3.3.1. Chequeo de altura de la viga según rigidez y resistencia	40
3.3.2. Chequeo de altura de la viga según condición de peso mínimo	41
3.3.3. Comprobación de espesor de almas	41
3.3.4. Estabilidad de las almas	41
3.3.5. Comprobación de la sección del ala	41
3.3.6. Estabilidad de las alas	41
3.3.7. Comprobación de tensión máxima considerando las tensiones remanentes del proceso de soldeo	42
3.3.8. Cálculo de cordones de soldadura	42
CAP. IV. DISEÑO Y CÁLCULO DE TECNOLOGÍA DE SOLDEO	43
4.1. DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA DE LA VIGA EN ALMA DOBLE (EN VARIANTE SOLDADA)	44
4.1.1. Materiales de base y de aporte	45
4.1.2. Área del metal de aporte	46
4.1.3. Cálculo de parámetros tecnológicos de la soldadura MAG...	47
4.1.3.1. Selección del tipo de transferencia	47



4.1.3.2. Parámetros tecnológicos del Proceso de Soldeo MAG en función del tipo de transferencia	47
4.2. TECNOLOGÍA DE SOLDEO MANUAL A TOPE EN ALMAS Y ALAS	51
4.2.1. Área de metal de aporte	52
4.2.2. Cálculo de los parámetros tecnológicos de la soldadura manual a tope	53
4.3. TEMPERATURA DE PRE-CALENTAMIENTO EN LAS UNIONES SOLDADAS DE LA VIGA	56
4.3.1. Método recomendado por el Instituto Internacional de Soldadura (IIM)	56
4.3.2. Método Seférian	59
CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61

ANEJO A (Planos finales).

PLANO # 1. DISPOSICION FINAL DE LA VIGA

PLANO # 2. DETALLE CHAPA A. PLANTA Y DETALLES

PLANO # 3. DETALLE CHAPA B. PLANTA Y DETALLES

PLANO # 4. DETALLE CHAPA C. PLANTA Y DETALLES

PLANO # 5. DETALLE CHAPA D. PLANTA Y DETALLES



RESUMEN

El trabajo se basa en el diseño y la comprobación de las uniones soldadas en una viga con alma doble que servirá como Puente Grúa.

Partiendo de un ejemplo particular de una viga con alma doble (definido por la longitud, la carga máxima y las características químicas y mecánicas de las chapas metálicas) se ha realizado el pre-dimensionado de la estructura utilizando un programa de cálculo (SAP2000). Los resultados se han comprobado mediante un modelo teórico de cálculo para vigas con alma doble. El cálculo está basado en la geometría específica de la unión soldada en ángulo entre las almas y las alas.

Las características químicas-mecánicas del metal base de las almas y las alas, y la geometría del cordón han permitido elegir un tipo de electrodo (metal de aporte) adecuado y el cálculo de los parámetros tecnológicos del proceso de soldeo.

Para el diseño de las soldaduras se presenta las variantes constructivas utilizadas en vigas, los procesos de soldeo y técnicas correlacionadas. Se introducen los parámetros del proceso de soldeo por arco eléctrico que se va a utilizar (la velocidad v_s [cm/min], la intensidad de Corriente I [A], el voltaje U [V]) y la geometría de la soldadura).



LISTADO DE FIGURAS

1.1. Grúas Puente en Galpón	1
2.1 a) Viga en celosía. b) Viga de Alma llena	6
2.2. Tipos comunes de vigas en celosía de canto constante	7
2.3. Tipos comunes de vigas en celosía de canto variable	7
2.4. Esquema de la Viga Vierendel	8
2.5. Esquema de la Viga Pratt	8
2.6. Esquema de la Viga Pratt hiperestática	9
2.7. Esquema de la Celosía en Cruz de San Andrés	9
2.8. Diferentes secciones transversales de celosía	10
2.9. Esquema de viga de Alma llena Asimétrica	12
2.10. Vigas más comunes en la edificación	14
2.11. Vigas con perfiles laminados como alas	14
2.12. Vigas con esfuerzos horizontales sobre el cordón comprimido	14
2.13. Esquema de Viga con Alma Doble (Double-Web Beam)	15
2.14. Viga de alma llena antes de ser oxicortada	15
2.15a. Formación de Perfil Alveolo a partir de una viga de alma llena	15
2.15b. Formación de Perfil Alveolo con adición de chapa para aumento de canto ..	16
2.16. Tipos comunes de juntas de soldadura. (1) La junta de extremo cuadrado. (2) Junta de preparación solo-V. (3) Junta de regazo o traslape. (4) Junta-T	17
2.17. La sección cruzada de una junta de extremo soldado, con el gris más oscuro representando la zona de la soldadura o la fusión, el gris medio la zona afectada por el calor ZAT, y el gris más claro el material base	18
2.18. Esquema de <i>Shield Metal Arc Welding</i> (SMAW)	20



2.19. Esquema de Soldadura de MIG (<i>Metal Inert Gas</i>) y MAG (<i>Metal Active Gas</i>) .	22
3.1. Viga simplemente apoyada con carga concentrada en el centro de su apertura	24
3.2. Sección transversal de viga en alma doble	26
3.3. Fuerza de corte en las almas de la viga en alma doble	28
3.4. La superposición de tensiones remanente de soldeo con tensiones de flexión..	31
3.5. Efecto de corte en los cordones soldadas	32
3.6. Algoritmo de cálculo de vigas en alma doble	34
3.7. Diagrama de actuación de cargas del Puente Grúa	35
3.8. Diagrama de Dimensiones de Vigas Supuestas	37
3.9. Resultantes de momento, cortante y deflexión del programa SAP2000	39
3.10. Aspecto de la viga de alma doble 600x400 introducida	39
4.1. Esquema de la preparación de bordes para el soldeo en T por un lado ($1/2 V$): 1–alma; 2–ala; S1-espesor de las almas; S2- espesor de alas	44
4.2. Esquema de pasadas de los hilos de soldadura (Típica)	49
4.3. Dibujo para la preparación de bordes para el soldeo a tope de las almas y alas.	52
4.4. Transmisión del calor por conductividad térmica en las uniones soldadas a tope ($n_r = 2$) y en T ($n_r = 3$)	57



LISTADO DE TABLAS

3.1. Información de la grúa	35
3.2. Cargas verticales sobre las ruedas	35
3.3. Cargas horizontales sobre las ruedas	35
3.4 Factores de la norma que aplican al modelo	36
3.5. Valores corregidos según Norma Española	36
3.6. Dimensiones de Vigas Supuestas	37
3.7. Viga resultante del cálculo arrojado por SAP2000	39
3.8. Viga de Diseño comprobada	42
4.1. Chapas a utilizar en la construcción de la viga de alma doble	44
4.2. Composición química del metal base (%)	45
4.3. Características mecánica del metal base	45
4.4. Composición química de metal de aporte (%)	46
4.5. Características mecánica de metal de aporte	46
4.6. Parámetros tecnológicos de las soldaduras de la viga en alma doble, por el proceso MAG y la geometría de bordes del Fig. 4.1	50
4.7. Composición química de metal de aporte (%)	51
4.8. Características mecánica de metal de aporte	51
4.9 Geometría de bordes e para soldadura a tope de las almas y alas de la viga en alma doble	52
4.10. Diámetro del electrodo revestido por soldadura a tope en función del espesor de chapas	53
4.11. Parámetros tecnológicos de las soldaduras manuales a tope para las almas y alas (geometría de bordes del Fig. 4.3)	55



4.12. Letra de soldabilidad en función del carbono equivalente y el tipo de revestido del electrodo	57
4.13. Temperatura mínima de pre-calentamiento en °C recomendada por IIW	58



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN



1.1. RESEÑA HISTÓRICA

Los puentes - grúa son aparatos destinados al transporte de materiales y cargas en desplazamientos verticales y horizontales en el interior y exterior de industrias y almacenes.

Constan de una o dos vigas móviles sobre carriles, apoyadas en columnas, consolas, a lo largo de dos paredes opuestas de un edificio rectangular.

El bastidor del puente grúa consta de una o dos vigas transversales en dirección a la luz de la nave (vigas principales) y de uno o dos pares de vigas laterales (testeros), longitudinales en dirección a la nave, también llamadas “vigas carrileras”, y que sirven de sujeción a las primeras y en donde van las ruedas (Ver Figura 1.1).



Fig. 1.1. Grúas Puente en Galpón

Componentes de un puente - grúa

Desde un punto de vista práctico se consideran tres partes:

- a) El puente. Se desplaza a lo largo de la nave.
- b) El carro. Se desplaza sobre el puente y recorre el ancho de la nave.



- c) El gancho. Va sujeto al carro mediante el cable principal, realizando los movimientos de subida y bajada de las cargas.

Movimientos de un puente - grúa

Los tres movimientos que realiza un puente grúa son:

1. Traslación del puente. En dirección longitudinal a la nave. Se realiza mediante un grupo moto-reductor único, que arrastra los rodillos motores por medio de semiárboles de transmisión.
2. Orientación del carro. Traslado de carro a lo largo del puente.
3. Elevación - descenso. La carga es subida o bajada por efecto del motor que sujeta el gancho con la ayuda de un cable principal.

Las fuerzas actuantes en este tipo de estructuras se pueden catalogar como características, ya que las cargas horizontales, transversales y longitudinales, pueden llegar a ser entre 10 y 20% la capacidad total de carga vertical del conjunto. Por esta razón, y para evitar que dicho puente se dimensione por torsión, se trata suplantando las vigas de alma llena por otro tipo de estructuras, tales como vigas en celosía, perfiles aligerados o alveolados, vigas de alma doble o de cajón rectangular, dos vigas con el carro en el centro, etc.

1.2. ALCANCE DEL TRABAJO

En nuestro caso en particular se estudiará el comportamiento de las vigas de alma doble construidas a partir de planchas metálicas. Primeramente se adaptará un caso particular a las normas españolas. A partir de esto se realizará un cálculo preliminar con el programa de cálculo estructural SAP2000 para predimensionar la viga. Con estos



resultados se comprobará que dicha viga cumple con los requerimientos del modelo teórico.

Como la longitud máxima de planchas supuesta es de 6 metros y la longitud total de la viga será de 13.0 metros se deberán realizar uniones soldadas transversales, además de las que se realizarán longitudinalmente para la construcción de la viga.

Para la unión de las mismas se tiene previsto utilizar dos (2) tipos de tecnología de soldeo: Soldadura Manual por arco (SMAW) para las soldaduras transversales, ya que las uniones son menores a un (1) metro; y Soldadura Automática bajo protección gaseosa (MAG) para los cordones de soldadura longitudinales. Igualmente se realizarán el cálculo y diseño todas las soldaduras con las cuales se construirá la viga.



CAPITULO II

MARCO TEÓRICO



2.1. ESTRUCTURAS METÁLICAS

2.1.1. VIGAS EN CELOSÍA.

Cuando necesitamos salvar luces importantes (a partir de 10 - 15 m por ejemplo), o necesitamos tener vigas de cantos importantes, puede resultar más económico utilizar estructuras reticulares en celosía que vigas de alma llena.

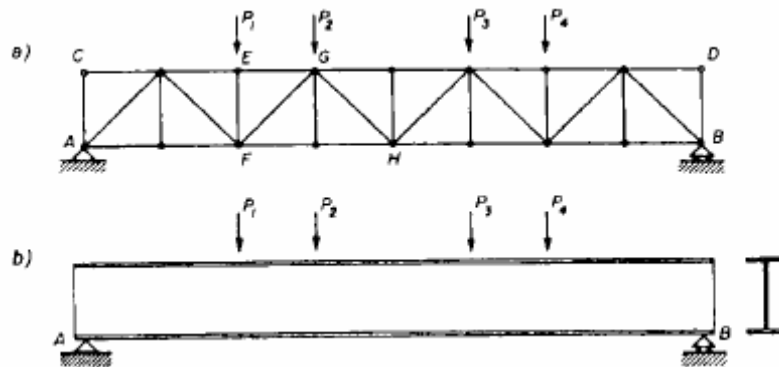


Fig. 2.1 a) Viga en celosía. b) Viga de Alma Llena

La condición fundamental que debe cumplir una estructura de celosía es la de ser geoméricamente **indeformable**. Como un punto en un plano queda determinado por el triángulo que le une a otros dos, el triángulo es el elemento fundamental de una celosía indeformable. De ahí el nombre de **estructuras trianguladas**. Suelen diseñarse con nudos articulados.

En las figuras 2.2 y 2.3 podemos ver algunos ejemplos de estructuras trianguladas, tanto de canto constante como variable.

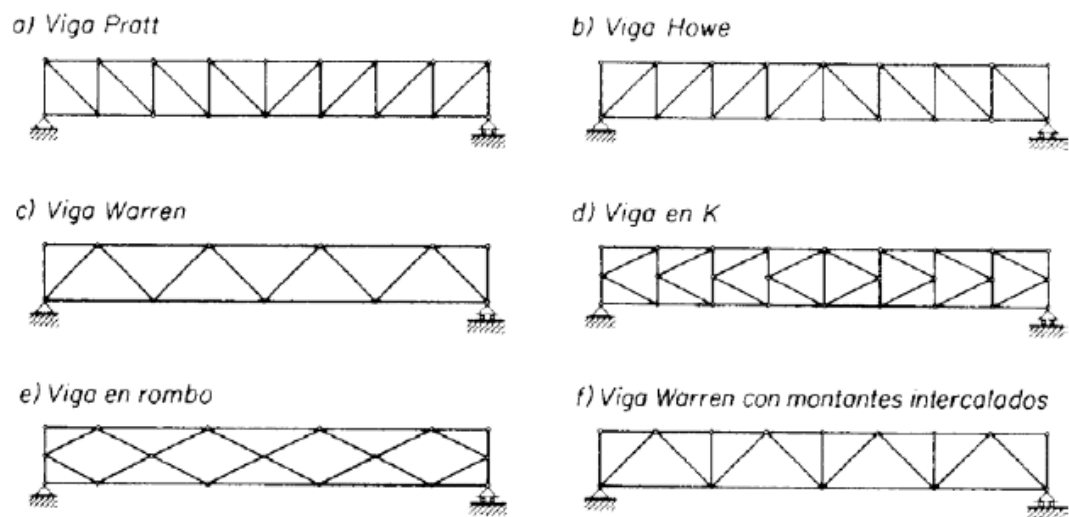


Fig. 2.2. Tipos comunes de vigas en celosía de canto constante

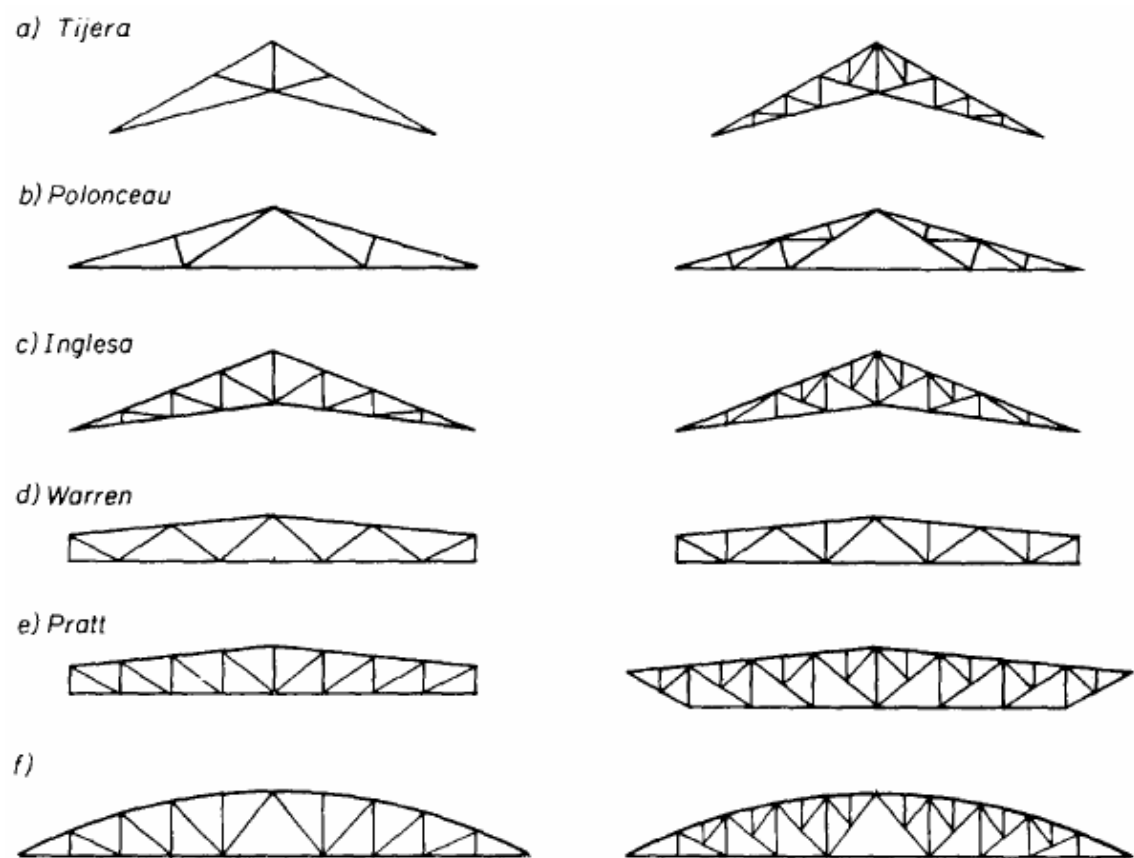


Fig. 2.3. Tipos comunes de vigas en celosía de canto variable



Cuando una estructura reticular es geoméricamente deformable, sólo puede utilizarse como elemento resistente si las barras que la componen están unidas mediante empotramientos rígidos.

Un ejemplo de este caso es lo podemos ver en la figura 2.4.

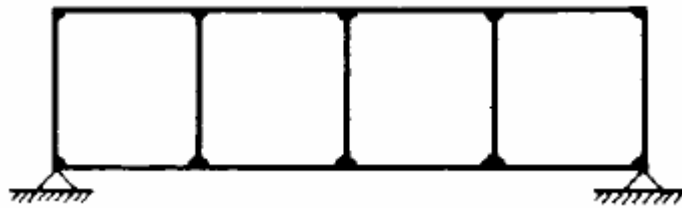


Fig. 2.4. Esquema de la Viga Vierendel

Las estructuras en celosía pueden dividirse desde el punto de vista de los apoyos en:

- Vigas exteriormente isostáticas.

Un ejemplo es la viga tipo Pratt de la figura siguiente

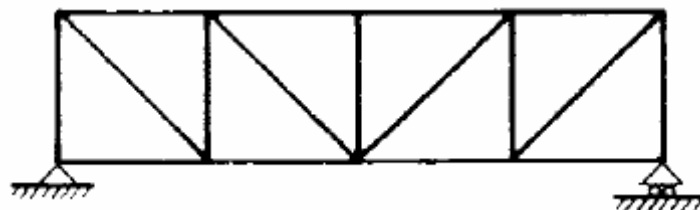


Fig. 2.5. Esquema de la Viga Pratt

- Vigas exteriormente hiperestáticas.



Si la viga anterior la soportamos en tres apoyos se convierte en exteriormente hiperestática.

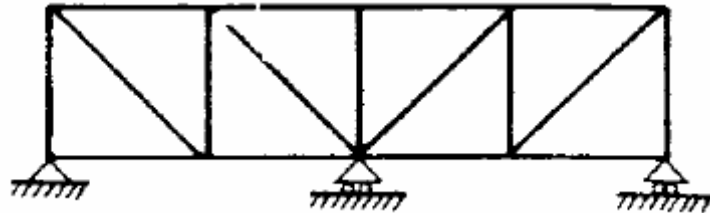


Fig. 2.6. Esquema de la Viga Pratt hiperestática

Este tipo de vigas tienen varios inconvenientes: mayor dificultad en el cálculo, mayor exigencia de precisión en la nivelación durante el montaje y la posibilidad de aparición de tensiones adicionales en caso de producirse asentamientos diferenciales en los apoyos.

Desde el punto de vista de la triangulación interior, las vigas en celosía pueden también dividirse en isostáticas e hiperestáticas.

Una viga es internamente isostática cuando tiene el número imprescindible de barras. En cuanto aparecen barras superfluas la viga se convierte en interiormente hiperestática. Un ejemplo de este último caso es la celosía en Cruz de San Andrés.

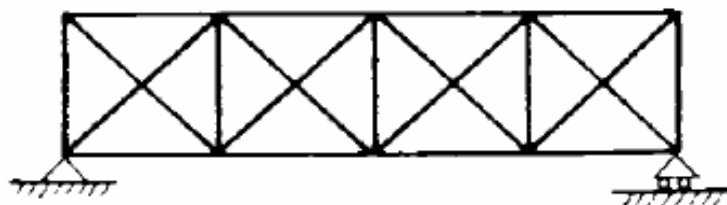


Fig. 2.7. Esquema de la Celosía en Cruz de San Andrés

En las vigas en celosía las barras se denominan, según su posición, del siguiente modo:



- Cordón superior: conjunto de elementos que forman la cabeza superior (se denomina "par" en las cerchas).
- Cordón inferior: conjunto de elementos que forman la cabeza inferior (se denomina "tirante" en las cerchas por trabajar usualmente a tracción).
- Montantes: barras verticales dispuestas en el alma de la viga.
- Diagonales: barras inclinadas dispuestas en el alma de la viga.

Se componen de dos cordones o cabezas y de un redondo convenientemente doblado para formar la celosía del alma.

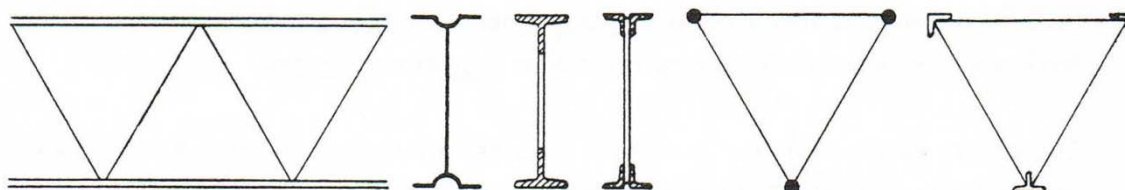


Fig. 2.8. Diferentes secciones transversales de celosía

La cabeza comprimida que normalmente es la superior, puede ser simple o doble. Si es simple puede estar formada de dos angulares, un perfil simple T o medio perfil en doble T (IPN, IPE...).

Si es doble, para conseguir mayor estabilidad lateral, suele estar formada por dos redondos o dos angulares, enlazados entre sí mediante una celosía auxiliar de redondo situada en el plano horizontal.

Para que estas viguetas sean económicas, es preciso construirlas en instalaciones muy mecanizadas o en países o situaciones en las que la relación precio del acero/precio de la mano de obra sea muy alta.



Para calcularlas se considera que las cabezas absorben el momento flector, desarrollándose unos esfuerzos axilares de valor

$$N^* = \pm \frac{M^*}{C} \quad (\text{ec. 2.1.})$$

Siendo C la distancia entre centros de gravedad de los cordones.

El ser las cabezas de sección constante, se emplea en el cálculo el momento flector máximo. La cabeza traccionada se dimensiona mediante la fórmula

$$A \geq \frac{N^*}{\sigma_u} \quad (\text{ec. 2.2.})$$

Para el dimensionamiento de la cabeza comprimida hay que tener en cuenta los fenómenos de la inestabilidad, que se estudiarán en próximos temas.

El cortante es absorbido por la celosía. Esta es casi siempre del tipo Warren a 60° (triángulos equiláteros). Entonces se tiene:

$$N^* = \pm \frac{Q^*}{\sin \alpha} = 1.16 * Q^* \quad (\text{ec. 2.3.})$$

Las diagonales se calculan como comprimidas, ya que se construyen con un redondo de sección constante; por tanto también hay que tener en cuenta los fenómenos de inestabilidad.

Los flectores y cortantes se determinarán de acuerdo a los métodos usuales de la resistencia de materiales; en la determinación de flechas se supone que la inercia es el 75% de la real de la pieza, para tomar en cuenta la mayor deformabilidad de la celosía de redondo en comparación con la de una pieza de alma llena; si el área de una cabeza es A, la inercia a emplear en el cálculo de flechas será pues:

$$I_{flect} = 0.375 * A c^2 \quad (\text{ec. 2.4.})$$



2.1.2. VIGAS DE ALMA LLENA

Una viga de alma llena (o perfil I o H) es un perfil laminado cuya sección transversal está formada por dos alas y un alma continua de unión entre ellas. Generalmente se usan como vigas de flexión, cuando los esfuerzos de torsión son pequeños.

Todas las vigas de alma llena presentan un buen comportamiento para la flexión provocada por un momento flector cuya dirección vectorial sea perpendicular al alma central. De hecho en esa situación dichos perfiles constituyen una solución muy económica. Por esa razón los perfiles doble T se usan para vigas en flexión recta.

Sin embargo, los perfiles doble T no tienen tan buen comportamiento para un momento flector perpendicular a las alas o en casos de flexión desviada. Sin embargo, el principal problema resistente que presentan es su escasa resistencia frente a torsión. En casos de torsión grande es recomendable usar perfiles macizos, perfiles cerrados huecos o incluso perfiles de doble alma. Otro hecho que debe tenerse en cuenta es que cuando una viga de alma llena se somete a torsión sufre alabeo seccional, por lo que a la hora de calcular las tensiones es importante tener en cuenta el módulo de alabeo y el bimomento que sufre el perfil.

Las características resistentes relacionan los esfuerzos internos sobre una sección con las tensiones existentes sobre ella. El cálculo de los perfiles adecuados requiere por tanto conocer las características geométricas y resistentes. Por ejemplo en una viga de alma llena asimétrica el centro de gravedad estará más cerca del ala grande, tomando como referencia la Fig. 2.9, el centro de gravedad y el centro de cortante están situados a una altura h_G :

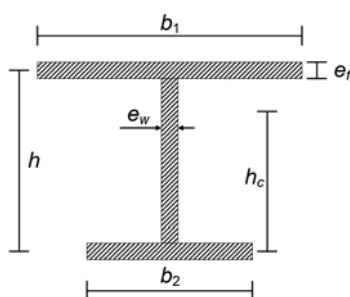


Fig. 2.9. Esquema de viga de Alma llena Asimétrica



$$h_G = \frac{1}{2} \frac{(h^2 - e_f^2)e_w + e_f^2 b_2 + (2h + e_f)b_1 e_f}{(b_1 + b_2)e_f + (h - e_f)e_w} \quad h_C = h \frac{b_1^3}{b_1^3 + b_2^3}$$

El área y las áreas de cortante vienen dadas por:

$$A = (b_1 + b_2)e_f + (h - e_f)e_w \quad A_{Q,y} = e_w h \quad A_{Q,z} = \frac{5}{6} e_f (b_1 + b_2)$$

Las características flexionales relevantes para el cálculo son los momentos de inercia (respecto al centro de gravedad y según ejes principales de inercia) y los momentos resistentes de flexión, que pueden calcularse sin dificultad a partir del teorema de Steiner.

Las características torsionales necesarias para el cálculo son el módulo de torsión (J), el momento de alabeo (I_ω) y el momento resistente de torsión:

$$J = \frac{(b_1 + b_2)e_f^3 + h e_w^3}{3} \quad I_\omega = \frac{e_f h^2}{12} \frac{b_1^3 b_2^3}{b_1^3 + b_2^3} \quad W_T = \frac{J}{\max(e_f, e_w)}$$

Algunas veces las vigas de alma llena prediseñadas (perfiles W, H o I) no son las más aptas para ciertas actividades a realizar. Por esta razón en muchos casos se recurre a la fabricación de la viga según las solicitaciones. Algunos de los ejemplos característicos serían:

- Vigas con alas reforzadas
- Vigas con alas superiores mayores que inferiores
- Vigas con rigidizadores en puntos específicos de la luz
- Vigas con doble alma, etc.

El tipo de sección transversal se elige de acuerdo a la luz, carga y arriostramientos para cada uso: edificación, nave industrial, viga carrilera para puente-grúa, puentes de FF.CC. o carreteros, etc. Las más comunes para edificación son:



Fig. 2.10. Vigas más comunes en la edificación.

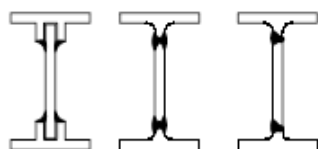


Fig. 2.11. Vigas con perfiles laminados como alas.



Fig. 2.12. Vigas con esfuerzos horizontales sobre el cordón comprimido

2.1.3. VIGAS DE ALMA DOBLE

Las vigas de alma doble son elemento estructurales conformados, al igual que los perfiles de alma llena de dos (2) alas que son las que ofrecen el momento de inercia de la pieza, pero a su vez tienen dos (2) almas que trabajan para aumentar la rigidez de corte de la estructura, así como aumentar la resistencia al pandeo lateral.

Este aumento en la rigidez de corte es de gran importancia ya que la deformación de corte en materiales compuestos no puede ser ignoradas, y está puede aparecer tanto en acero y estructuras de hormigón. La deformación cortante en estas estructuras de materiales compuestos puede contribuir tanto como 20% de la desviación total de la viga en tramos que son comunes para los tipos de puentes de estas vigas fueron diseñadas.

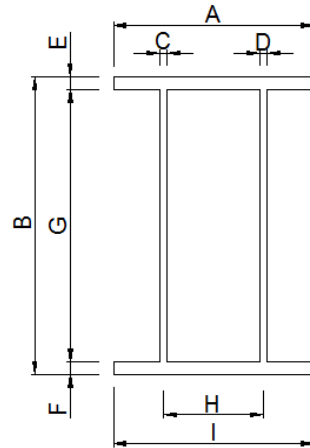


Fig.2.13. Esquema de Viga con Alma Doble (Double-Web Beam)

2.1.4. PERFILES ALVEOLADOS O VIGAS BOYD

Estas vigas nacen con un objetivo similar al de las celosías ligeras, es decir, aumentar la inercia de un perfil sin aumentar su área. Se construyen oxicortando el alma de un perfil laminado según un dibujo en greca, (Fig. 2.14.) Con o si interposición de unas chapas rectangulares para aumentar el canto. (Fig. 2.15a y 2.15b).

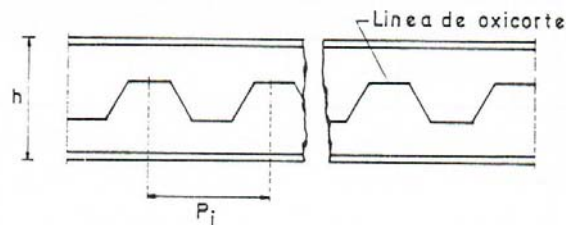


Fig. 2.14. Viga de alma llena antes de ser oxicortada

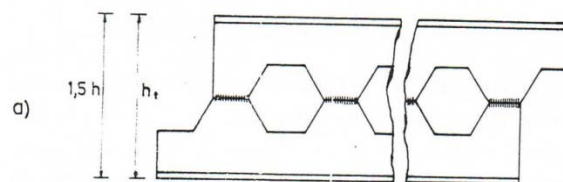


Fig. 2.15a. Formación de Perfil Alveolo a partir de una viga de alma llena



b)

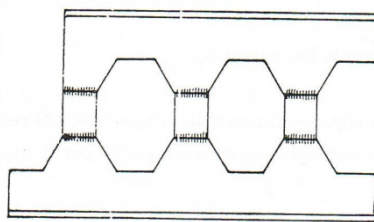


Fig. 2.15b. Formación de Perfil Alveolo con adición de chapa para aumento de canto.

De esta forma la inercia se aumenta muy considerablemente, sin aumentar en nada el material a emplear, pero si se incrementa notablemente el coste de la mano de obra, por lo que es recomendable un estudio económico antes de decidirse por el empleo de este tipo de vigas en vez de emplear un perfil laminado de mayor canto.

Es evidente que el alma de la nueva viga es más débil que la original, pero en general, los perfiles en doble T suelen tener almas sobreabundantes para las tensiones tangenciales que soportan y el debilitamiento del alma no suele afectarles, especialmente en el caso de almas sin chapas intercaladas y con cargas uniformemente repartidas y la simple comprobación

$$\sigma^* = \frac{M^*}{W'_x} \leq \sigma_u \quad (\text{ec. 2.5.})$$

En dónde W'_x es el momento resistente en la sección de máximo aligeramiento respecto al eje X-X, suele ser suficiente para verificar la seguridad.

Como es natural, el problema se complica a medida que se aligera más el alma y aumentan las cargas transversales o se aplican cargas concentradas y es necesaria una comprobación más precisa.

Las vigas de alma aligerada no deben utilizarse en luces pequeñas, ya que no resultarían económicas.

Para casos normales el perfil más económico es el IPE, de alma aligerada y sin chapas intercaladas; cuando los momentos flectores son muy importantes, resulta conveniente utilizar perfiles de alas fuertes y almas débiles como las HEA.



Si los esfuerzos cortantes son muy importantes puede ser necesario utilizar perfiles con espesores de alma grande, tales como perfiles IPN y HEB.

2.2. SOLDADURA

2.2.1. GEOMETRIA DE LA SOLDADURA

Las soldaduras pueden ser preparadas geoméricamente de muchas maneras diferentes. Los cinco tipos básicos de juntas de soldadura son la junta de extremo, la junta de regazo, la junta de esquina, la junta de borde, y la junta-T. Existen otras variaciones, como por ejemplo la preparación de juntas doble-V, caracterizadas por las dos piezas de material cada una que afilándose a un solo punto central en la mitad de su altura. La preparación de juntas solo-U y doble-U son también bastante comunes — en lugar de tener bordes rectos como la preparación de juntas solo-V y doble-V, ellas son curvadas, teniendo la forma de una U. Las juntas de regazo también son comúnmente más que dos piezas gruesas —dependiendo del proceso usado y del grosor del material, muchas piezas pueden ser soldadas juntas en una geometría de junta de regazo.

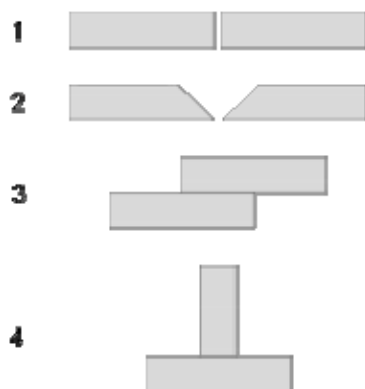


Fig. 2.16. Tipos comunes de juntas de soldadura

(1) La junta de extremo cuadrado

(2) Junta de preparación solo-V

(3) Junta de regazo o traslape

(4) Junta-T.

A menudo, ciertos procesos de soldadura usan exclusivamente o casi exclusivamente diseños de junta particulares. Por ejemplo, la soldadura de punto de resistencia, la soldadura de rayo láser, y la soldadura de rayo de electrones son realizadas más



frecuentemente con juntas de regazo. Sin embargo, algunos métodos de soldadura, como la soldadura por arco de metal blindado, son extremadamente versátiles y pueden soldar virtualmente cualquier tipo de junta. Adicionalmente, algunos procesos pueden ser usados para hacer soldaduras multipasos, en las que se permite enfriar una soldadura, y entonces otra soldadura es realizada encima de la primera. Esto permite, por ejemplo, la soldadura de secciones gruesas dispuestas en una preparación de junta solo-V.



Fig. 2.17. La sección cruzada de una junta de extremo soldado, con el gris más oscuro representando la zona de la soldadura o la fusión, el gris medio la zona afectada por el calor ZAT, y el gris más claro el material base.

Después de soldar, un número de distintas regiones pueden ser identificadas en el área de la soldadura. La soldadura en sí misma es llamada la zona de fusión —más específicamente, ésta es donde el metal de relleno fue puesto durante el proceso de la soldadura. Las propiedades de la zona de fusión dependen primariamente del metal de relleno usado, y su compatibilidad con los materiales base. Es rodeada por la zona afectada de calor, el área que tuvo su micro estructura y propiedades alteradas por la soldadura. Estas propiedades dependen del comportamiento del material base cuando está sujeto al calor. El metal en esta área es con frecuencia más débil que el material base y la zona de fusión, y es también donde son encontradas las tensiones residuales.

En España los procedimientos y especificaciones que rigen todo lo referente a soldadura sobre estructuras metálicas y todas sus técnicas son las normas UNE-14XXX.



2.2.2. SOLDADURA MANUAL POR ARCO (SMAW)

La característica más importante de la soldadura con electrodos revestidos, en inglés *Shield Metal Arc Welding* (SMAW) o *Manual Metal Arc Welding* (MMAW), es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base.

Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido.

Como son los propios electrodos los que aportan el flujo de metal fundido, será necesario reponerlos cuando se desgasten. Los electrodos están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento.

El alma o varilla es alambre (de diámetro original 5.5 mm) que se comercializa en rollos continuos. Tras obtener el material, el fabricante lo decapa mecánicamente (a fin de eliminar el óxido y aumentar la pureza) y posteriormente lo trefila para reducir su diámetro.

El revestimiento se produce mediante la combinación de una gran variedad de elementos (minerales varios, celulosa, mármol, aleaciones, etc.) convenientemente seleccionados y probados por los fabricantes, que mantienen el proceso, cantidades y dosificaciones en riguroso secreto.

Este tipo de soldaduras pueden ser efectuados bajo corriente tanto continua como alterna. En corriente continua el arco es más estable y fácil de encender y las salpicaduras son poco frecuentes; en cambio, el método es poco eficaz con soldaduras de piezas gruesas. La corriente alterna posibilita el uso de electrodos de mayor diámetro, con lo que el rendimiento a mayor escala también aumenta. En cualquier caso, las intensidades de corriente oscilan entre 10 y 500 amperios.



El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada del mercado. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un porta electrodo y electrodos. El soldador no tiene que estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección. El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción. Su campo de aplicaciones es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo.

Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido no se presta para su automatización o semiautomatización; su aplicación es esencialmente manual. La longitud de los electrodos es relativamente corta: de 230 a 700 mm. Por tanto, es un proceso principalmente para soldadura a pequeña escala. El soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiar el electrodo y debe limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar electrodo nuevo. Sin embargo, aun con todo este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo.

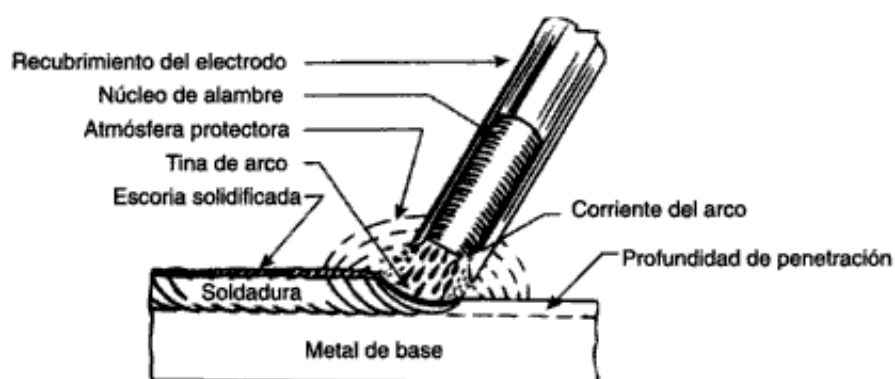


Fig. 2.18. Esquema de *Shield Metal Arc Welding* (SMAW)



2.2.3. SOLDADURA MIG – MAG

Llamadas así por su traducción al inglés, MIG (*Metal Inert Gas*) y MAG (*Metal Active Gas*), son soldaduras por electrodo consumible sumergido. Es este electrodo el alimento del cordón de soldadura. El arco eléctrico está protegido, como en el caso anterior, por un flujo continuo de gas que garantiza una unión limpia y en buenas condiciones.

En la soldadura MIG, como su nombre indica, el gas es inerte; no participa en modo alguno en la reacción de soldadura. Su función es proteger la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores. Se emplean usualmente los mismos gases que en el caso de electrodo no consumible, argón, menos frecuentemente helio, y mezcla de ambos.

En la soldadura MAG, en cambio, el gas utilizado participa de forma activa en la soldadura. Su zona de influencia puede ser oxidante o reductora, ya se utilicen gases como el dióxido de carbono o el argón mezclado con oxígeno. El problema de usar CO₂ en la soldadura es que la unión resultante, debido al oxígeno liberado, resulta muy porosa. Además, sólo se puede usar para soldar acero, por lo que su uso queda restringido a las ocasiones en las que es necesario soldar grandes cantidades de material y en las que la porosidad resultante no es un problema a tener en cuenta.

El uso de los métodos de soldadura MIG y MAG es cada vez más frecuente en el sector industrial. En la actualidad, es uno de los métodos más utilizados en Europa occidental, Estados Unidos y Japón en soldaduras de fábrica. Ello se debe, entre otras cosas, a su elevada productividad y a la facilidad de automatización, lo que le ha valido abrirse un hueco en la industria automovilística. La flexibilidad es la característica más sobresaliente del método MIG / MAG, ya que permite soldar aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aluminio y cobre, en espesores a partir de los 0,5 mm y en todas las posiciones. La protección por gas garantiza un cordón de soldadura continuo y uniforme, además de libre de impurezas y escorias. Además, la soldadura MIG / MAG es un método limpio y compatible con todas las medidas de protección para el medio ambiente.



En contra, su mayor problema es la necesidad de aporte tanto de gas como de electrodo, lo que multiplica las posibilidades de fallo del aparato, además del lógico encarecimiento del proceso. La soldadura MIG/MAG es intrínsecamente más productiva que la soldadura MMAW, donde se pierde productividad cada vez que se produce una parada para reponer el electrodo consumido. Las pérdidas materiales también se producen con la soldadura MMAW, cuando la parte última del electrodo es desechada. Por cada kilogramo de electrodo revestido comprado, alrededor del 65% forma parte del material depositado (el resto es desechado). La utilización de hilos sólidos e hilos tubulares ha aumentado esta eficiencia hasta el 80 e incluso hasta 95%. La soldadura MIG/MAG es un proceso versátil, pudiendo depositar el metal a una gran velocidad y en todas las posiciones. El procedimiento es muy utilizado en espesores delgados y medios, en fabricaciones de acero y estructuras de aleaciones de aluminio, especialmente donde se requiere un gran porcentaje de trabajo manual. La introducción de hilos tubulares está encontrando, cada vez más, su aplicación en los espesores fuertes que se dan en estructuras de acero pesadas.

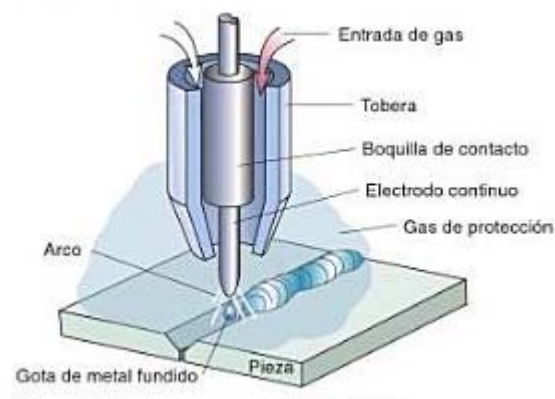


Fig. 2.19. Esquema de Soldadura de MIG (*Metal Inert Gas*) y MAG (*Metal Active Gas*).



CAPITULO III
DISEÑO Y CÁLCULO DE
GEOMETRIA DE LA VIGA



3.1. MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO DE VIGA CON ALMA DOBLE

3.1.1. CÁLCULO DE LA ALTURA DE VIGA A PARTIR DE SUS CONDICIONES DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ.

Estos tipos de vigas se limitan por la relación (f/l) de la flecha f y la longitud de viga, l , en función de las condiciones de trabajo. La altura de viga se calcula partiendo de la flecha admisible y de las condiciones de resistencia de la estructura soldada.

En el caso de una viga simplemente apoyada con una carga concentrada en el centro de su apertura (Fig. 2.1), la fórmula del cálculo de la flecha es:

$$f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (\text{ec. 3.1.})$$

donde: P es la carga puntual ubicada en el centro de la viga, l – la longitud de viga entre apoyos, E – modulo de elasticidad, I – el momento de inercia.

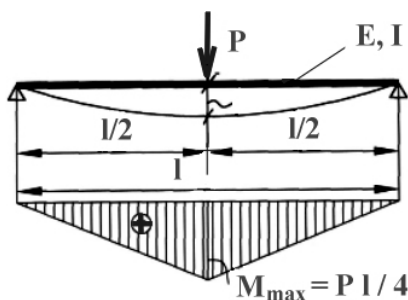


Fig. 3.1. Viga simplemente apoyada con carga concentrada en el centro de su apertura

Mostrando en la ecuación de la flecha, el momento de flexión resulta:

$$f = \frac{P \cdot l}{4} \cdot \frac{l^2}{12 \cdot E \cdot I} = M_{\max} \cdot \frac{l^2}{12 \cdot E \cdot I} \quad (\text{ec. 3.1'.})$$



Pero, el momento máximo admisible de flexión de la viga, M_{max} , es:

$$M_{max} = W \cdot \sigma_a = \frac{2 \cdot I}{h} \cdot \sigma_a \quad (\text{ec. 3.2.})$$

donde: W es el modulo de resistencia, σ_a – la tensión admisible o límite elástico de material de viga, h – la altura de viga.

Remplazando (3.2) en (3.1') resulta:

$$f = \frac{2 \cdot I}{h} \cdot \sigma_a \cdot \frac{l^2}{12 \cdot E \cdot I} = \frac{l^2 \cdot \sigma_a}{6 \cdot h \cdot E} \quad (\text{ec. 3.3.})$$

Así que en el diseño de la viga, la relación (h/l) , debe cumplir la condición:

$$\frac{h}{l} \geq \frac{\sigma_a}{6 \cdot E \cdot \left(\frac{f}{l}\right)_a} \quad (\text{ec. 3.3'.})$$

El valor admisible $(f/l)_a$ depende del tipo de construcción y su funcionamiento. De modo general

$$\left(\frac{f}{l}\right)_a \approx \frac{1}{1500} \dots \frac{1}{1200} \quad (\text{ec. 3.4.})$$

Con la ecuación (3.3') se hace el cálculo del (h/l) , que depende de $(f/l)_a$ y la tensión admisible σ_a .

3.1.2. CALCULO DE LA ALTURA DE VIGA DE ALMA DOBLE DE LA CONDICIÓN DE PESO MÍNIMO.

Puesto que la longitud de viga se impone usualmente, el peso mínimo de la viga se consigue cuando la sección transversal de la viga es mínima.

En la Fig. 3.2 se presenta la sección transversal de una viga de alma doble. El modulo de resistencia de la sección es:

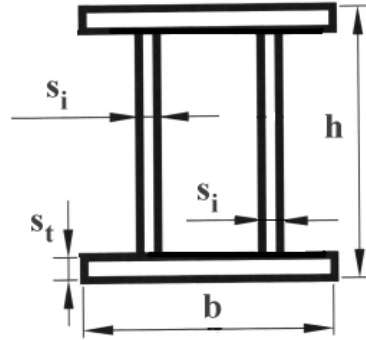


Fig. 3.2. Sección transversal de viga en alma doble

$$W = \frac{I}{\frac{h}{2}} = \frac{2 \frac{s_i h^3}{12} + 2 \left[\frac{b s_t^3}{12} + A_t \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right]}{\frac{h}{2}} \quad (\text{ec. 3.5.})$$

Donde, tal y como se muestra en la figura 3.2: s_i es el espesor de las almas, s_t – el espesor de alas, b – la anchura de alas, A_t – la sección de alas.

Omitiendo el valor de s_t en comparación con h y el momento de inercia del ala computado por su propio eje, $\left(\frac{b s_t^3}{12} \right)$, la ecuación (3.5) se convierte en:

$$W = 2 \left(\frac{s_i h^3}{12} + A_t \frac{h^2}{2} \right) \cdot \frac{2}{h} = \frac{s_i h^2}{3} + 2 * A_t \cdot h \quad (\text{ec. 3.6.})$$

Como la sección transversal de viga dependiendo del área del ala es:

$$A = 2A_t + 2s_i \cdot h$$

el área del ala es

$$A_t = \frac{A - 2s_i \cdot h}{2} \quad (\text{ec. 3.7.})$$

Reemplazando (3.7) en la ecuación (3.6) resulta:

$$W = \frac{s_i h^2}{3} + Ah - 2 \cdot s_i h^2 = Ah - 5 \frac{s_i h^2}{3} \quad (\text{ec. 3.8.})$$



De la ecuación (2.8) resulta el área de la sección transversal de la viga en alma doble:

$$A = \frac{W}{h} + \frac{5}{3} s_i h \quad (\text{ec. 3.9.})$$

Minimizando la ecuación de la sección transversal se deduce la altura mínima de viga:

$$\frac{dA}{dh} = 0 ; \quad -\frac{W}{h^2} + \frac{5}{3} s_i = 0 \quad (\text{ec. 3.10.})$$

Así que la altura de la viga es:

$$h = \sqrt{\frac{3W}{5s_i}} \quad (\text{ec. 3.11.})$$

Explicitando el modulo de resistencia de la ecuación (3.11) resulta la altura de la viga en alma doble de las condiciones de resistencia y peso mínimo:

$$h \geq \sqrt{\frac{3M_{\max}}{5s_i\sigma_a}}$$

Así que por una viga en doble alma de sección constante la altura mínima se puede computar con:

$$h \geq 0.775 \sqrt{\frac{M_{\max}}{s_i\sigma_a}} \quad (\text{ec. 3.12.})$$

3.1.3. COMPROBACIÓN DEL ESPESOR DE LAS ALMAS

El espesor de almas (s_i) de viga se adopta del inicio por recomendaciones y después se hace su comprobación:

- $s_i = 6 - 10$ mm por vigas ligeras
- $s_i = 12 - 18$ mm por vigas pesadas

La comprobación del espesor de viga se hace al corte y estabilidad. El cálculo del corte se efectúa en la sección con la fuerza de corte máxima. Se considera que el corte es



tomado en totalidad de las almas y no se considera las alas en el cálculo de tensión de corte (Fig. 3.3).

Considerando la ecuación de Jourasky:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot S}{s_i \cdot I}, \quad (\text{ec. 3.13.})$$

donde T es la fuerza del corte y S – el momento estático en la sección que se desliza. ($T=P$, la carga concentrada en la viga)

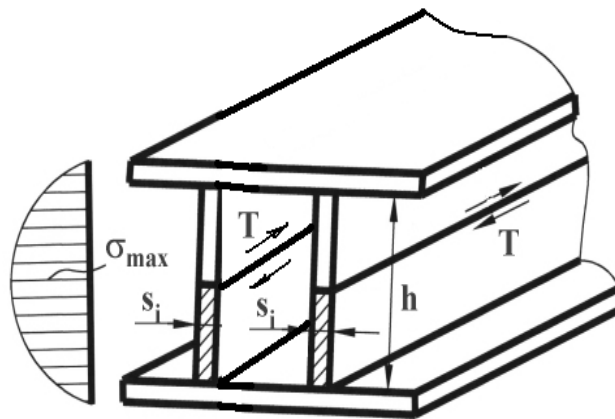


Fig. 3.3. Fuerza de corte en las almas de la viga en alma doble

El momento estático de la mitad de sección de almas es:

$$S = \left(\frac{h}{2} \cdot 2s_i \right) \cdot \frac{h}{4} = \frac{s_i \cdot h^2}{4} \quad (\text{ec. 3.14.})$$

Sustituyendo la ecuación (3.13) en (3.14) resulta:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot s_i \cdot h^2}{4 \cdot 2s_i \cdot 2 \frac{s_i \cdot h^3}{12}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{T}{s_i \cdot h} \quad (\text{ec. 3.15.})$$

De la ecuación (3.15) resulta el espesor del alma:

$$s_i = \frac{3}{4} \cdot \frac{T}{h \cdot \tau_{max}}$$



Pasando a valores admisibles:

$$s_i \geq \frac{3}{4} \cdot \frac{T}{h \cdot \tau_a} \quad (\text{ec. 3.16.})$$

Considerando la relación de las tensiones admisibles:

$$\tau_a = 0,6 \cdot \sigma_a \quad (\text{ec. 3.17.})$$

Sustituyendo (3.17) en (3.16) resulta:

$$s_i \geq \frac{T}{0,8 \cdot h \cdot \sigma_a} \quad (\text{ec. 3.18.})$$

3.1.4. ESTABILIDAD DE LAS ALMAS

El cálculo de estabilidad del alma no es necesario cuando:

$$\frac{h}{s_i} \leq 160 \quad (\text{ec. 3.19.})$$

Las vigas en alma doble cumplen la ecuación (3.19). En otros casos, los rigidizadores son necesarios para asegurar la estabilidad de las vigas.

3.1.5. CALCULO DE LA SECCIÓN DEL ALA

En el caso de la viga en alma doble, la sección del ala se calcula de la condición de resistencia a flexión y la condición de estabilidad.

El momento de inercia de la sección es:

$$I = 2 \frac{s_i h^3}{12} + 2 A_t \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^2 = \frac{s_i h^3}{6} + A_t \frac{h^2}{2}$$

o:

$$W \cdot \frac{h}{2} = \frac{s_i h^3}{6} + A_t \frac{h^2}{2}$$



Resulta que el modulo de resistencia de la sección del ala es:

$$W = \frac{s_i h^2}{3} + A_t \cdot h \quad (\text{ec. 3.20.})$$

De la ecuación (3.20) resulta la sección del ala de las condiciones de resistencia y flexión.

$$A_t = \frac{W}{h} - \frac{s_i h}{3 \cdot h} = \frac{M}{\sigma \cdot h} - \frac{s_i h}{3}$$

Hablando en valores admisibles, las dimensiones del ala son limitadas con la ecuación:

$$b \cdot s_t \geq \frac{M_{max}}{\sigma_a \cdot h} - \frac{s_i h}{3} \quad (\text{ec. 3.21.})$$

3.1.6. ESTABILIDAD DE LAS ALAS

Se considera que las alas no pierden la estabilidad cuando:

$$\frac{b}{s_t} \leq 30 \cdot \sqrt{\frac{2100}{\sigma_a}} \quad (\text{ec. 3.22.})$$

σ_a en N/cm^2 .

Las dimensiones b y s_t de viga resulta de las ecuaciones (3.21) y (3.22).

3.1.7. COMPROBACIÓN DE LA TENSIÓN MÁXIMA CONSIDERANDO LAS TENSIONES REMANENTE DEL PROCESO DE SOLDEO.

La elongación en la dirección transversal de las chapas soldadas se calcula con la ecuación:

$$\varepsilon_b = \alpha \cdot q_1 \cdot \frac{1}{\rho \cdot A \cdot c}$$



donde: α es el coeficiente de dilatación térmica, q_1 – energía linear de soldeo, ρ - la densidad; c – el calor específico, A – área de la sección transversal de la chapa soldada.

La ecuación del cálculo de tensión remanente:

$$\sigma_r = \varepsilon_b \cdot E = \alpha \cdot E \cdot \frac{q_1}{\rho \cdot A \cdot c} \quad (\text{ec. 3.23.})$$

De modo general, considerando por aceros $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2 \text{ gradC}^0$, $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ N/cm}^2$, $\rho = 7,8 \text{ kg/dm}^3$, $c = 440 \text{ J/kg} \cdot \text{gradC}^0$, la ecuación 3.23 se convierte en:

$$\sigma_r = 7,4 \cdot \frac{q_1}{A} \quad [\text{N/cm}^2] \quad (\text{ec. 3.24.})$$

con q_1 en $[\text{J/cm}]$ y A en $[\text{cm}^2]$.

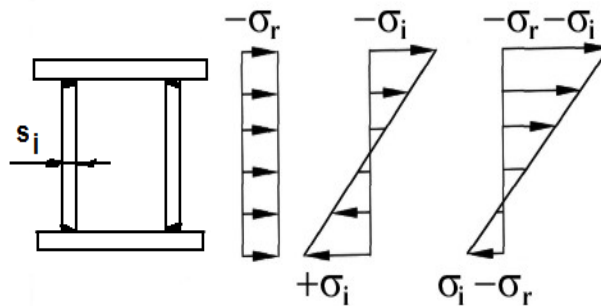


Fig. 3.4. La superposición de tensiones remanente de soldeo con tensiones de flexión

Se admite que las tensiones remanente son de compresión y que ellas se distribuían de modo constante en toda la altura de viga (Fig. 3.4). La tensión máxima, considerando la flexión y las tensiones remanente debe limitarse a:

$$\sigma_i + \sigma_r \leq \sigma_{cr}, \quad (\text{ec. 3.25.})$$

La ecuación de tensión crítica σ_{cr} es:

$$\sigma_{cr} = 2,64 \cdot 10^6 \cdot k \cdot \left(\frac{2s_i}{h} \right)^2, \quad [\text{N/cm}^2] \quad (\text{ec. 3.26.})$$

donde el coeficiente $k = 6,3 \dots 7,4$ (mas grande por chapas con espesor grande)



Considerando (3.24), (3.26) y (3.25) resulta:

$$\sigma_i + 7,4 \cdot \frac{q_1}{A} \leq 2,64 \cdot 10^6 \cdot k \cdot \left(\frac{2s_i}{h} \right)^2$$

o:

$$\frac{h}{s_i} \leq 3250 \cdot \sqrt{\frac{k}{\sigma_i + 7,4 \cdot \frac{q_1}{A}}} \quad (\text{ec. 3.27})$$

3.1.8. CÁLCULO DE LOS CORDONES SOLDADOS

Los cordones soldadas que unen las almas con las alas son sometidos al corte por la tendencia de deslizarse de las alas (Fig. 3.5). Las tensiones tangenciales se calculan con la ecuación de Jourasky:

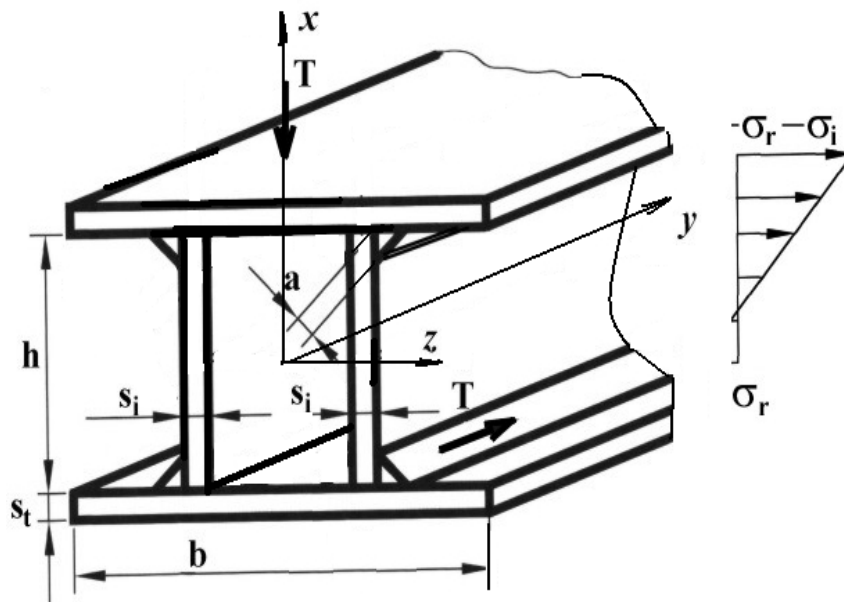


Fig. 3.5. Efecto de corte en los cordones soldadas



$$\tau_s = \frac{T \cdot S}{2a \cdot I} \quad (\text{ec. 3.28.})$$

donde T es la fuerza de corte, S - momento estático de la sección de ala frente al eje central de la sección de viga, $2a$ – el espesor de sección que desliza, a – el calibre de los cordones soldados ($a = 0,7 s_i$), I – el momento de inercia de sección de viga.

$$S = b \cdot s_t \cdot \frac{h}{2} \quad (\text{ec. 3.29.})$$

$$I = 2 \frac{s_i h^3}{12} + 2 s_t \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^2 \quad (\text{ec. 3.30.})$$

Reemplazando las ecuaciones (3.29) y (3.30) en (3.29) resulta:

$$\tau_s = \frac{T \cdot b \cdot s_t \cdot \frac{h}{2}}{2a \cdot \left(\frac{2s_i h^3}{12} + s_t \cdot b \cdot \frac{h^2}{2} \right)} = \frac{3 \cdot T \cdot b \cdot s_t}{2a \cdot (s_i h + 3 \cdot s_t \cdot b) \cdot h}$$

Así que la tensión equivalente en la soldadura es:

$$\sigma_e = \sqrt{1,8 \cdot \tau_s^2} = 1,34 \cdot \frac{3 \cdot T \cdot b \cdot s_t}{2a \cdot h \cdot (s_i h + 3 \cdot s_t \cdot b)} = \frac{2 \cdot T \cdot b \cdot s_t}{a \cdot h \cdot (s_i h + 6 \cdot s_t \cdot b)} \quad (\text{ec. 3.31})$$

Limitada por solicitaciones estáticas a:

$$\sigma_e \leq \sigma_{as} = k \cdot \varphi \cdot \sigma_a = 0,65 \cdot \sigma_a$$



3.1.9. ALGORITMO DE CÁLCULO DE VIGAS EN ALMA DOBLE

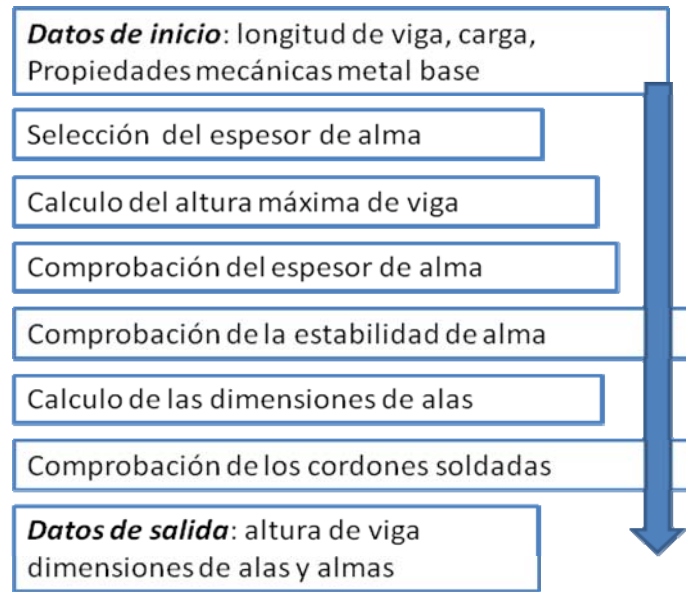


Fig. 3.6. Algoritmo de cálculo de vigas en alma doble

3.2. APLICACIÓN NUMÉRICA DE MODELO EN ESTUDIO

El modelo en estudio es un ejemplo práctico de una viga de alma doble que forma parte de un puente grúa que se encuentra dentro de un galpón protegido de la intemperie. El mismo se diseñará para que soporte un peso máximo de 5 toneladas, que servirá para izamiento y traslado de materiales. El puente grúa tendrá una longitud de 12.0m de eje a eje más 0.50m de cada lado de los apoyos para un total de 13.0m, mientras que la longitud máxima entre apoyos de la viga carrilera será de 6.0m.

3.2.1. INFORMACIÓN DE PUENTE GRÚA

Para dicho trabajo se propone el puente grúa a continuación descrito:

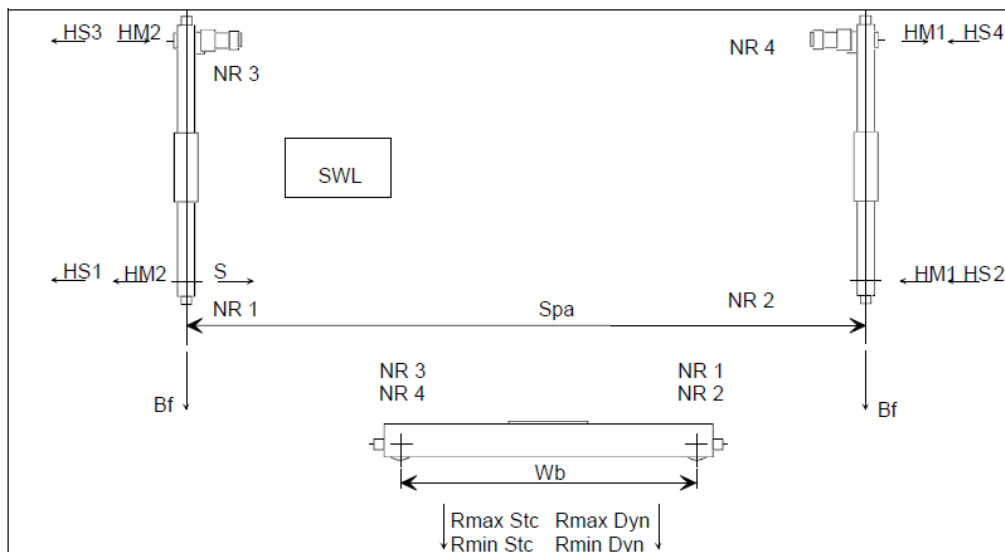


Fig. 3.7. Diagrama de actuación de cargas del Puente Grúa.

Tabla. 3.1. Información de la grúa

Crane type	CXTD EX 28t x 12m Hol:14m	Wheel base (Wb)	3400 mm
Span (Spa)	12 m	Crane rail in calculation	60x40
Load (SWL)	5 000 kg	Wheel groove	
Hoist type	EXCXT6061	Crane group	FEM A3
Hoist group	FEM M4 (1Am)	Crane speed	32/8 m/min
Hoisting speed	3/0,5 m/min		

Tabla. 3.2. Cargas verticales sobre las ruedas

Wheel	NR1	NR2	NR3	NR4
Rmax Stc	36.7KN	-	17.8 KN	-
Rmin Stc	-	7.0KN	-	4.9 KN
Rmax Dyn	40.2 KN	-	19.4 KN	-
Rmin Dyn	-	7.5KN	-	5.2 KN

Tabla. 3.3. Cargas horizontales sobre las ruedas

Inertia forces (from driving mechanisms)	HM1 = 0.4 Kn	HM2 = 1.9 KN		
Wheel loads along crane runway	1.1 kN			
Buffer force for dimensioning the crane runway end stop	Bf = 8.7 kN			
Forces coming from skewing				
Guiding (contact) force (S= HS2 +...+HS4)	S = 5.8 kN			
Friction forces due to oblique travel				
Wheel	NR1	NR2	NR3	NR4
HSNR=	-0.4KN	-0,1KN	5.2KN	1.1KN



3.2.1.1. MAYORACIÓN DE CARGAS SEGÚN NORMA ESPAÑOLA

Para la mayoración de las cargas del puente grúa se tomó como base la norma UNE-76-201-88 “ESTRUCTURAS METÁLICAS. CAMINOS DE RODADURA DE PUENTE GRÚA”. Están serán las cargas a ser transmitidas a la viga carrilera, pero como lo que se busca son las solicitaciones en el puente, las cargas serán las mismas en magnitud, con la diferencia de que las cargas longitudinales mostradas son las transversales del modelo y viceversa. Para nuestras condiciones se muestran los siguientes factores:

Tabla 3.4 Factores de la norma que aplican al modelo

Tabla	Denominación	Datos			
		Cond. de Uso	Cond. De Carga	Grupo	
1	Puente Grúa de Almacén	B - C	2 - 3	3 - 4 - 5 - 6	
2	Utilización regular en servicio intermitente	Cond. de Uso	Nº Convencional de Ciclos		
		U5	5.0E+05		
3	Aparato que levanta con bastante frecuencia la carga útil y corrientemente cargas medianas	Cond. de Carga	Parámetro del Espectro (Kq)		
		Q3 - Pesado	0.50		
4	-----	Cond de Uso	Cond. De Carga	#	
		U5	Q3 - Pesado	6.00	
5	Grupos 5 y 6	Viga Carrilera		Soportes	
		Max	Red	Max	Red
		1.25	1.10	1.10	1.00

Tabla 3.5. Valores corregidos según Norma Española

Acción Vertical		
Vdmax =	58.22 KN	(Acción dinámica máxima)
Vdmin =	16.83 KN	(Acción dinámica mínima)
Acción Horizontal Longitudinal (en la viga carrilera)		
Hlmax =	5.57 KN	(Por frenado del puente)
Hl1 =	4.03 KN	
Hl2 =	1.54 KN	
Acción Horizontal Transversal (en la viga carrilera)		
Hcmax =	4.46 KN	(Por frenado del carro)
Hc =	1.54 KN	
Hp =	1.40 KN	(Por frenado del puente)
Ho =	5.54 KN	(Por marcha oblicua)



3.2.2. VIGAS DE ALMA DOBLE SUPUESTAS.

El tipo de viga de alma doble no está tipificada en ningún manual conocido de fabricantes de estructura metálica, por lo que se debió de suponer las dimensiones de las mismas para la realización de los cálculos.

Se siguieron un par de condiciones para la suposición de las mismas: mantener una relación base/canto razonable e igualmente constante, y que la distancia entre las almas y el final de la base sea entre 4 y 7 veces el espesor del alma.

En la tabla 3.6 podemos ver las dimensiones de las vigas supuestas.

Tabla. 3.6. Dimensiones de Vigas Supuestas

PERFIL	DATOS								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
300x200	200	300	6	6	9	9	282	140	200
350x230	230	350	7	7	11	11	328	170	230
400x260	260	400	8	8	12	12	376	200	260
450x300	300	450	9	9	14	14	422	230	300
500x330	330	500	10	10	15	15	470	260	330
550x360	360	550	11	11	17	17	516	280	360
600x400	400	600	12	12	18	18	564	300	400
650x430	430	650	13	13	20	20	610	320	430
700x460	460	700	14	14	21	21	658	340	460
750x500	500	750	15	15	23	23	704	360	500
800x530	530	800	16	16	24	24	752	380	530
850x560	560	850	17	17	26	26	798	400	560
900x600	600	900	18	18	27	27	846	420	600

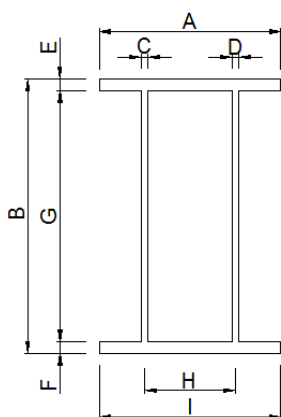


Fig. 3.8. Diagrama de Dimensiones de Vigas Supuestas



El material escogido para las vigas fue acero estructural, comúnmente utilizado en la construcción categorizado según normas europeas EN 10025, Marca St 37-2 (Designación Simbólica S 275-J2). Las propiedades mecánicas y térmicas del mismo son las siguientes:

- Módulo de Elasticidad (E) 210000 MPa
- Modulo de Poisson (ν) 0.30
- Límite Elástico (σ_e) 275 MPa
- Límite Plástico (σ_p) 340 – 470 MPa
- Coef. de Dilatación Térmica (α) 12×10^{-6}
- Temperatura de referencia (T_r) 20 °C
- Conductividad Térmica (K) 50 W/(°C x m)
- Peso específico (γ) 78.50 KN/m²

3.2.3. CÁLCULOS DEL DISEÑO MEDIANTE PROGRAMA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL SAP2000.

- Basándonos en un prontuario de vigas de alma doble supuestas descritas en la tabla 3.4, se realizó un cálculo estructural mediante el programa SAP2000, Versión 14.
- Las cargas actuantes en el problema son las mostradas en las tablas 3.5.
- Se colocó como restricción que la flecha máxima vertical no superase

$$\frac{f}{l} < \frac{1}{1200}$$

El resultado arrojado por dicho programa fue la viga que se encuentra sombreada en la tabla 3.7, el resto de las vigas que aparecen en la tabla es previendo que ésta no cumpla con el modelo teórico. Podemos igualmente ver los resultados en la Figura 3.9, y en la Figura 3.10 el modelo de la viga resultante.



Tabla. 3.7. Viga resultante del cálculo arrojado por SAP2000

PERFIL	DATOS											COMPROBACION DE RESULTADOS		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	cdg X	cdg Y	Área	Mxx	Myy
550x360	360	550	11	11	17	17	516	280	360	275	180	23592	1.12E+09	3.548E+08
600x400	400	600	12	12	18	18	564	300	400	300	200	27936	1.58E+09	4.967E+08
650x430	430	650	13	13	20	20	610	215	430	325	215	33060	2.20E+09	4.485E+08

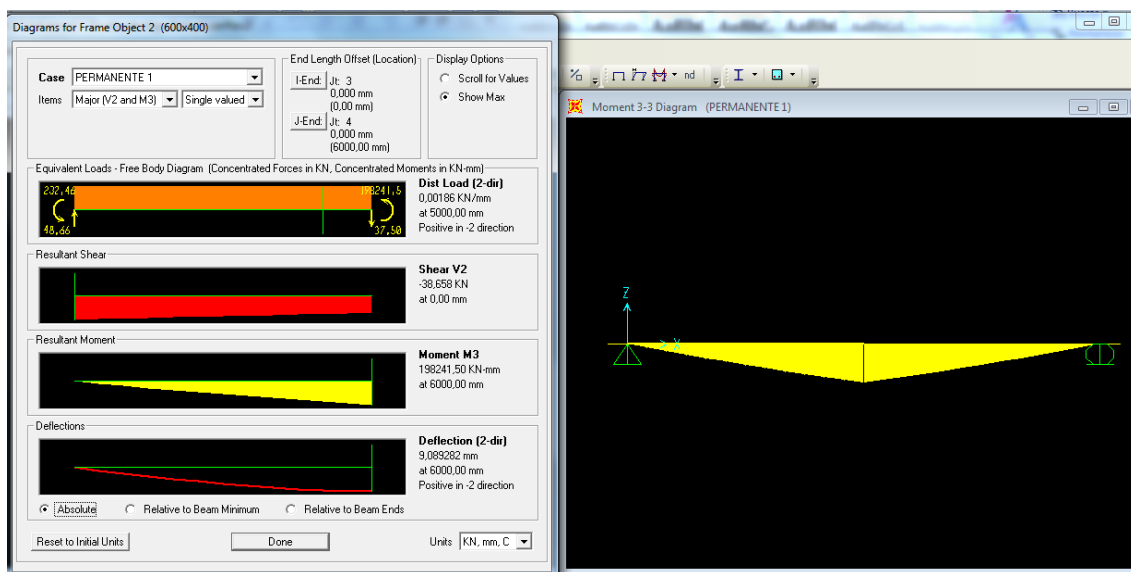


Fig. 3.9. Resultantes de momento, cortante y deflexión del programa SAP2000

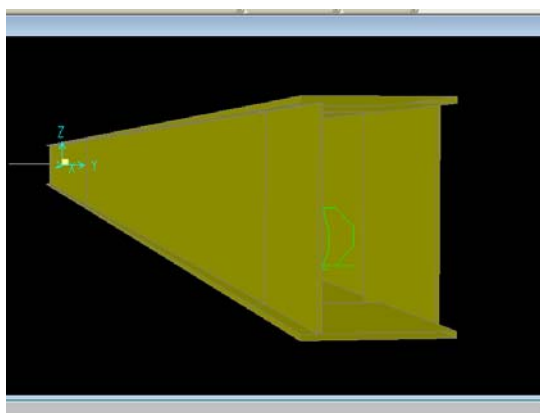


Fig. 3.10. Aspecto de la viga de alma doble 600x400 introducida.



3.3. CHEQUEO DE LA VIGA DEL MODELO

Para comprobación de los resultados se tomaron la viga resultante mediante SAP2000 y la viga inmediatamente inferior de las vigas supuestas para comprobar la optimización del procedimiento. Con estos valores se procedió al chequeo de cada una de las partes de la viga

3.3.1. CHEQUEO DE ALTURA DE LA VIGA SEGÚN RIGIDEZ Y RESISTENCIA.

Las acciones verticales a utilizar serán la suma de las mayoradas por la norma española, Vd máximo y Vd mínimo.

Valor de chequeo

$$\left(\frac{f}{l}\right)_a = \frac{1}{1500} \dots \approx \dots \frac{1}{1200}$$

$$f_a = 0.008m \dots \approx \dots 0.010m$$

VIGA 550x360

$$f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{(Vd \max + Vd \min) \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$f = \frac{(0.05822MN + 0.01683MN) \cdot (12.0m)^3}{48 \cdot (210000MPa) \cdot (1.12 \times 10^{-3})} = 0.0115m \geq 0.010m$$

(NO CUMPLE)

Descartamos para los siguientes cálculos esta viga.

VIGA 600x400

$$f = \frac{(0.07505MN) \cdot (12.0m)^3}{48 \cdot (210000MPa) \cdot (1.58 \times 10^{-3})} = 0.0082m \leq 0.010m$$

(OK)



3.3.2. CHEQUEO DE ALTURA DE LA VIGA SEGÚN CONDICIÓN DE PESO MÍNIMO.

$$M_{\max} = \frac{P \cdot l}{4} = \frac{0.07505MN \cdot 12m}{4} = 0.22515MN \cdot m$$

$$h \geq 0.775 \sqrt{\frac{M_{\max}}{s_i \cdot \sigma_a}} = 0.775 \sqrt{\frac{0.22515MN \cdot m}{0.012m \cdot 275MPa}} = 0.202m \leq 0.564m \quad (\text{OK})$$

3.3.3. COMPROBACION DE ESPESOR DE ALMAS

$$V_{\max} = \frac{P}{2} = \frac{0.07505MN}{2} = 0.037525MN$$

$$s_i \geq \frac{V_{\max}}{0.8 \cdot h \cdot \sigma_a} = \frac{0.037525MN}{0.8 \cdot 0.564m \cdot 275MPa} = 0.00031m \leq 0.018m \quad (\text{OK})$$

3.3.4. ESTABILIDAD DE LAS ALMAS

$$\frac{h}{s_i} = \frac{0.564m}{0.012m} = 47.0 \leq 160 \quad (\text{OK})$$

3.3.5. COMPROBACION DE LA SECCION DEL ALA

$$b \cdot s_i = 0.400m \cdot 0.016m = 0.0064m^2$$

$$0.0064m^2 \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_a \cdot h} - \frac{s_i \cdot h}{3} \geq \frac{0.22515MN \cdot m}{275MPa \cdot 0.564m} - \frac{0.012m \cdot 0.564m}{3}$$

$$0.0064m^2 \geq -0.000804m^2 \quad (\text{OK})$$

3.3.6. ESTABILIDAD DE LAS ALAS

$$\frac{b}{s_i} = \frac{0.400m}{0.018m} = 22.22$$



$$22.22 \leq 30 \cdot \sqrt{\frac{2100}{\sigma_a}} \leq 30 \cdot \sqrt{\frac{2100}{275MPa}} \leq 82.90 \quad (\text{OK})$$

3.3.7. COMPROBACION DE TENSION MÁXIMA CONSIDERANDO LAS TENSIONES REMANENTES DEL PROCESO DE SOLDEO.

$$\frac{h}{s_i} = \frac{56.4cm}{1.20cm} = 47$$

$$\frac{h}{s_i} \leq 3250 \cdot \sqrt{\frac{k}{\sigma_a + 7.4 \cdot \frac{q_1}{A}}} \leq 3250 \cdot \sqrt{\frac{7.4}{27500 \frac{N}{cm^2} + 7.4 \cdot \frac{18400W \cdot cm^{-1}}{279,36cm^2}}}$$

$$47.0 \leq 52.85$$

(OK)

3.3.8. CÁLCULO DE LOS CORDONES DE SOLDADURA

$$\sigma_e \leq 0.65 \cdot \sigma_a$$

$$\sigma_e = \frac{2 \cdot V \max \cdot b \cdot s_i}{a \cdot h \cdot (s_i \cdot h + 3 \cdot s_i \cdot b)} = \frac{2 \cdot 0.037525MN \cdot 0.400m \cdot 0.018m}{(0.7 \cdot 0.012m) \cdot 0.564m \cdot (0.012 \cdot 0.564m + 3 \cdot 0.018m \cdot 0.400m)}$$

$$\sigma_e = 4.02MPa$$

$$0.65 \cdot \sigma_a = 0.65 \cdot 275MPa = 178MPa$$

$$4.02MPa \leq 178.0MPa$$

(OK)

Luego de realizadas todas las comprobaciones se determina que los datos de la viga de diseño son:

Tabla. 3.8. Viga de Diseño comprobada

PERFIL	DATOS									COMPROBACION DE RESULTADOS		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Área	Mxx	Myy
600x400	400	600	12	12	18	18	564	300	400	27936	1.58E+09	4.967E+08



CAPITULO IV

DISEÑO Y CÁLCULO DE

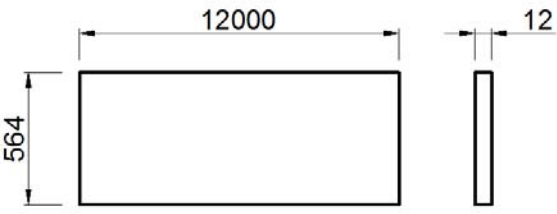
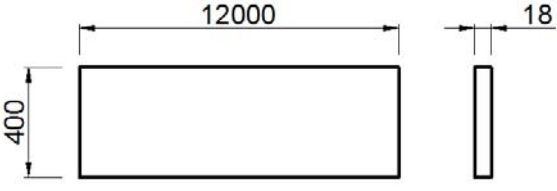
TECNOLOGÍA DE SOLDEO



4.1. TECNOLOGÍA DE SOLDEO MAG DE LA VIGA EN ALMA DOBLE (SOLDEO EN T ENTRE LAS ALMAS Y LAS ALAS).

En la tabla 4.1 están representadas las dimensiones de chapas soldadas a tope utilizadas para realizar la viga en alma doble:

Tabla 4.1. Chapas a utilizar en la construcción de la viga de alma doble

No.	Dibujo del elemento	Material	Cantidad
1		Acero construcción: S 275-J2	2 pedazos que representa las almas (la tecnología de soldeo a tope sigue en 4.2)
2		Acero construcción: S 275-J2	2 pedazos que representa las alas (la tecnología de soldeo a tope sigue en 4.2)

En la figura 4.1 se presenta la **geometría de bordes** elegidas para realizar las soldaduras en T, según la norma EN 29692-94, mediante el **Proceso de soldeo automático bajo protección gaseosa (MAG)**,

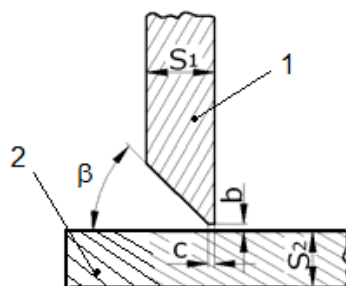


Fig. 4.1. Esquema de la preparación de bordes para el soldeo en T por un lado ($1/2 V$): 1– alma; 2–ala; S1-espesor de las almas; S2-espesor de alas.



Teniendo en cuenta que el espesor mínimo de las chapas metálicas utilizadas para la viga en alma doble es de 12 mm, los parámetros b , c y θ , (Fig. 4.1) deben cumplir:

$$\begin{aligned} 35^{\circ} &\leq \theta \leq 60^{\circ} \\ 2 &\leq b \leq 4 \\ 1 &\leq c \leq 2 \end{aligned} \quad (\text{ec. 4.1})$$

Se adoptan: $\theta = 45^{\circ}$; $b = 2 \text{ mm}$; $c = 2 \text{ mm}$.

4.1.1. MATERIALES DE BASE Y DE APORTE

La composición química y las propiedades mecánicas del metal base están presentadas en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2. Composición química del metal base (%)

Material	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P
S 275	0.155	0.6	0.25	0.17	0.04	0.02	0.035	0.029

Tabla 4.3. Características mecánica del metal base

Módulo de Elasticidad (E)	210000 MPa
Modulo de Poisson (ν)	0.30
Límite Elástico (σ_e)	275 MPa
Límite Plástico (σ_p)	340-470 MPa
Coef. de Dilatación Térmica (α)	12×10^{-6}
Conductividad Térmica (K)	50 W/($^{\circ}\text{C} \times \text{m}$)
Peso específico (γ)	78.50 KN/m ²

Considerando que la soldadura de la viga se va realizar mediante el **proceso de soldeo automático bajo protección gaseosa (MAG)**, se elijen el tipo de **metal de aporte** (alambre cobrado **FILCORD C** con revestido álcali) y el gas de protección **CORGON® 18**. El gas de protección es una mezcla de 82% Ar + 18% CO₂. El metal de aporte, **FILCORD**



C (EN 440-94: G3Sil o AWS A5.18-93: ER70S-4) asegura un proceso de soldeo estable por los aceros con bajo contenido de carbono, incluso cuando se utilizan múltiples pasadas.

La composición química y las propiedades mecánicas del metal de aporte están presentadas en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Composición química de metal de aporte (%)

C	Mn	Si	S	P	Cu
0.06-0.13	1.30- 1.60	0.70-1.00	< 0.025	< 0.025	<0.25

Tabla 4.5. Características mecánica de metal de aporte

Metal Base	Rm [N/mm ²]	Rs [N/mm ²]	E [%]	Kv [J -20°C]	Kv [J -40°C]
FILCORD C	510-560	> 420	>24	>70	>50

4.1.2. ÁREA DE METAL DE APORTE

En la fórmula de cálculo del **área de metal de aporte** se utilizan las notaciones de la Fig. 4.1:

$$A_{MA} = s_1 b + \frac{(s_1 - c)^2 \operatorname{tg} \beta}{2} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Particularizando por el caso de la viga, el área del metal de aporte de una soldadura es:

$$A_{MA} = 12 \cdot 2 + \frac{(12 - 2)^2 \operatorname{tg} 45^\circ}{2} = 74 \text{ mm}^2$$



4.1.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS TECNOLÓGICOS DE LA SOLDADURA MAG.

4.1.3.1. Selección del tipo de transferencia

Teniendo en cuenta la espesor de las chapas, por el soldeo MAG de las componentes de la viga se elige el tipo “**transfer spray**” (soldadura con arco largo).

4.1.3.2. Parámetros tecnológicos del proceso de soldeo mag en función del tipo de transferencia.

- a) **La polaridad del corriente eléctrico; DC⁺** (por el transfer spray se utiliza solo la polaridad inversa del corriente eléctrico).
- b) **el diámetro del electrodo** (hilo) fusible: para la **primera pasada** (la raíz de la soldadura) se elige un hilo **FILCORD C** con el diámetro $d_{e1} = 1,2 \text{ mm}$; **para el resto de las pasadas el diámetro del electrodo elegido es: $d_{e2} = 2,0 \text{ mm}$.**
- c) la **intensidad del corriente eléctrico:**

$$I_s = -67d_e^2 + 370d_e - 78 [A] \quad (\text{ec. 4.3})$$

En la primera pasada, la intensidad del corriente eléctrico es:

$$I_s = -67 \cdot 1,2^2 + 370 \cdot 1,2 - 78 \approx 270 [A]$$

En las otras pasadas, la intensidad del corriente eléctrico es:

$$I_s = -67 \cdot 2,0^2 + 370 \cdot 2,0 - 78 \approx 394 [A]$$

- d) el **voltaje del arco eléctrico:**

$$U_a = 15 + 0,05 I_s [V] \quad (\text{ec. 4.4})$$



En la primera pasada, el voltaje es:

$$U_a = 15 + 0,05 \cdot 270 = 28.5 [V]$$

En el resto de las pasadas, el voltaje es:

$$U_a = 15 + 0,05 \cdot 394 = 34.7 [V]$$

e) la **velocidad del proceso de soldeo**:

$$v_s = \frac{100 \cdot A_d}{6 \cdot F_t \cdot \rho} [cm/min] \quad (\text{ec. 4.5})$$

donde: A_d es la tasa de metal fundido en una pasada, [kg/hora]; F_t – área de una pasada, [cm²]; ρ – la densidad del metal fundido, [g/cm³].

La **tasa de metal fundido** en una pasada se calcula con:

$$A_d = 3 \cdot 10^{-5} \cdot I_s^2 + 10^{-3} \cdot I_s + 0,5 [kg/hora] \quad (\text{ec. 4.6})$$

En la primera pasada, la tasa de metal fundido es:

$$A_d = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 270^2 + 10^{-3} \cdot 270 + 0,5 = 2.957 [kg/hora]$$

En las otras pasadas, la tasa de metal fundido es:

$$A_d = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 394^2 + 10^{-3} \cdot 394 + 0,5 = 5.55 [kg/hora]$$

Para la primera pasada ($d_e = 1,2$ mm; transfer spray) se considera que la área del metal fundido es $F_r = 0,15$ cm²;

Para las otras pasadas, ($d_e = 2,0$ mm; transfer spray) se considera que la área del metal fundido es $F_t = 0,20$ cm², por cada pasada;



Teniendo en cuenta que el área del metal de aporte es de $0,74 \text{ cm}^2$ y que el área de la primera pasada es de $0,15 \text{ cm}^2$, resulta que para alcanzar los $0,59 \text{ cm}^2$ están necesarios otros 3 pasadas (con áreas de $0,20 \text{ cm}^2$).

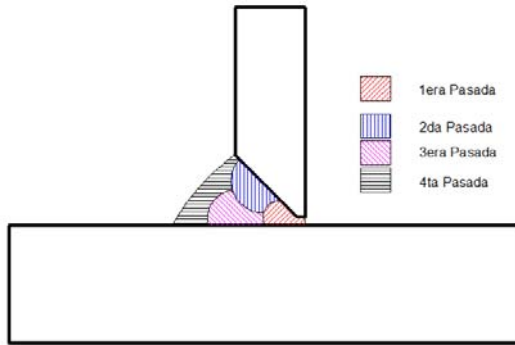


Fig. 4.2. Esquema de pasadas de los hilos de soldadura (Típica).

La *velocidad del proceso de soldeo*, en la primera pasada es:

$$v_{s,r} = \frac{100 \cdot 2.957}{6 \cdot 0,15 \cdot 7,81} \approx 42 \text{ [cm/min]}$$

La *velocidad del proceso de soldeo*, en las otras 3 pasadas es:

$$v_{s,II} = \frac{100 \cdot 5.55}{6 \cdot 0,20 \cdot 7,81} \approx 59 \text{ [cm/min]}$$

f) la *velocidad de suministro de alambre*:

$$v_e = 400 \frac{F_t \cdot v_s}{\pi \cdot d_e^2} \text{ [cm/min]} \quad (\text{ec. 4.7})$$

La *velocidad de suministro de alambre* en la primera pasada es:

$$v_e = 400 \frac{0,15 \cdot 42}{\pi \cdot 1,2^2} = 557 \text{ [cm/min]}$$

La *velocidad de suministro de alambre* en las otras 3 pasadas es:

$$v_e = 400 \frac{0,20 \cdot 59}{\pi \cdot 2,0^2} = 376 \text{ [cm/min]}$$



g) el flujo de gas de protección;

$D_G = (18 \dots 20) \text{ l/min}$ cuando la intensidad del corriente eléctrico $I_s = (150 \dots 400) \text{ A}$.

h) Energía linear E_L del proceso de soldeo:

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} [J / cm] \quad (\text{ec. 4.8})$$

donde: η es el coeficiente de eficacia del proceso de soldeo $\eta = 0.6 \dots 0.8$. Poniéndonos del lado de la seguridad adoptamos $\eta = 0.6$.

La *energía linear* en la primera pasada es:

$$E_L = 60 \cdot 0,6 \cdot \frac{270 \cdot 28.5}{42} = 6595 [J / cm]$$

La *energía linear* en las otras pasadas es:

$$E_L = 60 \cdot 0,6 \cdot \frac{394 \cdot 34.7}{59} = 8342 [J / cm]$$

Tabla 4.6. Parámetros tecnológicos de las soldaduras de la viga en alma doble, por el proceso MAG y la geometría de bordes del Fig. 4.1

Soldadura	Símbolo	Área total del cordón [cm ²]	Numero de pasadas	Área de cada pasada [cm ²]	Velocidad de soldeo [cm/min]	Energía linear [J/cm]
1	a7 ✓	0,74	4	0,15 – raíz 0,20 – otras	42– raíz 59 – otras	6595 – raíz 8342 – otras
2	a7 ✓	0,74	4	0,15 – raíz 0,20 – otras	42– raíz 59 – otras	6595 – raíz 8342 – otras
3	a7 ✓	0,74	4	0,15 – raíz 0,20 – otras	42– raíz 59 – otras	6595 – raíz 8342 – otras
4	a7 ✓	0,74	4	0,15 – raíz 0,20 – otras	42– raíz 59 – otras	6595 – raíz 8342 – otras



4.2. TECNOLOGÍA DE SOLDEO MANUAL A TOPE EN ALMAS Y ALAS

Para obtener la longitud de chapas metálicas correspondiente a la longitud de las almas y respectivamente de las alas (longitud de la viga), se puede utilizar, un procedimiento de soldadura manual, con electrodos revestidos; la longitud de los cordones soldados a tope, por las almas es de 564 mm y por las alas de 565 mm ($\cos 45^{\circ} \cdot 400mm$).

Por la soldadura manual se eligen los electrodos revestidos EN 499: E 46 4 B 3 2 H5, con la composición química y las propiedades mecánicas presentadas en las Tablas 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7. Composición química de metal de aporte (%):

C	Mn	Si Max.	S Max.	P Max.	Cu Max.	Ni Max.	Cr Max.	Mo Max.	V Max.
0.04- 0.08	1.20- 1.60	0.50	0.015	0.015	0.05	0.05	0.05	0.01	0.02

Tabla 4.8. Características mecánica de metal de aporte

Rm N/mm ² Min.	Rs [N/mm ²] Min.	E [%] 5d Min.	Kv [J] -40[°C] Min.
530 - 660	460	26	50



La figura 4.3 representa la **geometría de bordes** elegidas para realizar las soldaduras a tope en Y, de las chapas metálicas de las almas y alas, donde: S – espesor de chapa; $1 \leq b \leq 3$; $2 \leq c \leq 4$; $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$.

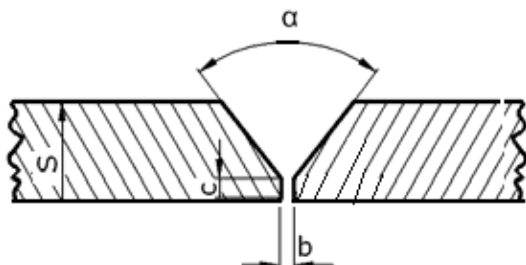


Fig. 4.3. Dibujo para la preparación de bordes para el soldeo a tope de las almas y alas.

En la tabla 4.9 se presenta las características geométricas de bordes elegidas para soldadura a tope de las almas y alas de la viga en alma doble.

Tabla 4.9 Geometría de bordes e para soldadura a tope de las almas y alas de la viga en alma doble

almas	alas
$S = 12 \text{ mm}$	$S = 18 \text{ mm}$
$b = 2 \text{ mm}$	$b = 2 \text{ mm}$
$c = 1 \text{ mm}$	$c = 2 \text{ mm}$
$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 60^\circ$

4.2.1. ARÉA DE METAL DE APORTE

$$A = S \cdot b + (S - c)^2 \operatorname{tg} \beta \quad (\text{ec. 4.9})$$

El aria de metal de aporte para soldar a tope las chapas de las almas es:

$$A_{almas} = 12 \cdot 2 + (12 - 1)^2 \operatorname{tg} 60 = 234 \text{ mm}^2$$

El aria de metal de aporte para soldar a tope las chapas de las alas es:

$$A_{alas} = 18 \cdot 2 + (18 - 2)^2 \operatorname{tg} 60 = 480 \text{ mm}^2$$



4.2.2. CALCULO DE LOS PARÁMETROS TECNOLÓGICOS DE LA SOLDADURA MANUAL A TOPE:

a) La polaridad del corriente eléctrico; DC⁺

b) Tamaño del electrodo.

El diámetro del electrodo revestido se elige en función del espesor de las chapas metálicas (Tabla 4.10). Para la primera pasada se recomienda un electrodo de menor tamaño (aprox. 50 ~ 60%)

Tabla 4.10. Diámetro recomendado del electrodo revestido por soldadura a tope en función del espesor de chapas

Espesor de las chapas, S , mm	1,5.. 2	3	4...8	9...12	13...20
Diámetro del electrodo revestido d_e , mm	1,6...2	3,25	4	4...5	5

Dado el espesor de las chapas (espesor del alma 12 mm y espesor del ala 20 mm) la soldadura a tope se realizara con múltiples pasadas.

- por la **primera pasada** (la raíz de la soldadura) se elige un electrodo revestido E464B32H5 con el diámetro $d_{e1} = 2,5$ mm.

- por **las otras pasadas** el diámetro del electrodo elegido es: $d_{e2} = 4$ mm

c) La intensidad del corriente eléctrico:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 35,5d_e - 18 [A] \quad (\text{ec. 4.10})$$

- en la primera pasada, la intensidad del corriente eléctrico es:

$$I_s = 2,5 \cdot 2,5^2 + 35,5 \cdot 2,5 - 18 = 86 [A]$$

- en las otras pasadas, la intensidad del corriente eléctrico es:

$$I_s = 2,5 \cdot 4^2 + 35,5 \cdot 4 - 18 = 164 [A]$$



d) El voltaje del arco eléctrico:

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10 [V] \quad (\text{ec. 4.11})$$

- en la primera pasada, el voltaje es:

$$U_a = 0,05 \cdot 86 + 10 = 14,4 [V]$$

- en las otras pasadas, el voltaje es:

$$U_a = 0,05 \cdot 164 + 10 = 18,2 [V]$$

e) La velocidad del proceso de soldeo:

$$v_s = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{F_t \cdot \rho} [cm / min] \quad (\text{ec. 4.12})$$

donde: α_d – coeficiente de aporte [g/A min] ($\cong 10\%$ de I_s)

I_s – intensidad del corriente eléctrico [A]

F_t – área de una pasada, [cm²];

ρ – la densidad del metal fundido, [g/cm³].

Considerando que el área del raíz es $F_r = 0,05 \text{ cm}^2$ (diámetro del electrodo 2,5 mm) y que el área de cada pasada siguiente es $F_t = 0,6 \text{ cm}^2$, y teniendo en cuenta el área total de metal de aporte, resulta los números de pasadas para el soldeo manual

- del alma: 4 pasadas (una de raíz)
- del ala: 8 pasadas (una de raíz)

La velocidad de soldeo manual en la pasada de raíz es:

$$v_s = \frac{0,08 \cdot 86}{0,05 \cdot 7,81} \approx 18 [cm / min]$$



La velocidad de soldeo manual en las otras pasadas es:

$$v_s = \frac{0,16 \cdot 164}{0,6 \cdot 7,81} \approx 6 [\text{cm} / \text{min}]$$

f) *Energía lineal E_L del proceso de soldeo manual:*

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} [\text{J} / \text{cm}] \quad (\text{ec. 4.8})$$

donde: η es el coeficiente de eficacia del proceso de soldeo $\eta=0.5 \dots 0.7$

- la *energía lineal* en la primera pasada es:

$$E_L = 60 \cdot 0,5 \cdot \frac{14,4 \cdot 86}{18} = 2064 [\text{J} / \text{cm}]$$

- la *energía lineal* en las otras pasadas es:

$$E_L = 60 \cdot 0,5 \cdot \frac{18,2 \cdot 164}{6} = 14924 [\text{J} / \text{cm}]$$

Tabla 4.11. Parámetros tecnológicos de las soldaduras manuales a tope para las almas y alas (geometría de bordes del Fig. 4.3)

Soldadura manual a tope por	Símbolo	Área total del cordón [cm ²]	Numero de pasadas	Área de cada pasada [cm ²]	Velocidad de soldeo [cm/min]	Energía lineal [J/cm]
Almas	60° a10 V	2,34	4	0,05 – raíz 0,60 – otras	18 – raíz 6 - otras	2064 – raíz 14924 – otras pasadas
Alas	60° a16 V	4,80	8	0,05 – raíz 0,60 – otras	18 – raíz 6 - otras	2064 – raíz 14924 – otras pasadas



4.3. TEMPERATURA DE PRE-CALENTAMIENTO EN LAS UNIONES SOLDADAS DE LA VIGA.

En algunos casos, para reducir la tendencia del material soldado de fragilizarse por hidrógeno, antes de soldar es necesario el pre-calentamiento de los materiales de base. La temperatura de pre-calentamiento depende del tipo de material base (composición química), el espesor de las chapas, la rigidez de la estructura, el tipo de soldadura (a tope, en T, etc.), el calor inducido por el proceso de soldeo, y la temperatura ambiente.

En general, el pre-calentamiento se hace en una anchura entre 6 y 12 S, en ambos lados de las chapas, siendo S espesor del metal base.

La temperatura de pre-calentamiento se puede obtener utilizando el método recomendado por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW). También se pueden utilizar otros métodos más exactos, como el método Seférian o un método que correlaciona la dureza máxima en la Zona Afectada por Calor (ZAC) con la composición química de metal base y el tiempo de enfriamiento.

4.3.1. MÉTODO RECOMENDADO POR EL INSTITUTO INTERNACIONAL DE SOLDADURA (IIW).

La temperatura de pre-calentamiento T_{pr} se selecciona de la tabla 4.13 en función de la letra de soldabilidad L_s , la severidad térmica S_t y el diámetro de los electrodos revestidos (para la soldadura manual). La letra de soldabilidad está presentada en la tabla 4.12 en función del tipo de revestimiento de los electrodos y el carbono equivalente C_e del metal base:

$$C_e [\%] = C [\%] + \frac{Mn [\%]}{20} + \frac{Ni [\%]}{15} + \frac{Cr [\%] + Mo [\%] + V [\%]}{5} + \frac{Si [\%]}{4} \quad (\text{ec. 4.13})$$



La composición química del metal base está presentado en la tabla 4.1. El carbono equivalente es:

$$C_e [\%] = 0,15 + \frac{0,6}{20} + \frac{0,02}{15} + \frac{0,17}{5} + \frac{0,25}{4} \approx 0,28$$

Tabla 4.12. Letra de soldabilidad en función del carbono equivalente y el tipo de revestido del electrodo

L_s	C_e [%]	
	electrodo con revestido álcali	Otros tipos de revestidos
A	<0,25	<0,20
B	0,26...0,30	0,21...0,23
C	0,31...0,35	0,24...0,27
D	0,36...0,40	0,28...0,32
E	0,41...0,45	0,33...0,38
F	0,46...0,50	0,39...0,45
G	>0,50	>0,45

La severidad térmica se calcula con:

$$S_t = \frac{n_r \cdot S}{6} \quad (\text{ec. 4.14})$$

donde: n_r es el número que depende de manera la de transmisión del calor por conductividad térmica en la unión soldada (Fig. 4.4) y S es el espesor de chapas.

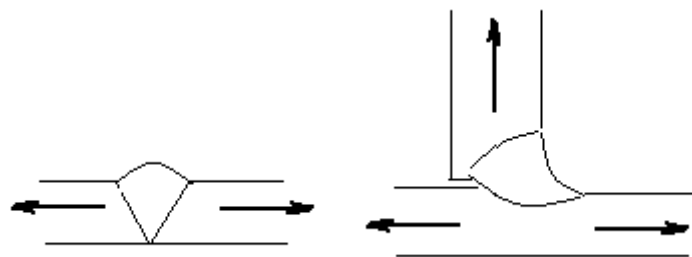


Fig. 4.4. Transmisión del calor por conductividad térmica en las uniones soldadas a tope ($n_r = 2$) y en T ($n_r = 3$)



En la unión soldada manual por arco, la severidad térmica S_t es:

$$S_t = \frac{2 \cdot 18}{6} = 6$$

Tabla 4.13. Temperatura mínima de pre-calentamiento en °C recomendada por IIW

L_s	S_t	d_e , mm					L_s	S_t	d_e , mm				
		3,25	4,0	5,0	6,0	8,0			3,25	4,0	5,0	6,0	8,0
		Temperatura pre-calentamiento °[C]							Temperatura pre-calentamiento °[C]				
D	2	-	-	-	-	-	E	8	200	150	125	50	25
E		50	-	-	-	-	F		225	200	175	125	50
F		125	25	-	-	-	A		75	25	-	-	-
C	3	-	-	-	-	-	B	12	125	75	25	-	-
D		75	-	-	-	-	C		150	125	75	-	-
E		100	25	-	-	-	D		200	175	125	75	-
F		150	100	25	-	-	E		225	200	175	100	50
C	4	50	-	-	-	-	F	16	250	225	200	150	125
D		100	25	-	-	-	A		75	25	-	-	-
E		125	75	-	-	-	B		125	75	50	-	-
F		175	125	75	-	-	C		175	150	125	50	25
B		50	-	-	-	-	D		200	175	175	125	100
C	6	100	25	-	-	-	E	24	225	200	200	150	150
D		150	100	25	-	-	F		250	250	225	200	200
E		175	125	75	-	-	A		75	25	-	-	-
F		225	175	125	75	-	B		125	75	50	25	-
A	8	25	-	-	-	-	C	24	175	150	125	75	25
B		75	-	-	-	-	D		200	175	175	125	100
C		125	75	25	-	-	E		225	200	200	175	150
D		175	125	75	-	-	F		250	250	225	200	200

Teniendo en cuenta que la severidad térmica $S_t = 6$, que la letra de soldabilidad $L_s = B$, y que el primer electrodo a utilizar es de diámetro 2,5mm, se tomará una temperatura de pre-calentamiento de 75°C .



4.3.2. MÉTODO SEFÉRIAN

La fórmula de cálculo de la temperatura de pre-calentamiento es:

$$T_{pr} = 350 \cdot \sqrt{C_e^s - 0,25} \quad (\text{ec. 4.15})$$

donde:

$$C_e^s = C_e \cdot (1 + 0,005 \cdot S) \quad (\text{ec. 4.16})$$

C_e es el carbono equivalente de la formula (4.14). En la formula de Seférian, C_e^s es una temperatura de pre-calentamiento virtual; cuando $C_e^s \leq 0,25$ se considera que la unión soldada se puede realizar sin pre-calentamiento.

Con la formula Seférian, se cálculo de la temperatura de pre-calentamiento para las soldaduras MAG en T de la viga en alma doble:

$$C_e^s = 0,28 \cdot (1 + 0,005 \cdot 12) = 0,297$$

$$T_{pr} = 350 \cdot \sqrt{0,297 - 0,25} = 75^{\circ} C$$

Al final, para realizar las uniones soldadas con el procedimiento MAG se elige como temperatura de pre-calentamiento $T_{pr} = 75^{\circ} C$.



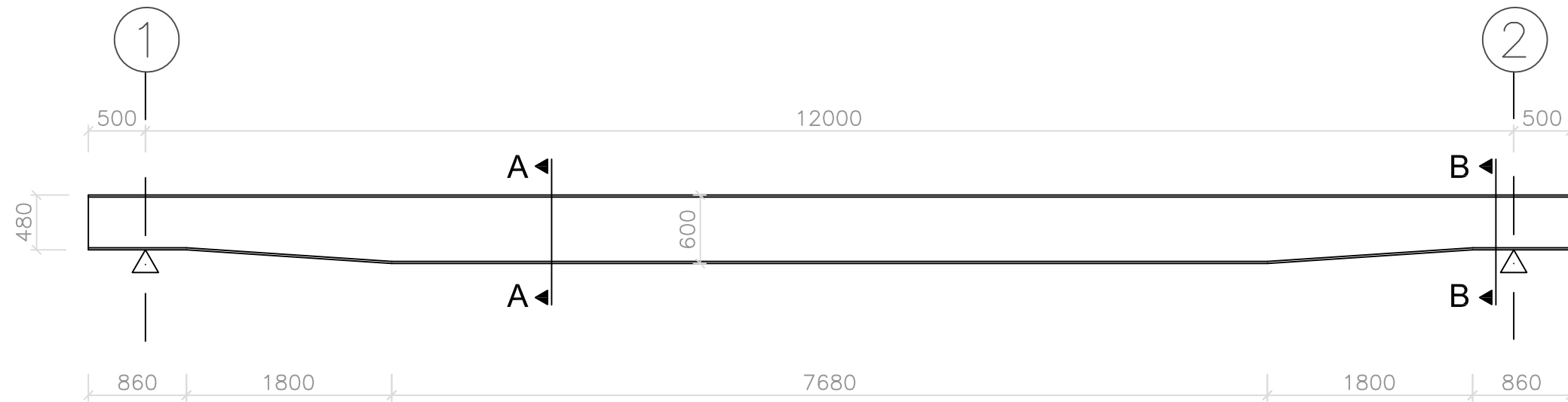
CONCLUSIONES

- Los resultados del modelo teórico fueron similares al resultado arrojado por el programa de cálculo estructural SAP2000.
- La flecha máxima arrojada por el programa SAP2000 (9,09mm) es ligeramente superior a la calculada por el modelo teórico (8,2mm); la razón erradica en que en el modelo teórico no incluyeron las acciones horizontales del sistema, mientras que en el programa de cálculo sí.
- El espesor de las alas (12mm) es el mínimo permitido, ya que si se toma un espesor menor la viga fallaría por tensiones remanentes durante el proceso de soldeo.
- La intensidad de corriente del proceso de soldeo manual esta dentro de los límites permitidos (86A y 164A).
- Las velocidades en ambos procesos de soldeo van acorde con el tipo de aplicación. Automático, entre 42 y 59 cm/min; y Manual, 6 y 18 cm/min.
- Para reducir la tendencia del material soldado de fragilizar por hidrogeno, se ha determinado la temperatura de pre-calentamiento necesaria para obtener una soldadura de calidad. Se ha definido una temperatura de 75°C para ambos procesos de soldeo.

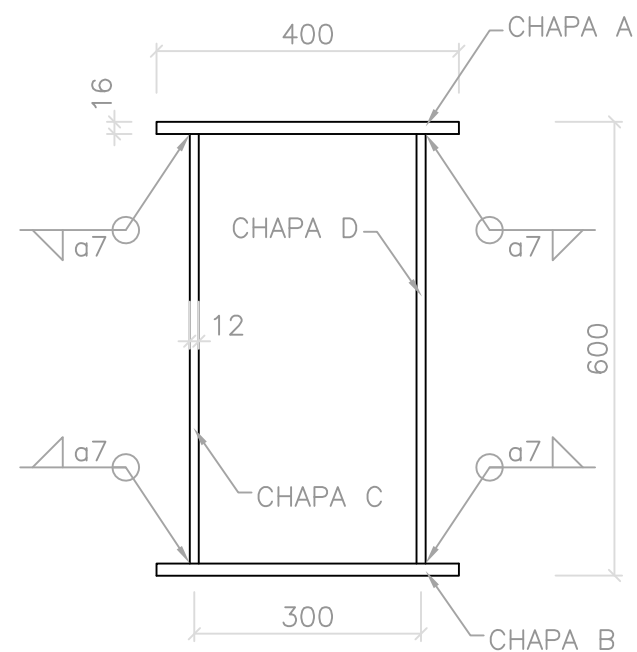


BIBLIOGRAFÍA

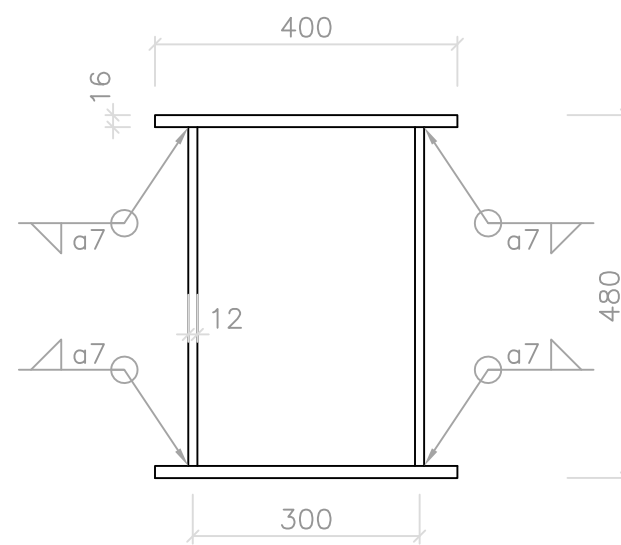
- J.M. Simón-Talero Muñoz. **“INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS SEGÚN EUROCÓDIGO 3”**. Imprime Gráficas Rito. 1era Edición corregida. España (2000).
- V. Cudós y F. Quintero. **“ESTRUCTURAS METÁLICAS. UNIONES. U.D. 2 (I)”**. Edita Fundación Escuela de la Edificación. Madrid, España (1988).
- D. Seferian. **“LAS SOLDADURAS. TECNICA Y CONTROL”**. Editorial Urmo. España (1981).
- W. T. Segui. **“DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON LRFD”**. Thomson Editores. 2da Edición. España (1981).
- R. Rowe y L. Jeffeus. **“Manual de Soldadura GMAW (MIG – MAG)”**. Paraninfo Ediciones. España (2008).
- W. McGuire. **“STEEL STRUCTURES”**. Prentice & Hall Editors. EEUU (1968).
- R. Rodríguez y C. Martínez. **“PRONTUARIO DE ESTRUCTURAS METALICAS”**. Editor CEDEX. 2da Edición. España (1988).
- Instituto Navarro de Salud Laboral. **“GUÍA PARA LA ADECUACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGO DE PUENTES GRÚA”**. Pamplona, España (2003).
- UNE 76-201-88. **“CONSTRUCCIONES METÁLICAS. CAMINOS DE RODADURA EN PUENTES GRUA”**. España (1988).
- UNE 58-112-91. **“GRÚAS Y APARATOS DE ELEVACIÓN”**. España (1991).
- Eurocódigo 3. Proyectos de estructuras de acero. (1993). [Existe versión actualizada 2005].
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_MAG
- http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_por_arco



DISPOSICION FINAL DE LA VIGA
ESCALA 1:50



CORTE A-A
ESCALA 1:10



CORTE B-B
ESCALA 1:10

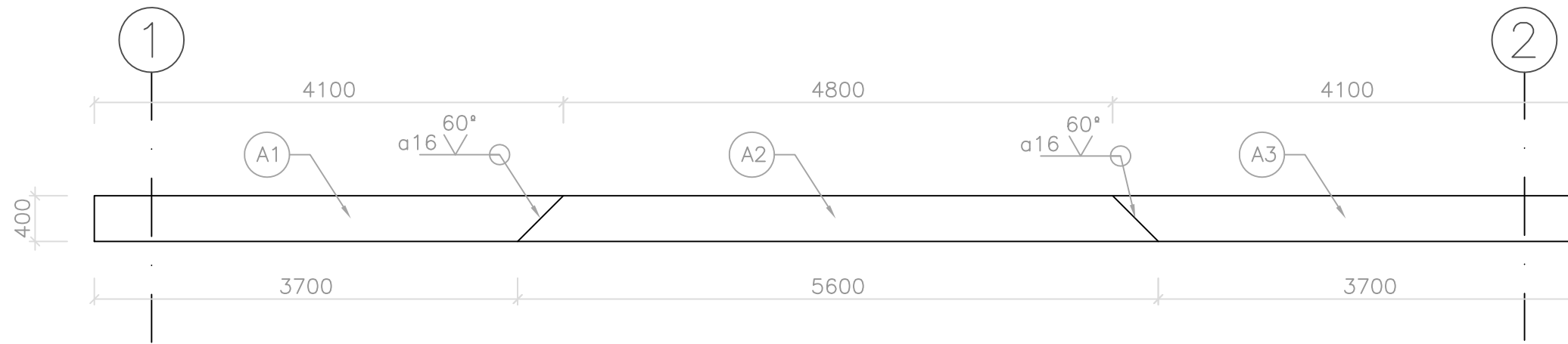
NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN MILIMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- 2.- TODAS LAS CONEXIONES SERAN SOLDADAS AL MENOS QUE SE DETALLE OTRO TIPO.
- 3.- COMO MATERIAL DE APORTE SE USARA ALAMBRE COBRADO FILCORD C REVESTIDO CON ÁLCALI.

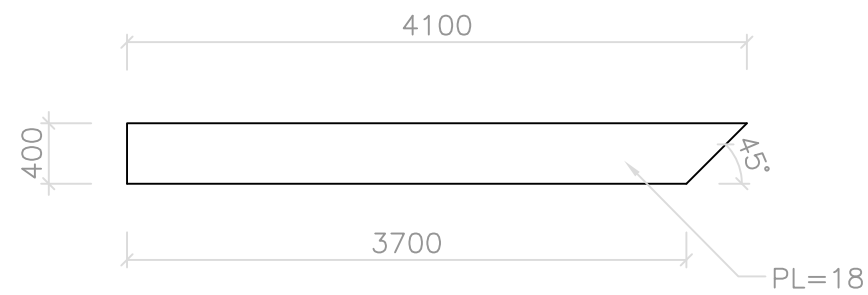
CALIDAD DE LOS MATERIALES

PLANCHAS S 275-J2 $f_y = 275$ KN

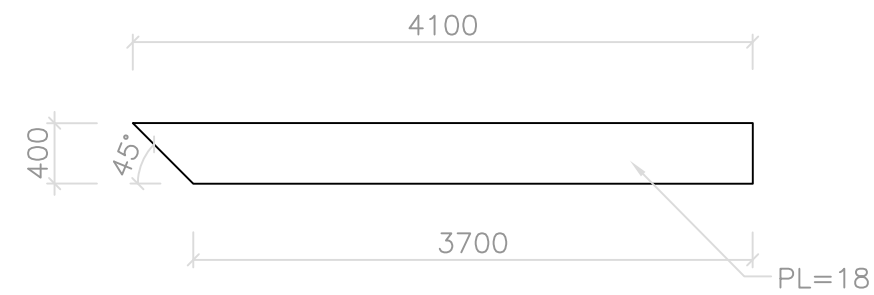
DIBUJADO POR:	ING. FRANCISCO FRAILE
DISEÑADO POR:	ING. FRANCISCO FRAILE
REVISADO POR:	DR. ING. MIHAELA IORDACHESCU
FECHA:	JUNIO/2010
PROYECTO:	DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUENTE GRÚA DE ALMA DOBLE
	DISPOSICION FINAL DE LA VIGA
	PLANO #
	1



PLANTA CHAPA A
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA A1
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA A3
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA A2
ESCALA 1:50

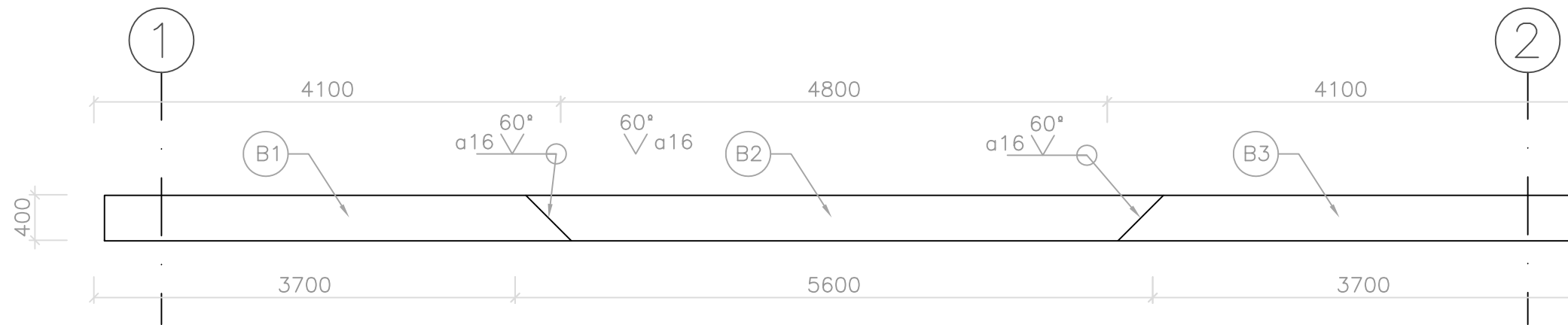
NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN MILIMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- 2.- TODAS LAS CONEXIONES SERAN SOLDADAS AL MENOS QUE SE DETALLE OTRO TIPO.
- 3.- COMO MATERIAL DE APORTE SE USARA ELECTRODOS REVESTIDOS EN 499: E 46 4 B 3 2 H5

CALIDAD DE LOS MATERIALES

PLANCHAS S 275-J2 fy= 275 KN

	DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE
	DISEÑADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE
	REVISADO POR: DR. ING. MIHAELA IORDACHESCU
	FECHA: JUNIO/2010
PROYECTO: DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUENTE GRÚA DE ALMA DOBLE CHAPA A. PLANTA Y DETALLES	
PLANO # 2	



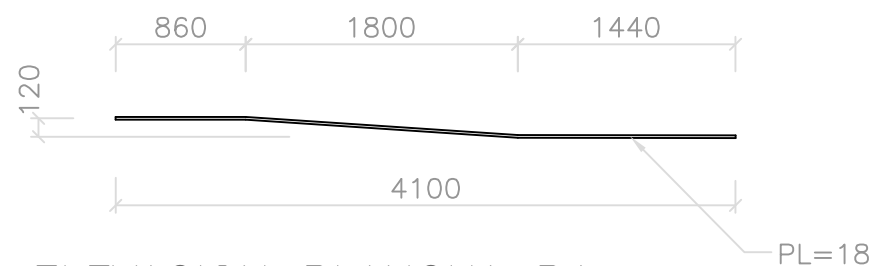
PLANTA CHAPA B
ESCALA 1:50



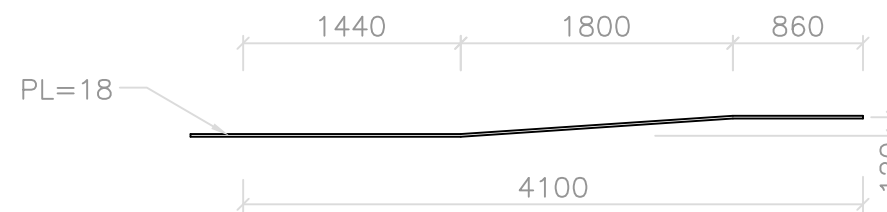
DETALLE PLANCHA B1
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA B3
ESCALA 1:50



ELEVACION PLANCHA B1
ESCALA 1:50



ELEVACION PLANCHA B3
ESCALA 1:50

NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN MILIMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- 2.- TODAS LAS CONEXIONES SERAN SOLDADAS AL MENOS QUE SE DETALLE OTRO TIPO.
- 3.- COMO MATERIAL DE APORTE SE USARA ELECTRODOS REVESTIDOS EN 499: E 46 4 B 3 2 H5
- 4.- LAS PLANCHAS B1 Y B3 SE DOBLARAN CON EL USO DE CALOR MANTENIENDO EL TRAMO COMO PIEZAS INDEPENDIENTES.

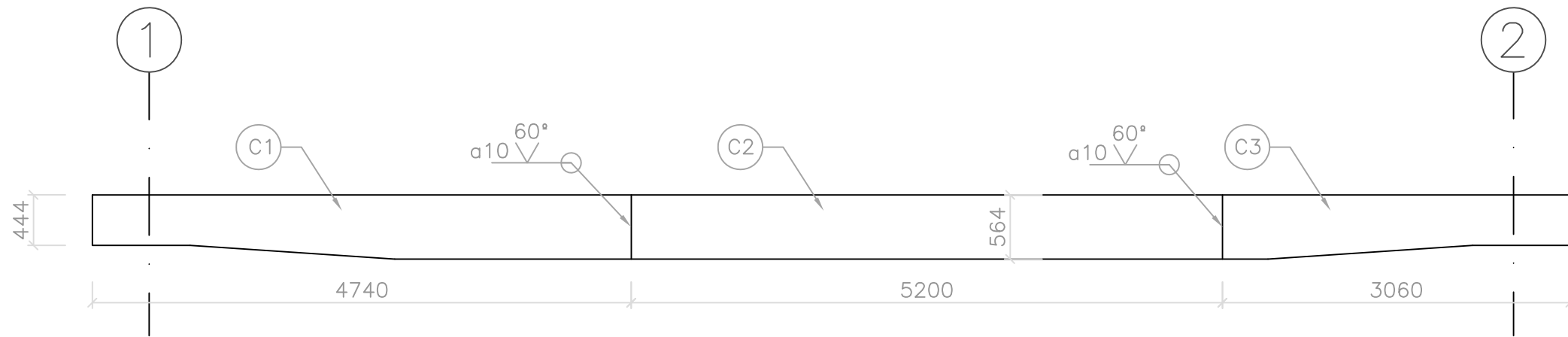
CALIDAD DE LOS MATERIALES

PLANCHAS S 275-J2 fy= 275 KN



DETALLE PLANCHA B2
ESCALA 1:50

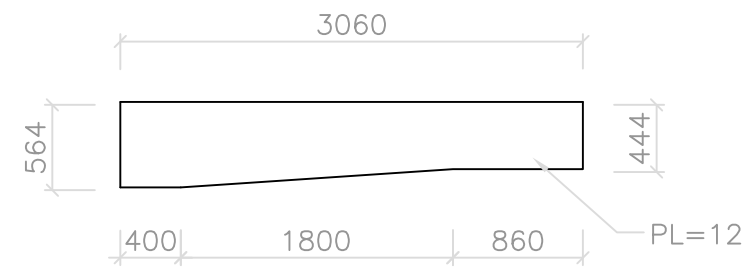
DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE DISEÑADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE REVISADO POR: DR. ING. MIHAELA IORDACHESCU FECHA: JUNIO/2010	DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUNTE GRUA DE ALMA DOBLE
	CHAPA B. PLANTA Y DETALLES
	PLANO # 3



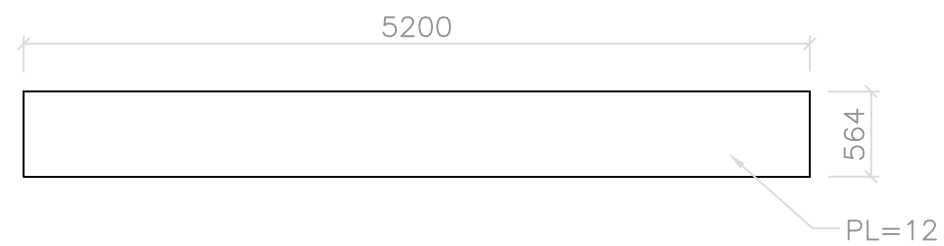
PLANTA CHAPA C
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA C1
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA C3
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA C2
ESCALA 1:50

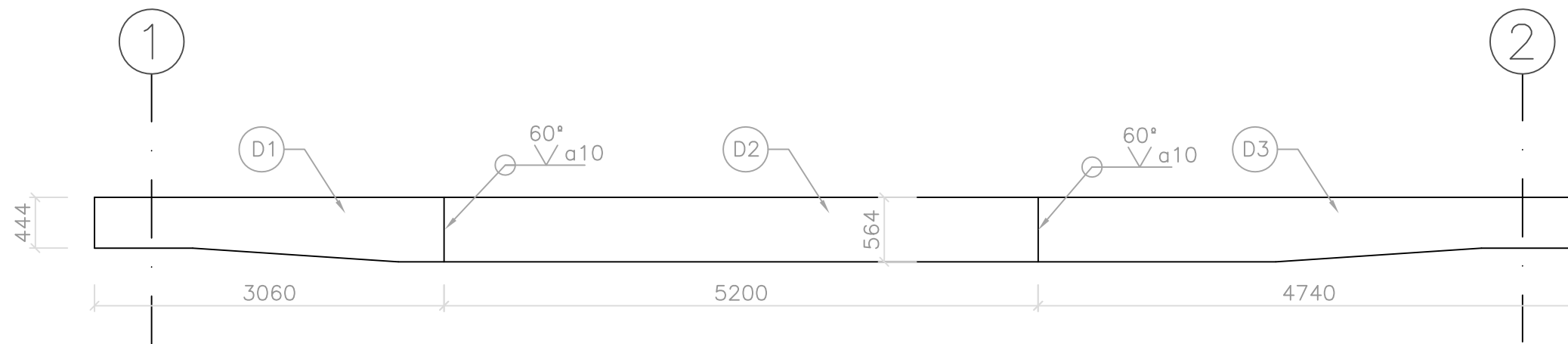
NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN MILIMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- 2.- TODAS LAS CONEXIONES SERAN SOLDADAS AL MENOS QUE SE DETALLE OTRO TIPO.
- 3.- COMO MATERIAL DE APORTE SE USARA ELECTRODOS REVESTIDOS EN 499: E 46 4 B 3 2 H5

CALIDAD DE LOS MATERIALES

PLANCHAS S 275-J2 fy= 275 KN

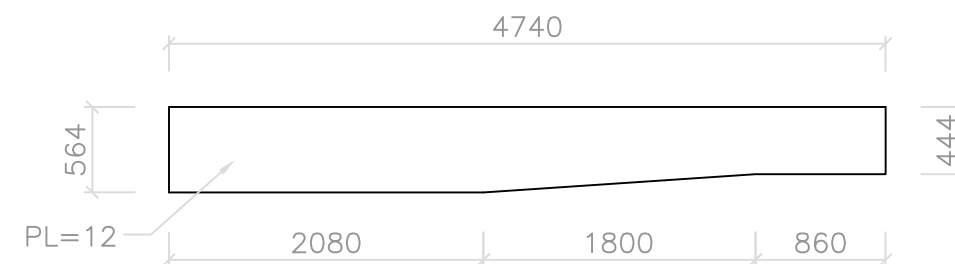
DIBUJADO POR:	ING. FRANCISCO FRAILE
DISEÑADO POR:	ING. FRANCISCO FRAILE
REVISADO POR:	DR. ING. MIHAELA IORDACHESCU
FECHA:	JUNIO/2010
PROYECTO:	DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUENTE GRUA DE ALMA DOBLE
	CHAPA C. PLANTA Y DETALLES
	PLANO # 4



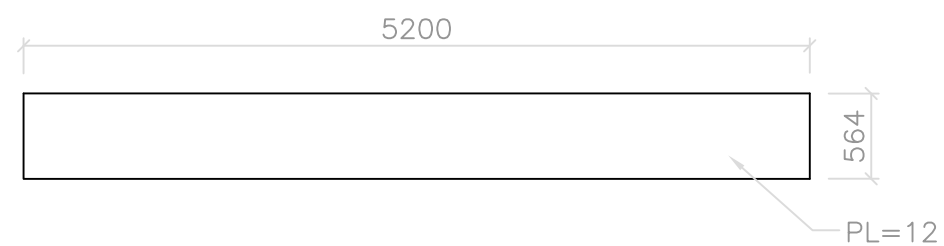
PLANTA CHAPA D
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA D1
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA D3
ESCALA 1:50



DETALLE PLANCHA D2
ESCALA 1:50

NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS ESTAN DADAS EN MILIMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD.
- 2.- TODAS LAS CONEXIONES SERAN SOLDADAS AL MENOS QUE SE DETALLE OTRO TIPO.
- 3.- COMO MATERIAL DE APORTE SE USARA ELECTRODOS REVESTIDOS EN 499: E 46 4 B 3 2 H5

CALIDAD DE LOS MATERIALES

PLANCHAS S 275-J2 fy= 275 KN

	DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE
	DISEÑADO POR: ING. FRANCISCO FRAILE
	REVISADO POR: DR. ING. MIHAELA IORDACHESCU
	FECHA: JUNIO/2010
PROYECTO: DISEÑO, CÁLCULO Y COMPROBACIÓN DE UNIÓN SOLDADA EN VIGA DE PUNTE GRUA DE ALMA DOBLE CHAPA D. PLANTA Y DETALLES	
	PLANO # 5