



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PARA LA COLOCACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN NAVES INDUSTRIALES

Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica

Universidad de Zaragoza

Autor: David Arlanzón Lomas

Director: Ramón Miralbés Buil

Convocatoria: Marzo 2012



En primer lugar quisiera agradecer a Ramón Miralbés la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto y aprender de él, a Marco Carrera que me habló de este proyecto y al Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación el permitirme realizarlo.

A mis padres, porque sus consejos y experiencia siempre me han ayudado. Y por supuesto a mi hermana y al resto de mi familia, por vuestra confianza en mí.

A todos mis profesores, desde el colegio hasta la universidad, y en especial a mi profesora Amaya, por todo lo que he aprendido gracias a vosotros.

A todos mis amigos y compañeros de la universidad, porque sin todos vosotros, el trabajo en equipo, vuestros consejos, y vuestra ayuda seguro que no estaría escribiendo estas líneas.

INDICE:

1.- INTRODUCCIÓN.....	5
1.1.- OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
1.2.- METODOLOGÍA.....	6
2.- FASES DEL PROYECTO.....	7
2.1.- MODELADO CAD.....	7
2.2.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE EL MÉTODO MATRICIAL.....	7
2.3.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS.....	7
2.4.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES SOLDADAS.....	7
2.5.- ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN LAS PATAS.....	8
2.6.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS EN LA CUBIERTA.....	8
3.- DATOS INICIALES.....	10
3.1.- SITUACIÓN DE LA NAVE Y REQUERIMIENTOS INICIALES.....	10
3.2.- CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	11
3.3.- DISTRIBUCIÓN DE LAS PINZAS.....	12
3.4.- DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA SOLAR.....	14
3.4.1.- VISTA EN PERFIL.....	14
3.4.2.- VISTA EN PLANTA.....	15
3.5.- MATERIAL Y PERFILES UTILIZADOS.....	15
3.6.- UNIONES.....	17
3.7.- CARGAS.....	17
3.8.- CRITERIOS DE RIGIDEZ Y DISEÑO UTILIZADOS.....	18
4.- REALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	19
4.1.- CREACIÓN DE VIGAS.....	19
4.2.- CÁLCULO DE LAS CARGAS.....	22
4.2.1.- ANÁLISIS REALIZADO POR EL PROGRAMA.....	22
4.2.2.- CARGAS DE PESO PROPIO.....	23
4.2.3.- CARGAS DE VIENTO.....	23
4.2.4.- CARGAS DE NIEVE.....	25
4.2.5.- SOBRECARGA DE USO.....	25

4.3.- OBTENCIÓN DE LAS UNIONES MÁS DESFAVORABLES.....	26
4.3.1.- UNIÓN MÁS DESFAVORABLE A TORNILLO.....	30
4.3.2.- UNIÓN MÁS DESFAVORABLE A SOLDADURA.....	32
4.4.- DISEÑO DE LAS UNIONES.....	33
4.4.1.- TORNILLOS.....	34
4.4.2.- CORDONES DE SOLDADURA.....	36
4.5.- DISEÑO DE LAS UNIONES EN LA CUBIERTA.....	44
4.5.1.- DATOS INICIALES.....	44
4.5.2.- ANÁLISIS DE TENSIONES EN LA PLACA DE APOYO.....	48
4.5.3.- CÁLCULO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS EN LA CUBIERTA.....	49
5.- CONCLUSIONES.....	54
5.1.- BIBLIOGRAFÍA.....	55
5.2.- CONSULTAS WEB.....	55
ANEXOS.....	56
NORMATIVA APLICABLE AL CÓDIGO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN.....	57
PERFILES IPN.....	68
CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS A FLEXIÓN.....	69
CÁLCULO DE UNIONES SOLDADAS A FLEXIÓN.....	71
PERFILES DE TORNILLOS.....	76
LA TEORÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	77

1.- INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como fin la obtención de una estructura para colocar paneles solares sobre tejados de naves industriales. Estas estructuras se rigen por la normativa básica de edificación y por el Código Técnico de Edificación (CTE).

Se trata de un proyecto de investigación llevado a cabo por el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza.

La motivación a la realización de este proyecto se debe al desarrollo de las energías renovables, en especial de la fotovoltaica. Ha aparecido la necesidad de desarrollar estructuras capaces de soportar paneles solares fotovoltaicos y, debido a la nueva normativa que obliga a las nuevas empresas a colocar en sus instalaciones nuevas paneles solares fotovoltaicos o a la instalación de éstos para la obtención de una fuente adicional de ingresos, ha aumentado la utilización de los mismos en las cubiertas de las naves industriales. Es por ello que resulta necesario dimensionar las estructuras portantes de los mismos de forma que sean capaces de soportar las cargas que puedan aparecer y transmitirlos eficazmente a la estructura de la nave.

Las herramientas de diseño en ingeniería usadas para el desarrollo de nuevos productos han experimentado recientemente una evolución muy positiva, obteniendo estructuras nuevas óptimas en comparación a las obtenidas por medios tradicionales.



Figura 1: ejemplo de una instalación solar en nave industrial.

1.1.- OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

Con este proyecto se busca aplicar los conocimientos adquiridos en asignaturas como Elasticidad y Resistencia de Materiales, Diseño de Máquinas y Estructuras, al mundo real. Para ello, seremos capaces de usar las leyes apropiadas en cada situación y ayudarnos de los programas informáticos de ingeniería para las operaciones complejas.

El alcance de este proyecto va dirigido para fomentar y facilitar a todas esas empresas que quieran reducir sus gastos en la factura y para que la actividad industrial genere el menor impacto ambiental posible. De esta forma, las empresas podrán ser capaces de autoabastecerse toda o parte de la energía que consumen evitando consumir recursos limitados.

1.2.- METODOLOGÍA

En este proyecto se partirá de las medidas normalizadas de un módulo fotovoltaico ya existente, por lo que la distribución de las vigas no variará a la planteada.

Con estos datos iniciales, se desarrollará el diseño de la estructura mediante los programas AutoCAD y CYPECAD. Se analizará las combinaciones de carga según la climatología de la zona (ver anexo A) y, en función de los resultados obtenidos, optimizar dicho diseño de las vigas (anexo B) para posteriormente facilitar la situación de los puntos más críticos. Las uniones atornilladas serán calculadas mediante las herramientas del anexo C y las soldadas mediante el anexo D.

Las patas de la estructura estarán discretizadas mediante el Método de los Elementos Finitos (anexo F) para un mejor análisis de su comportamiento. Para ello, se dará uso de los programas MSC Patran y MSC Nastran. Una vez analizadas, se podrán calcular las métricas necesarias de los tornillos para la fijación de la estructura a la base del tejado de la nave industrial, teniendo siempre en cuenta los parámetros de seguridad.

2.- FASES DEL PROYECTO

2.1.- MODELADO CAD

En primer lugar, será dibujada la estructura con la aplicación de AutoCAD debido a su simplicidad y rapidez. Se tendrá en cuenta las direcciones de los ejes para después exportarlo al programa CYPECAD.

2.2.- ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE EL MÉTODO MATRICIAL

En segundo lugar, con la estructura en CYPE, se estudiarán las cargas que afectan a la estructura mediante el Código Técnico de Edificación y se calcularán a mano todos los casos posibles de cargas para posteriormente introducirlas al programa sobre cada una de las vigas.

El programa CYPE calculará automáticamente todos los esfuerzos sufridos en las barras de la estructura y las secciones más apropiadas para para conjunto de vigas. A partir de esos datos se analizarán dos tipos de uniones: tornillo y soldadura.

2.3.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS

En tercer lugar, teniendo en cuenta que las correas de aluminio irán atornilladas a las de acero, será calculada la métrica del tornillo a partir de la unión más desfavorable entre correas y vigas.

Para su resolución bastará con los valores de tensión obtenidos y aplicando el cálculo de las uniones atornilladas a flexión del anexo C aplicando el coeficiente de seguridad requerido.

2.4.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES SOLDADAS

En cuarto lugar, como tanto las patas y las vigas serán del mismo material (acero), su unión irá soldada. Para ello se analizará cual es la pata más desfavorable y podrá ser determinado el espesor necesario para que la soldadura resista frente a la acción de cargas (ver anexo D).

2.5.- ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE LAS UNIONES EN LAS PATAS

En quinto lugar, utilizando el programa MSC Patran, serán diseñadas cada una de las diferentes patas según el perfil calculado anteriormente, las cuales, irán soldadas a una chapa de acero. Esta chapa a su vez, estará fijada mediante tornillos a lo que sería el tejado de la nave.

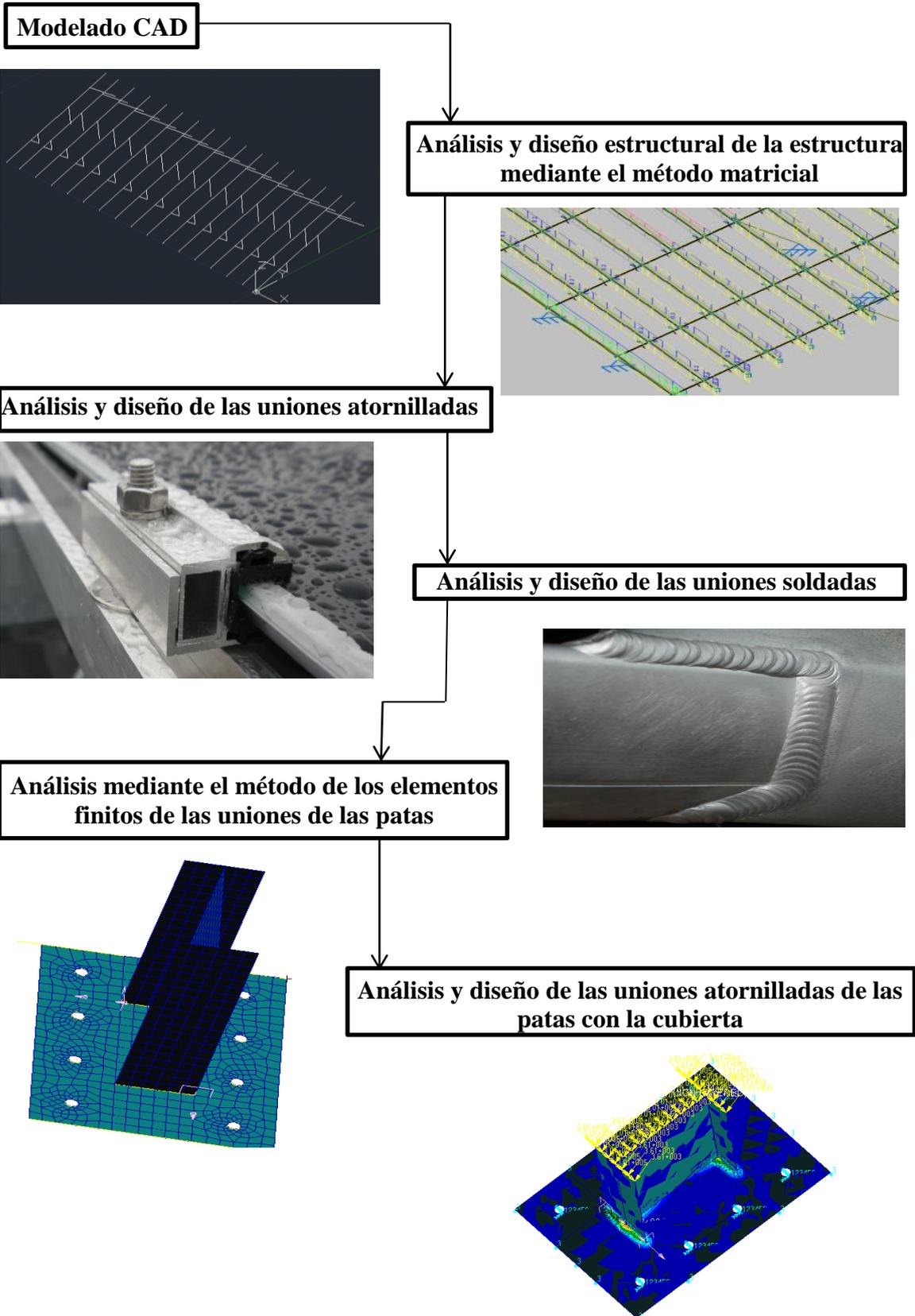
Se tomarán los datos de los mayores esfuerzos producidos en las patas que se obtuvieron con el programa CYPECAD y se colocarán como cargas distribuidas en cada una de las secciones de las patas.

Después de su diseño, será discretizado con el programa MSC Nastran para que, mediante la simulación numérica del Método de los Elementos Finitos, el programa calcule automáticamente los esfuerzos y tensiones.

2.6.- ANÁLISIS Y DISEÑO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS DE LAS PATAS CON LA CUBIERTA

Por último, volviendo al programa MSC Patran, serán analizadas las patas de la estructura viendo el comportamiento de las patas frente a las cargas indicadas. Viendo que las tensiones entran dentro de un rango aceptable, se procederá a calcular la métrica de los tornillos necesaria para que la estructura quede fija y entre dentro de los requisitos de seguridad.

-ESQUEMA DE LAS FASES DEL PROYECTO-



3.- DATOS INICIALES

3.1.- SITUACIÓN DE LA NAVE Y REQUERIMIENTOS INICIALES

Se quiere construir una nave industrial en Huesca capital (zona 2 según anexo A) con un área de tejado de 42m x 20m y en la que se quiere colocar una instalación solar fotovoltaica para su autoabastecimiento. Las correas de la nave industrial donde irán situadas las patas de la estructura estarán a: 0, 5,10 y 17 metros.

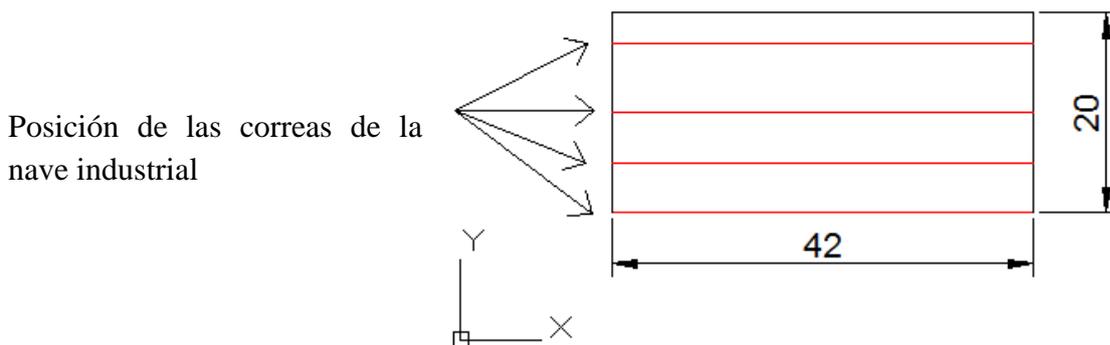


Figura 2: vista superior de la nave industrial.

La cubierta de la nave tendrá un parapeto para proteger a los paneles solares del viento y una inclinación de 5° como indica la figura 3:

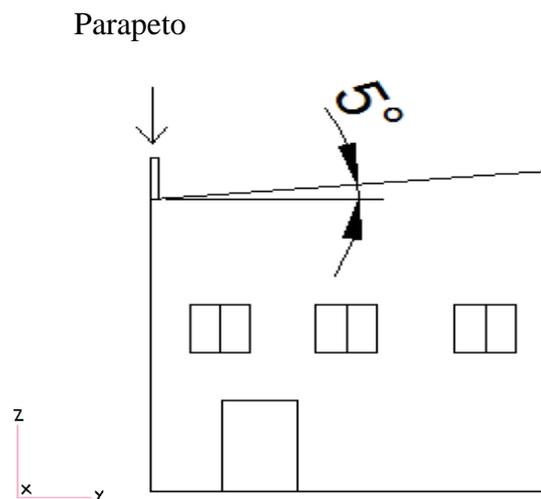


Figura 3: vista lateral de la nave industrial.

3.2.- CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

El módulo fotovoltaico empleado en la estructura sobre cubierta es el modelo *CGIS* de 85 Wp (85 W) y tiene las características indicadas en la figura siguiente:

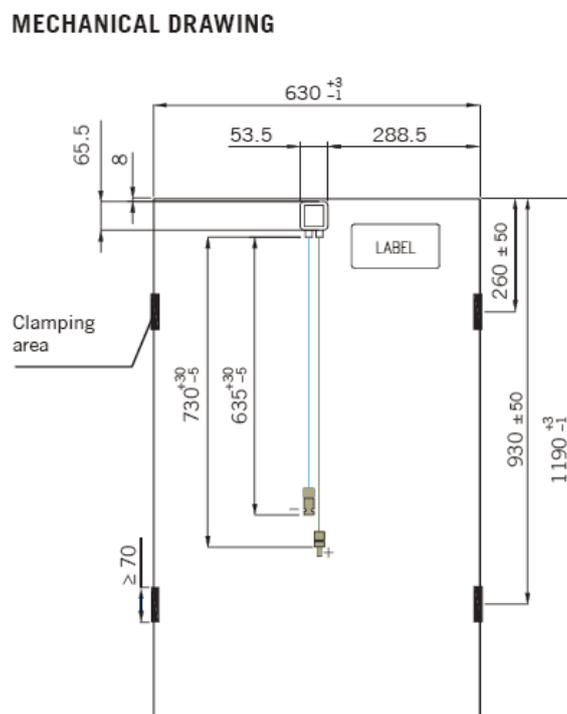


Figura 4: Dimensiones características del módulo fotovoltaico

Según la figura 4, vemos que la separación entre correas será de 630mm.

DATOS TÉCNICOS	
Potencia nominal Pmax	85 W
Tensión de la potencia nominal Vpmax	17,3 v
Tensión en circuito abierto Voc	21,8 v
Corriente de cortocircuito Isc	4,91 A
Corriente nominal de salida Ipmx	5,42 A
Eficiencia de las células	17%
Rango de temperatura	-40°C / + 80°C
Tolerancia	-0,05
Las células solares	monocristalino
By-Pass de diodo	12 A
Dimensiones	1196 x 545 x 35mm
Peso	8 kg
Garantía de rendimiento del fabricación	25 años al 80%

Tabla 1: propiedades de un módulo fotovoltaico

3.3.- DISTRIBUCIÓN DE LAS PINZAS

El módulo, según recomendaciones del fabricante, está diseñado para ser anclado a la estructura portante mediante cuatro pinzas, situadas en las posiciones indicadas en la figura. Serán estas pinzas las que transmitan las cargas de viento, nieve y peso propio de los módulos fotovoltaicos, a los carriles de aluminio.



Figura 5: Sujeción de módulos fotovoltaicos a los carriles de aluminio mediante pinzas

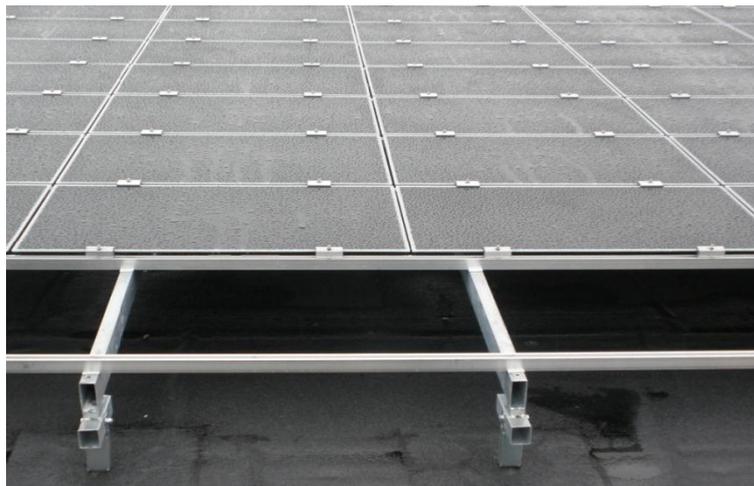


Figura 6: Disposición de pinzas de sujeción en un tramo de estructura

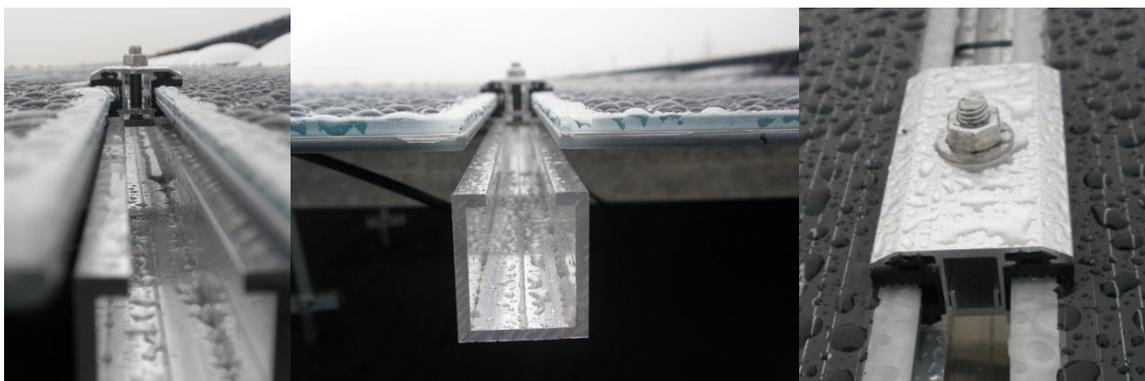


Figura 7: Pinzas dobles para carriles intermedios



Figura 8: Pinzas de sujeción para extremos de la estructura

3.4.- **DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA SOLAR**

Está colocado sobre una nave con una inclinación de la cubierta de 5° que se añaden a los 15° de inclinación de los módulos para una mejor orientación hacia el sol, esto se tendrá en cuenta al diseñarlo en AutoCAD.

3.4.1.- **VISTA EN PERFIL**

Hay que hacer un diseño como el de la figura 9:

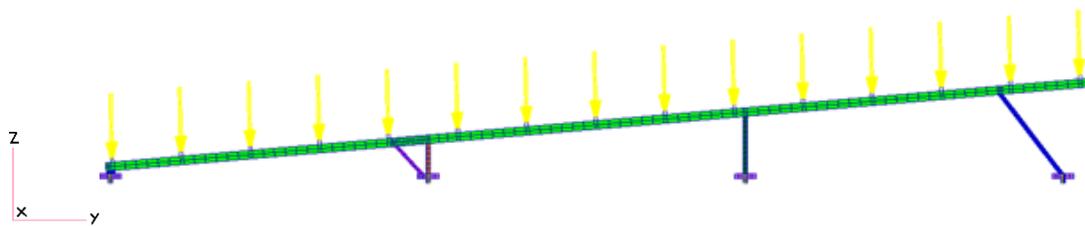


Figura 9: Vista en perfil de la aplicación de la carga sobre la estructura (aparecen con unas finalizaciones especiales las patas que no se utilizarán)

El ángulo de inclinación con respecto a la cubierta será de 15°. Como se ve en la figura 9, habrá 25 módulos solares en la dirección y:

$$[(630 \text{ mm} + 30 \text{ mm de margen}) \times 25] \times \cos 15^\circ = \underline{15937.7 \text{ mm}}$$

Existen cuatro patas como se ve en la imagen superior, colocadas en las posiciones: (0mm, 5000mm, 10000mm y 17000mm) respecto a la dirección y. Se colocan en esas posiciones ya que coinciden con las posiciones de las correas de la propia nave industrial (para poder anclarlas).

La primera pata se encuentra tiene una altura de 100mm. Las otras son verticales y hay que calcular la longitud, en función del ángulo de inclinación de la estructura. Las patas inclinadas se encuentran con un ángulo de inclinación de 45°.

3.4.2.- VISTA EN PLANTA

La estructura en planta tiene la siguiente forma:

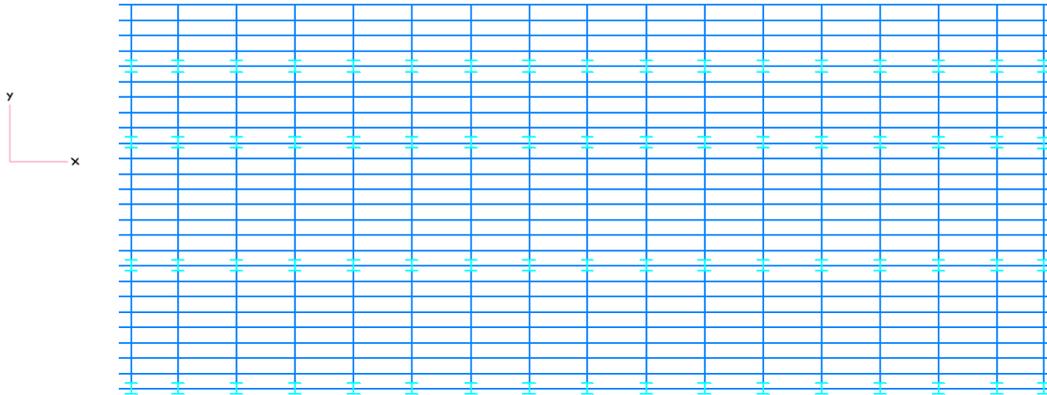


Figura 10: Vista en planta de la estructura

La distancia entre vigas de acero es de 2500 mm, salvo la del extremo que se encuentra a 500 del borde y 2000 de la siguiente. En total la estructura tiene en dirección x: $16 \text{ vanos} \times 2.5\text{m} = \underline{40 \text{ metros}}$

Como se ve en esta figura, habrá 32 módulos solares en la dirección x, coincidiendo con la distancia de las vigas en el eje x:

$32 \text{ módulos} \times [(1200 \text{ mm} + 50 \text{ mm de margen dirección x})] / 1000 \text{ m/mm} = \underline{40 \text{ metros}}$

3.5.- MATERIAL Y PERFILES UTILIZADOS

Se deben considerar los siguientes tipos:

- Patas verticales e inclinadas:

En acero S-235 y perfil IPN comercial (se puede considerar perfiles diferentes para cada pata en la dirección x, pero no en la dirección Y, ver anexo B).

- Perfiles longitudinales:

En acero S-235 y perfil IPN comercial, ver anexo B.

- Perfil de las correas:

Perfil en aluminio 6061 t4 realizado por extrusión con una forma similar a la que aparece en la figura 11, en forma de C, para poder atornillar un tornillo con una métrica de 24mm y una longitud que sea capaz de sujetar un espesor de módulo de 35mm (tabla1). Habrá que diseñar esta pieza, con unas dimensiones exteriores y espesor normalizado.

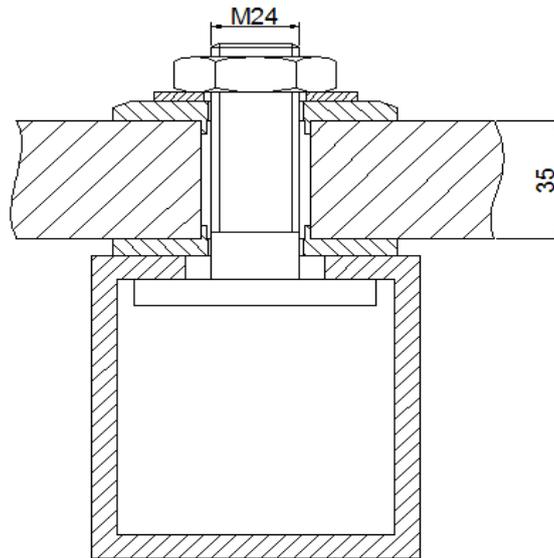


Figura 11: Unión atornillada entre módulos.

La cabeza del tornillo se optará por ser de forma cuadrada para que cumpla dos funciones: que su misma forma haga que le sea imposible girar debido al contacto con las paredes internas del perfil de aluminio, y el otro motivo, para que simplemente haga falta sujetar la cabeza mientras se enrosca la tuerca sin tener que girar la cabeza del tornillo con la herramienta. Esto es bastante útil debido a las zonas prácticamente inaccesibles con herramientas en la parte interna de la estructura y que con este método se ahorra tiempo y esfuerzo. CypeCad nos dará los perfiles IPN óptimos para según cada caso de cargas.

		Acero s235	Aluminio 6061 t4
E	Módulo elástico	210000 MPa	70000 MPa
ν	Coeficiente de Poison	0,3	0,33
ρ	Densidad	7,850 kg/m ³	2,700 g/cm ³
σ_f	Límite elástico	235 MPa	110 MPa
σ_r	Tensión de rotura	360 MPa	207 MPa

Tabla 2: propiedades mecánicas del acero y aluminio

3.6.- UNIONES

Los módulos fotovoltaicos estarán unidos con pinzas a las correas de aluminio mediante tornillos mecanizados. Estarán formados por una vara roscada soldada a una placa de acero de forma cuadrada para que no pueda girar dentro del perfil en C. Se obtendrán las dimensiones del tornillo cuando tengamos un perfil de correa óptimo, calculado por CYPEcad.

El resto de nudos de la estructura serán calculados a mano con los esfuerzos obtenidos del programa CYPEcad debidos a las cargas. La unión de las patas con la cubierta se discretizará por el método de los elementos finitos usando el programa MSC Patran.

Todos los aceros irán soldados entre si, salvo las correas que irán unidas a los aceros mediante tornillos. Las patas unidas a la cubierta se simularán como si estuvieran soldadas a una chapa, la cual estará atornillada a otra chapa.

3.7.- CARGAS

No se tendrá en cuenta la rigidez de la placa solar, pero si su peso. El resto de cargas se rigen por la normativa básica de edificación y por el código técnico de edificación (CTE) del anexo A.

Acciones permanentes

- Peso propio
- Pretensado
- Acciones del terreno

Acciones variables

- Sobrecarga de uso
- Acciones sobre barandillas y similares
- Viento
- Acciones térmicas
- Nieve

Acciones accidentales

- Sismo
- Incendio
- Impacto
- Otras

De estas cargas, solo se tendrán en cuenta las cargas de peso propio, viento, nieve y sobrecarga de uso.

3.8.- CRITERIOS DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA UTILIZADOS

Para los cálculos de capacidad portante, el criterio de diseño es el cálculo a resistencia del material (σ) que, en el caso propuesto se calculará según las siguientes ecuaciones:

Vigas:

$$\sigma_{\text{viga}} = \min (\sigma_e/1.05, \sigma_p/1.25)$$

Tornillos:

$$\sigma_{\text{tornillo}} \leq \sigma_e / 2$$

Donde σ_e es el límite elástico del material y σ_p el límite de rotura medios.

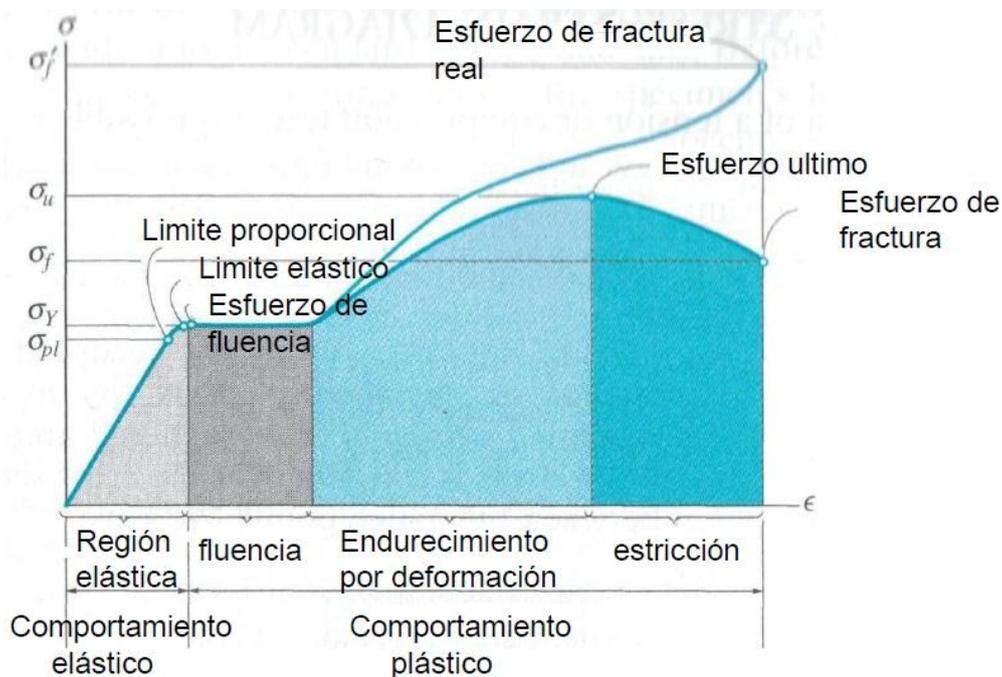


Tabla 12: gráfica tensión-deformación del acero

Para los cálculos de aptitud en servicio, el valor a analizar es la flecha relativa máxima debe ser inferior a 1/300.

4.- REALIZACIÓN DEL PROYECTO

4.1.- CREACIÓN DE VIGAS

Con las medidas tomadas de los datos iniciales se dibuja la estructura con la ayuda del programa AutoCAD. Sus herramientas nos permiten ahorrarnos mucho tiempo a la hora de dibujar y rectificar, con respecto a otros programas de diseño.

Se tendrá en cuenta el sistema de coordenadas para que al exportarlo a Cype se pueda trabajar con las coordenadas por defecto con comodidad.

Habrán tantas barras transversales (dirección x) como número de vanos tiene. Éstas corresponderán a las de acero. Sin olvidar de añadir los 5° de inclinación de la cubierta de la nave una vez se tenga la estructura acabada.

La estructura de acero quedará así:

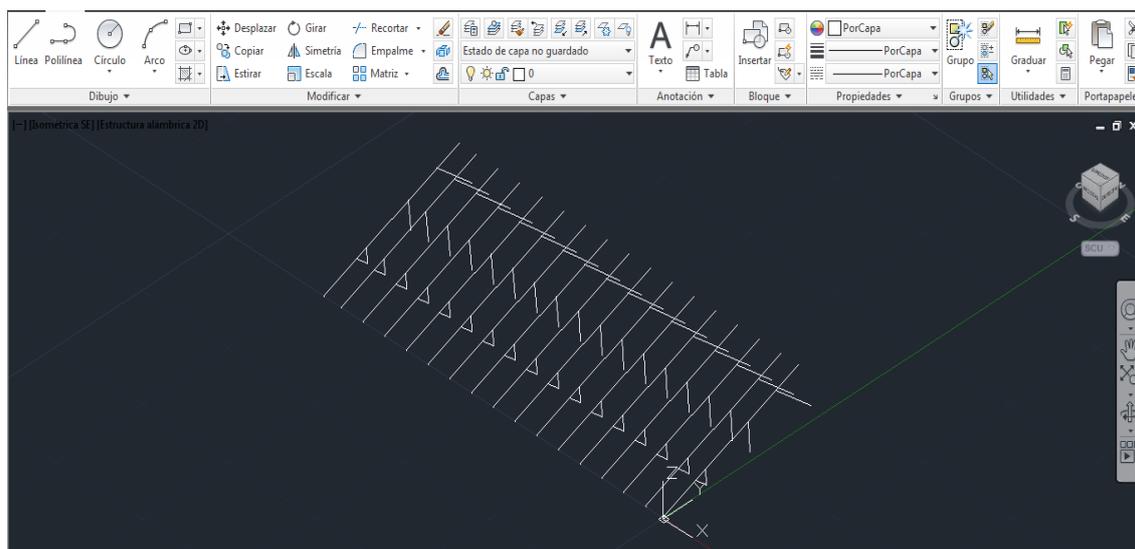


Figura 13: barras de acero en AutoCAD

Con el programa CypeCad se exporta el archivo. Hay que añadir las correas y colocar puntos entre cada intersección de las vigas transversales con las correas de aluminio para posteriormente tener los valores de los esfuerzos en cada una de las uniones.

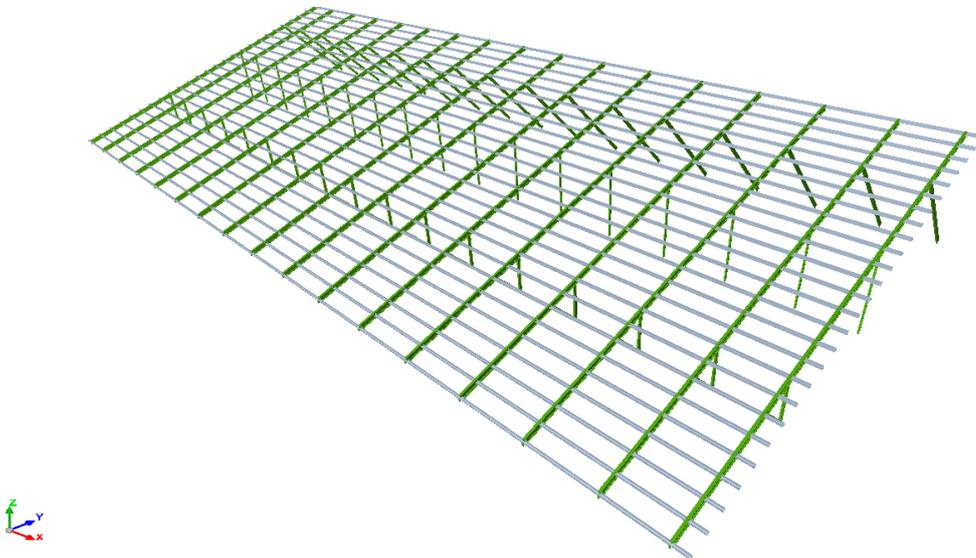


Figura 14: estructura completa en CypeCad

Por último, se agrupa las barras en: correas, 1º pata, 2º pata, 3º pata y 4º pata. A cada una se le asignará un perfil, las patas serán perfil IPN de acero laminado (da igual el escogido, el programa optimizará uno más adelante) y las correas un perfil en forma de C de aluminio extruido.

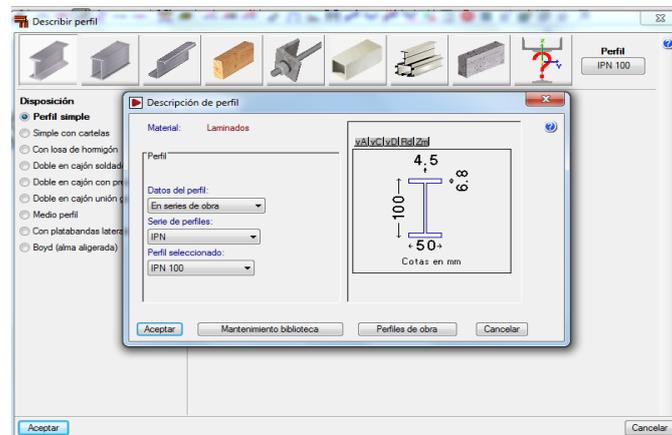


Figura 15: selección de perfil IPN

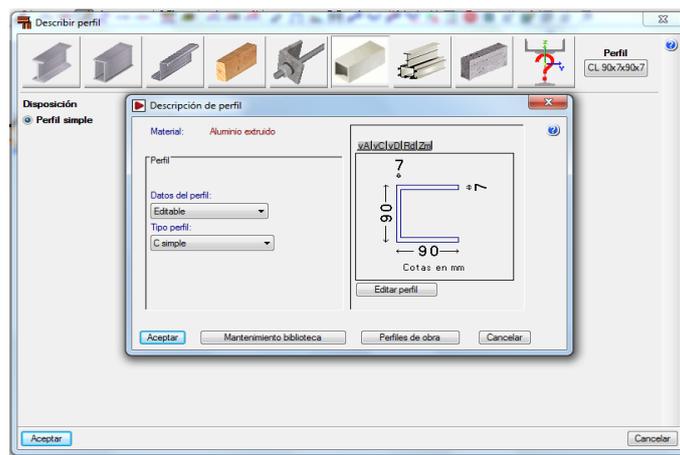


Figura 16: selección de perfil en C

Estos perfiles se pueden observar en la siguiente figura:

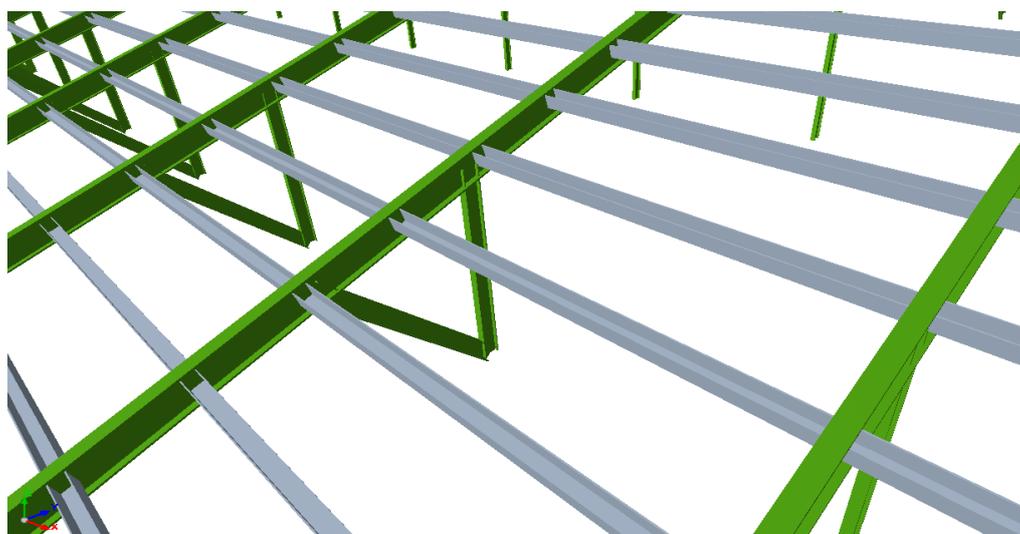


Figura 17: visualización de los perfiles en CypeCad

4.2.- CÁLCULO DE LAS CARGAS

4.2.1.- ANÁLISIS REALIZADO POR EL PROGRAMA

El programa considera un comportamiento elástico y lineal de los materiales. Las barras definidas son elementos lineales. Las cargas aplicadas en las barras se pueden establecer en cualquier dirección. El programa admite las tipologías: uniforme, triangular, trapezoidal, puntual, momento e incremento de temperatura diferente en caras opuestas.

En los nudos se pueden colocar cargas puntuales, también en cualquier dirección. El tipo de nudo que se emplea es totalmente genérico, y se admite que la vinculación interior sea empotrada o articulada; y los extremos de las barras definidos mediante coeficientes de empotramiento (entre 0 y 1) o mediante su rigidez rotacional (momento/giro), y también se pueden articular dichos extremos.

Se puede utilizar cualquier tipo de apoyo, empotrado o articulado, o vinculando alguno de sus grados de libertad. Los apoyos (o vinculación exterior) pueden ser elásticos, definiendo las constantes correspondientes a cada grado de libertad coaccionado.

Las hipótesis de carga se establecen según su origen y se pueden asignar a **Carga permanente, Sobrecarga, Viento, Sismo (estático), Nieve y Accidental**. Se puede considerar el sismo dinámico. A partir de las hipótesis básicas se puede definir y calcular cualquier tipo de combinación con diferentes coeficientes de combinación, ya sea de acuerdo a la norma seleccionada o definidos por el usuario.

Los estados límite y combinaciones para cada material y estado son los siguientes:

- E.L.U. rotura. Hormigón
- E.L.U. rotura. Hormigón en cimentaciones
- E.L.U. rotura. Acero (Laminado y armado)
- E.L.U. rotura. Acero (Conformado)
- E.L.U. rotura. Madera
- E.L.U. rotura. Aluminio
- Tensiones sobre el Terreno (Acciones características)
- Desplazamientos (Acciones características)

Para cada estado se generan todas las combinaciones, indicando su nombre y coeficientes, según la norma de aplicación, el material y la categoría de uso. A partir de la geometría y cargas que se introduzcan, se obtiene la matriz de rigidez de la estructura, así como las matrices de cargas por hipótesis simples. Se obtendrá la matriz de desplazamientos de los nudos de la estructura, invirtiendo la matriz de rigidez por métodos frontales.

Después de hallar los desplazamientos por hipótesis, se calculan todas las combinaciones para todos los estados, y los esfuerzos en cualquier sección a partir de los esfuerzos en los extremos de las barras y las cargas aplicadas en las mismas.

De la normativa del Código Técnico de Edificación (CTE) descrita en el anexo A, se obtendrán las cargas para que a partir de ellas se diseñe la estructura. Para ello se busca un lugar con un clima desfavorable por su viento y nieve, así que se tomará como lugar la ciudad de Huesca.

4.2.2.- CARGAS DE PESO PROPIO

Siempre habrá una carga constante, que será la del peso de los módulos fotovoltaicos. En las propiedades del módulo (tabla 1) lo sacamos y será igual a 8kg.

Esta carga estará distribuida linealmente de modo que será:

$$q_{p(\text{int})} = [(8 \text{ kg}) \times (32 \text{ paneles dirección } x)] / 40 \text{ m} = \underline{0.0064 \text{ t/m}}$$

Teniendo en cuenta que la primera y última correa soportan la mitad de peso:

$$q_{p(\text{ext})} = 0.0064 \text{ t/m} / 2 = \underline{0.0032 \text{ t/m}}$$

4.2.3.- CARGAS DE VIENTO

Según la figura 8:

$$q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2 \text{ (Zona C)}$$

Coefficiente de exposición:

$$c_e = 2$$

Se toma el coeficiente eólico o de presión (c_p) de la Tabla 2, sabiendo que el ángulo de inclinación es de 20° con respecto la cubierta. Éste tendrá tres valores para cada zona (ver Anexo A):

$$\varphi = 0 \text{ (dirección hacia arriba): } (-2.2, -2.8, -2.9)$$

$$\varphi = 1 \text{ (dirección hacia abajo): } (1.7, 2.9, 2.1)$$

Las c_p de los paréntesis equivalen a las zonas A, B, C respectivamente. Las fuerzas tangenciales serán tan pequeñas que se pueden despreciar.

Con la ecuación 1 se calculan las cargas de viento:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (\text{ec.1})$$

Zona A:

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (-2.2) = 2.28 \text{ kN/m}^2 \quad \uparrow \uparrow$$

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (1.7) = 1.768 \text{ kN/m}^2 \quad \downarrow \downarrow$$

Zona B:

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (-2.8) = 2.912 \text{ kN/m}^2 \quad \uparrow \uparrow$$

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (2.9) = 3.016 \text{ kN/m}^2 \quad \downarrow \downarrow$$

Zona C:

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (-2.9) = 3.016 \text{ kN/m}^2 \quad \uparrow \uparrow$$

$$q_e = 0.52 \times 2 \times (2.1) = 2.184 \text{ kN/m}^2 \quad \downarrow \downarrow$$

La primera y la última correa de aluminio solo soportarán la mitad de la carga:

Zona A:

$$q_e = 2.28 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.51 \text{ kN/m} = \underline{0.151 \text{ t/m}} \quad \uparrow \uparrow$$

$$q_e = 1.768 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.167 \text{ kN/m} = \underline{0.167 \text{ t/m}} \quad \downarrow \downarrow$$

Zona B:

$$\uparrow \uparrow \left\{ \begin{array}{l} q_e = 2.912 \text{ kN/m}^2 \times 0.33 \text{ m} = 0.96 \text{ kN/m} = \underline{0.096 \text{ t/m}} \\ q_e = 2.912 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.92 \text{ kN/m} = \underline{0.192 \text{ t/m}} \end{array} \right.$$

$$\downarrow \downarrow \left\{ \begin{array}{l} q_e = 3.016 \text{ kN/m}^2 \times 0.33 \text{ m} = 0.995 \text{ kN/m} = \underline{0.0995 \text{ t/m}} \\ q_e = 3.016 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.99 \text{ kN/m} = \underline{0.199 \text{ t/m}} \end{array} \right.$$

Zona C:

$$q_e = 3.016 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.99 \text{ kN/m} = \underline{0.199 \text{ t/m}} \quad \uparrow \uparrow$$

$$q_e = 2.184 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 1.44 \text{ kN/m} = \underline{0.144 \text{ t/m}} \quad \downarrow \downarrow$$

4.2.4.- CARGAS DE NIEVE

Coeficiente de forma de la cubierta: $\mu = 1$

Valor característico de la carga de nieve sobre un terreno:

$$s_k = 0.8 \text{ kN/m}^2 \text{ (zona 2)}$$

Con la ecuación 5 será calculada la carga de nieve:

$$q_n = \mu \cdot s_k \quad (\text{ec.5})$$

$$q_n = 1 \times 0.8 = 0.8 \text{ kN/m}^2$$

La construcción está protegida de la acción de viento mediante un parapeto, por lo que la carga de nieve será reducida un 20 %

$$q_n = 0.8 \text{ kN/m}^2 \times 0.8 = 0.64 \text{ kN/m}^2$$

Las correas de la primera y última fila soportarán la mitad del peso del vano, a diferencia de las correas interiores que soportarán el doble de carga:

$$\text{- Correas exteriores: } q_n = 0.64 \text{ kN/m}^2 \times 0.33 \text{ m} = 0.211 \text{ kN/m} = \underline{0.0211 \text{ t/m}}$$

$$\text{- Correas interiores: } q_n = 0.64 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 0.422 \text{ kN/m} = \underline{0.0422 \text{ t/m}}$$

A partir de alturas de 1000 m se aplica la carga producida por témpanos. Estas cargas se situarán en la primera correa debido a que la estructura está en pendiente y las gotas se congelan al acumularse lo más abajo posible por la fuerza de gravedad. Aplicando la ecuación 6:

$$p_n = k \cdot \mu^2 \cdot s_k \quad (\text{ec.6})$$

$$p_n = 3 \text{ m} \times 1^2 \times 0.8 \text{ kN/m}^2 = 2.4 \text{ kN/m} = \underline{0.24 \text{ t/m}}$$

4.2.5.- SOBRECARGA DE USO

La estructura solar se considera como una cubierta accesible solo para conservación con una inclinación inferior a 20° por lo tanto:

- Carga uniforme de 1 kN/m² (categoría de uso G1).

Se distinguirá según sean correas interiores o exteriores:

$$\text{- Exteriores: } 1 \text{ kN/m}^2 \times 0.33 \text{ m} = 0.33 \text{ kN/m} = \underline{0.033 \text{ t/m}}$$

$$\text{- Interiores: } 1 \text{ kN/m}^2 \times 0.66 \text{ m} = 0.66 \text{ kN/m} = \underline{0.066 \text{ t/m}}$$

4.3.- OBTENCIÓN DE LAS UNIONES MÁS DESFAVORABLES

Una vez que está la estructura dibujada en CypeCad y calculadas todas las cargas, mediante el programa se introducirán sobre las correas. Teniendo en cuenta que el viento dispone de dos casos distintos de carga: desfavorable hacia arriba y desfavorable hacia abajo, se obtiene la siguiente imagen:

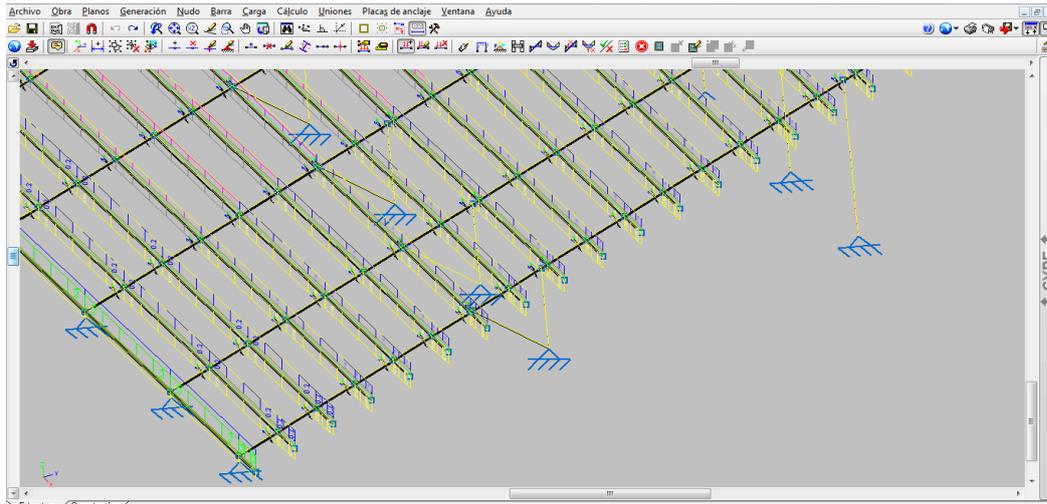


Figura 18: estructura con todas las cargas sobre las correas

Se introducirán unos perfiles cualesquiera y el programa realizará los cálculos. La comprobación de si los perfiles son los adecuados será correcta si aparecen en color verde.

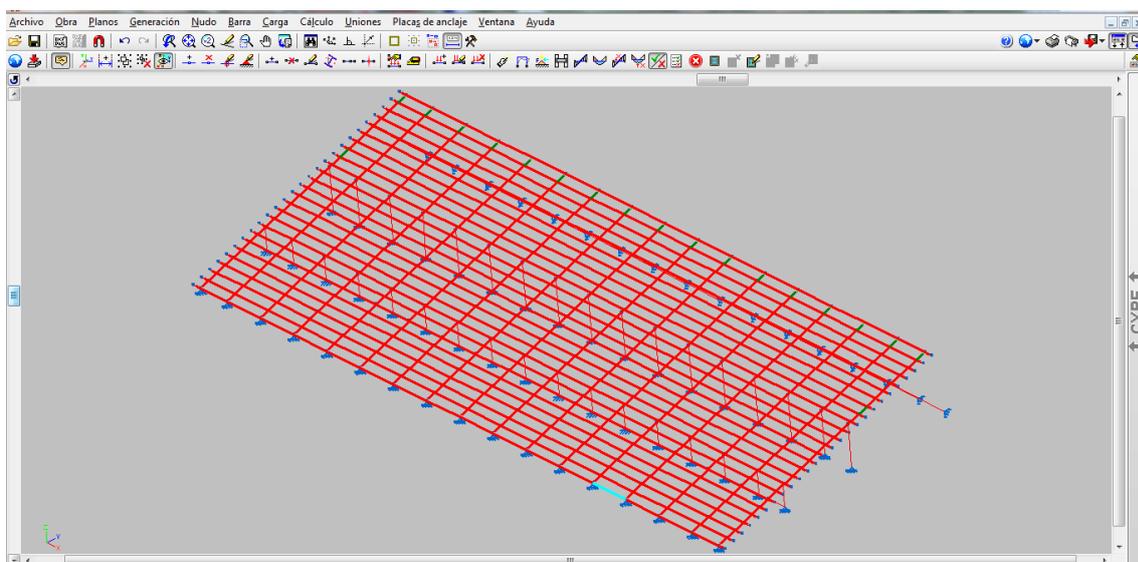


Figura 19: comprobación de perfiles incorrecta

A continuación, el programa calculará barra por barra toda la estructura e indicará los esfuerzos a que está sometido cada una:

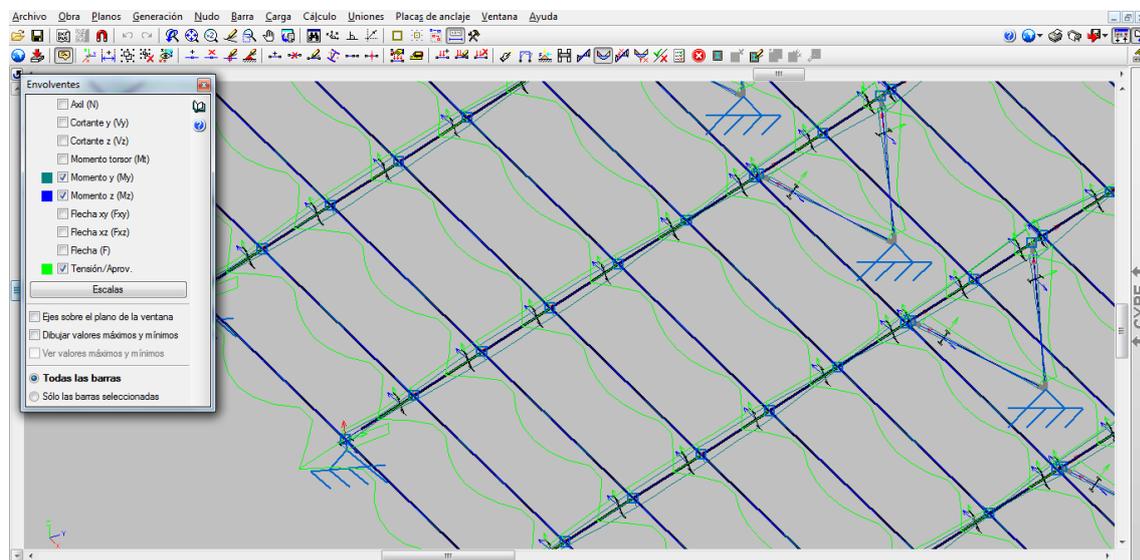


Figura 20: esfuerzos producidos por las cargas

Y las deformaciones:

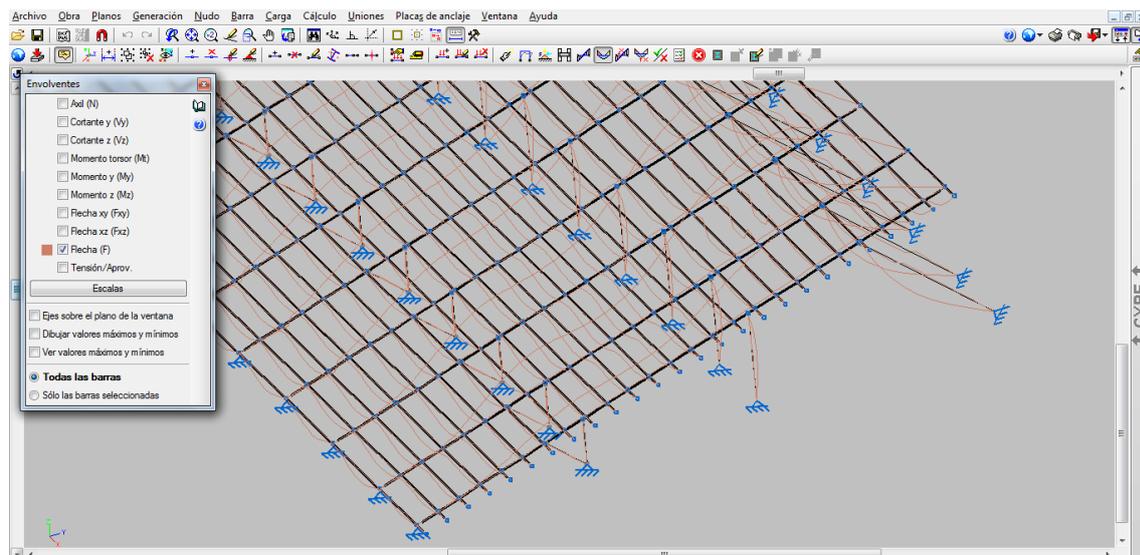


Figura 21: deformaciones de la estructura

También optimizará todos los perfiles IPN dando como resultado:

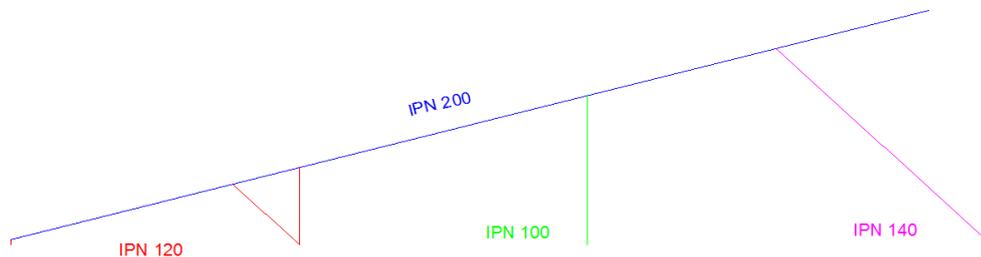
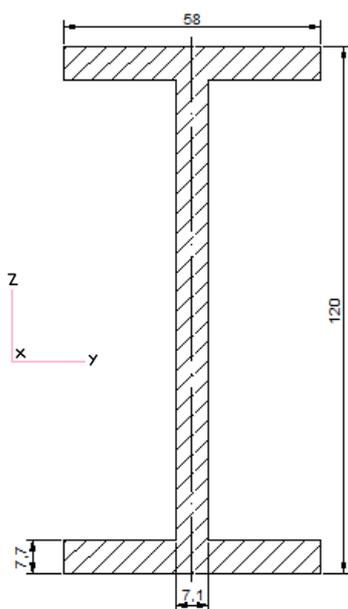
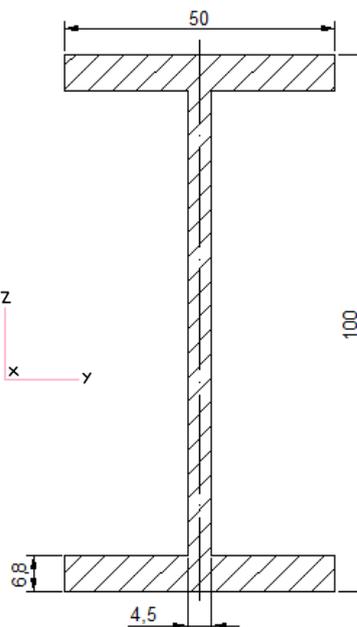


Figura 22: perfiles optimizados

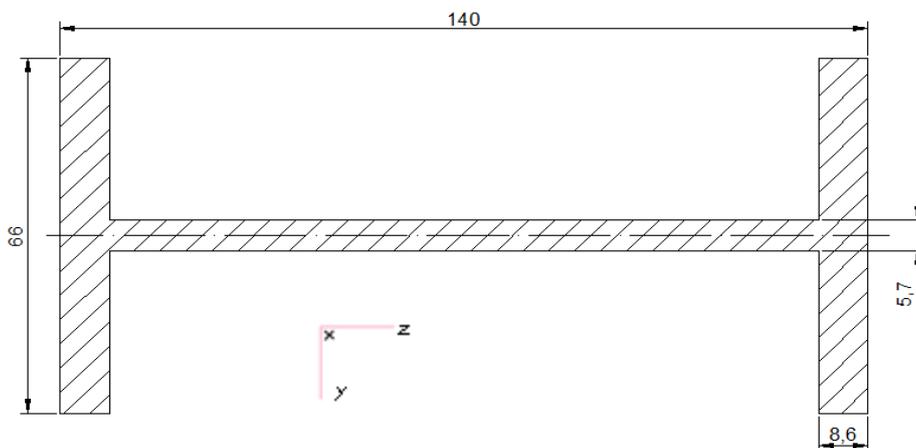
Pata 1, pata2 (45° y 90°): IPN 120



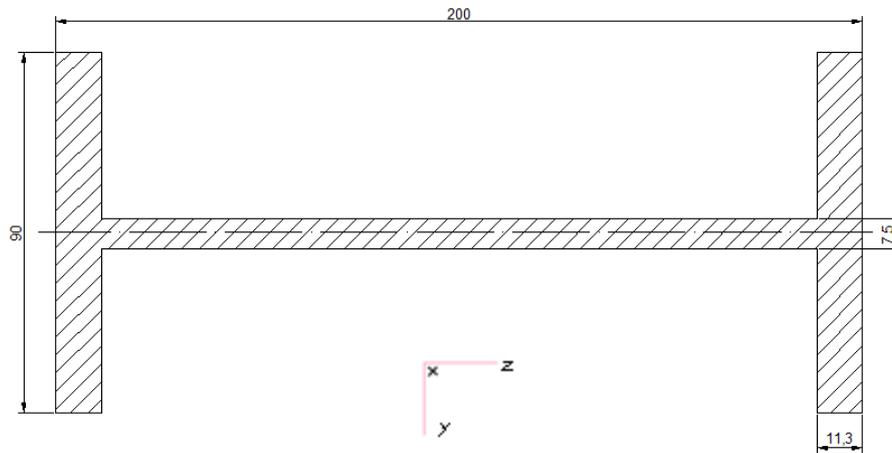
Pata 3: IPN 100



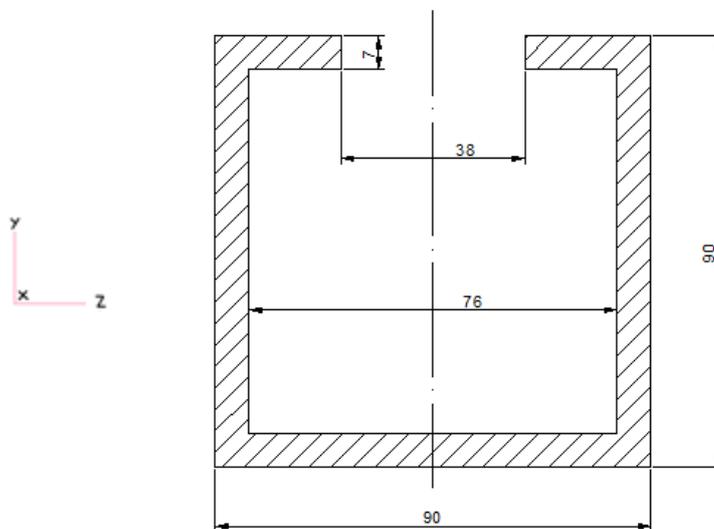
Pata 4: IPN 140



Perfil de acero longitudinal: IPN 200



El perfil de aluminio quedará así:



Se comprobará que los perfiles son correctos si están pintados en verde:

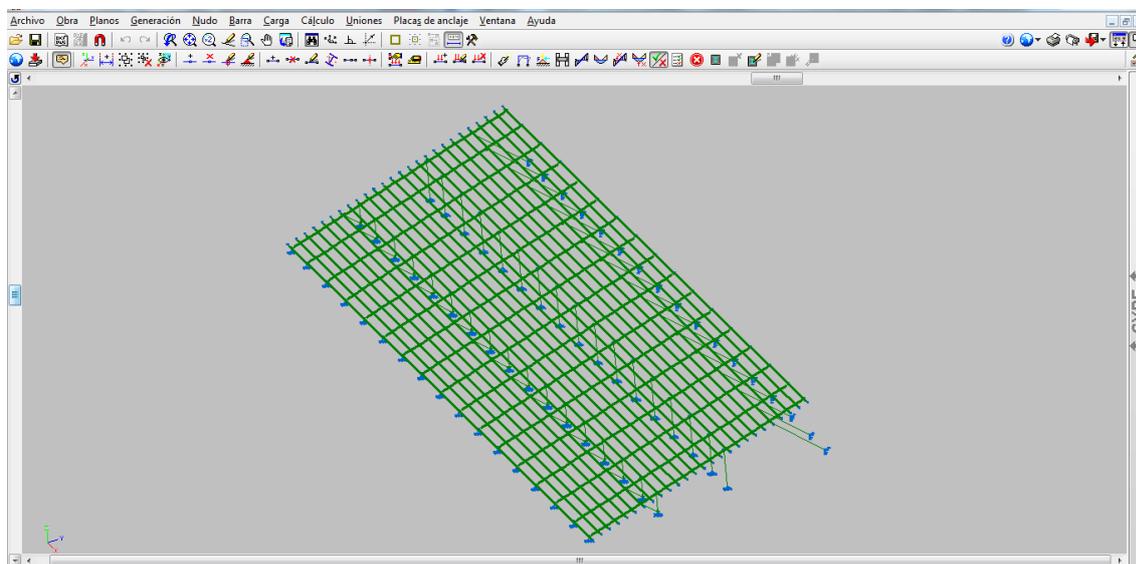


Figura 23: comprobación de perfiles correcta

4.3.1.- UNIÓN MÁS DESFAVORABLE A TORNILLO

No se dispone de ninguna opción que indique la unión sometida a mayor esfuerzo, y los ejes locales de las correas estarán colocados de esta manera:

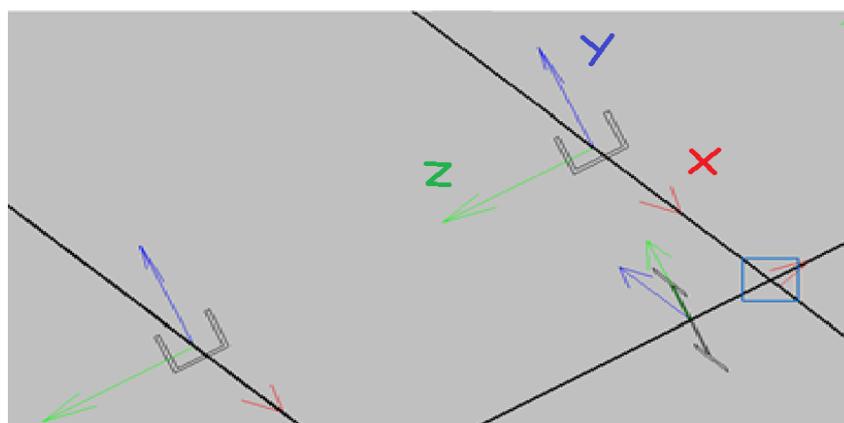


Figura 24: ejes locales de las correas

Por lo tanto, habrá que analizar el M_z de todos los nudos entre las correas y las vigas de acero transversales debido a que la colocación de las cargas hace que sea el momento más desfavorable.

Como resultado se obtiene que la unión más desfavorable se encuentra en la primera correa junto con la tercera viga de acero desde el exterior. Realmente hay dos puntos con el mismo valor en toda la estructura debido a que ésta es simétrica y sus cargas también.

Se hace el sumatorio de momentos que hay a cada lado de la unión, dando como resultado:

$$M_z = (-0.254 \text{ tm}) + (-0.233 \text{ tm}) = \underline{-0.487 \text{ tm}}$$

Se hará lo mismo mirando el cortante:

$$V_z = (-0.21 \text{ t}) + (0.207 \text{ t}) = \underline{-0.003 \text{ t}}$$

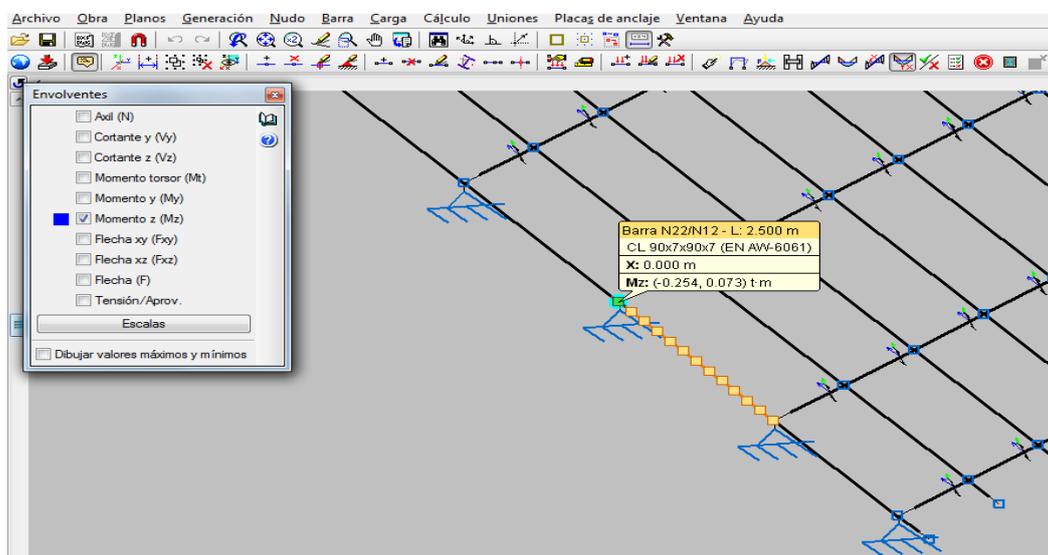


Figura 25: punto más desfavorable a tornillo

4.3.2.- UNIÓN MÁS DESFAVORABLE A SOLDADURA

En este caso, al igual que con los tornillos, se analizará nudo por nudo la unión más desfavorable a partir de un momento, en este caso será el M_y debido a que sus coordenadas locales serán así:

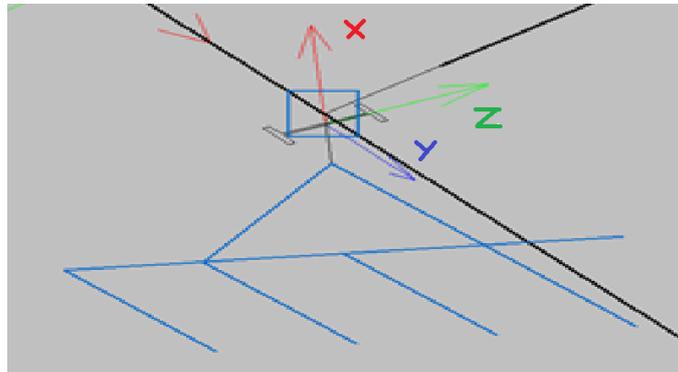


Figura 26: ejes locales de las patas

Aunque también exista momento en el eje z, como en la mayoría de los casos es cero o casi cero, no hace falta incluirlo.

Como resultado, se sabrá que la unión soldada más desfavorable estará situada dentro del grupo de la primera fila de patas, la segunda contando desde el extremo. Y como con los tornillos, existirá otra soldadura de igual valor situada en el lado opuesto simétrico.

El mayor momento será: $M_y = 0.722 \text{ tm}$

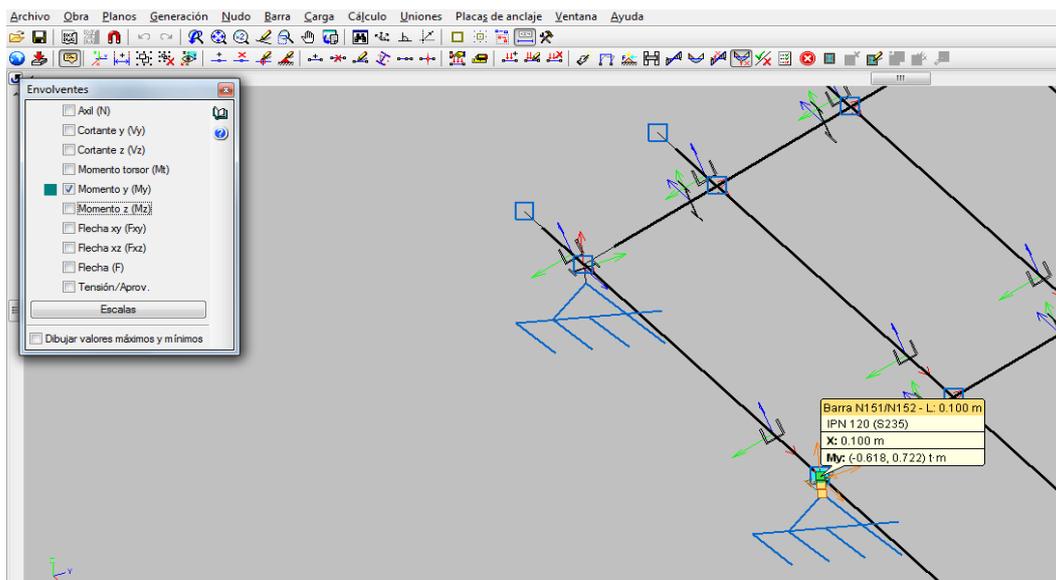


Figura 27: punto más desfavorable a soldadura

Más adelante se calculará el espesor de soldadura necesario para cada una de las patas en contacto con esta barra transversal de acero, ya que se considerará como el caso más desfavorable. Como cada fila de patas tiene el mismo perfil, solo será necesario calcular un espesor para grupo.

Los momentos a usar serán:

pata 1: $M_y = 0.722 \text{ tm}$

pata 2 (inclinada 45°): $M_y = 0.286 \text{ tm}$

pata 2 (vertical a 90°): $M_y = 0.413 \text{ tm}$

pata 3: $M_y = 0.135 \text{ tm}$

pata 4: $M_y = 0.545 \text{ tm}$



Figura 28: distribución de las patas

4.4.- DISEÑO DE LAS UNIONES

En primer lugar, los tornillos mecanizados que unen los paneles a las correas se obtienen a partir de las medidas del perfil de la correa de aluminio. Se tendrá en cuenta el espacio que ocuparía la herramienta al colocar el tornillo (unos 3 mm a cada lado) y una holgura (unos 2 mm a cada lado).

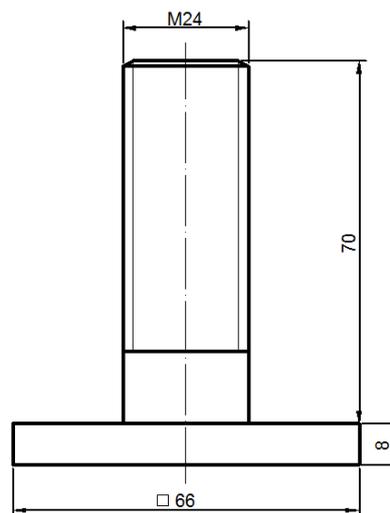


Figura 29: tornillo mecanizado

Tendrá una calidad de 6.8, así que su σ_e será de 480 MPa y su $\sigma_{plástica}$ de 600MPa.

A continuación, se realizarán los cálculos de los nudos entre las vigas de la estructura.

4.4.1.- TORNILLOS

Los datos son:

$$C_s = 2$$

$$\sigma_{eq} = 640 \text{ MPa}$$

Coefficiente de reparto $C = 0.2$

Precarga inicial $F_i = 0$

Se sabe que el momento máximo es $|M_z| = 0.487 \text{ tm} = 4870000 \text{ Nmm}$

Viendo las reacciones en la unión, se despeja F_t , donde L es la anchura de la viga de acero longitudinal sobre la que está apoyada la correa de aluminio:

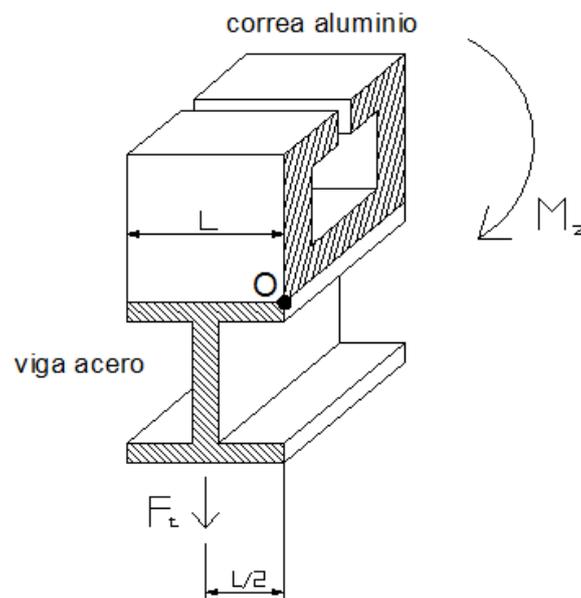


Figura 30: esquema de una unión correa-viga

$$M_z = F_t \times (L/2)$$

$$F_t = 2M_z / L = (4870000 \times 2) / 90 = 108222 \text{ N}$$

$$\sigma = F_t / A_r = [F_i + (C \times F_t)] / A_r = (0.2 \times 108222) / A_r = 21644 / A_r$$

Sabiendo que el cortante es $|V_z| = 0.003 t = 30 \text{ N}$, la tensión tangencial será:

$$\tau = V_z / A_r = 30 / A_r$$

Aplicando un coeficiente de seguridad 2:

$$C_s = (0.5 \times \sigma_{eq}) / \tau_{\max}$$

$$\tau_{\max} = (0.5 \times 640) / 2 = 160 \text{ MPa}$$

Sustituyendo las tensiones en la fórmula:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = \sqrt{\left(\frac{21644}{2 A_r}\right)^2 + \left(\frac{30}{A_r}\right)^2} = 160^2$$

Despejando el valor de A_r :

$$A_r = 135.2 \text{ mm}^2$$

Será menor o igual a la fórmula de la sección de los tornillos debido a que es inversamente proporcional a la tensión:

$$A_r \leq \pi (d - 0.9381p)^2 / 4$$

Dando como resultado:

Para un paso de 2 se obtiene un diámetro de rosca de 14 mm (ver anexo E).

4.4.2.- CORDONES DE SOLDADURA

Los cordones de soldadura están situados en las uniones de las patas con las vigas transversales de acero. Como estas uniones se encuentran inclinadas, se deberá primero de analizar la sección en contacto resultante de cada pata. Debido a esto, los cordones de soldadura podrán ser menos gruesos en las mismas zonas ya que el área de la sección será mayor.

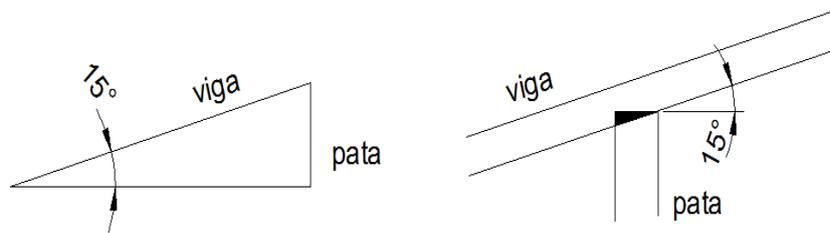


Figura 31: vista de perfil de la unión viga con pata a 90°

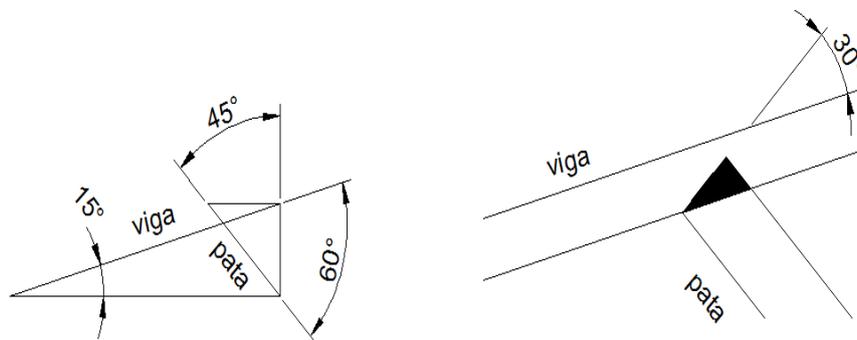


Figura 32: vista de perfil de la unión viga con pata a 45°

Pata 1 y Pata 2 vertical (IPN 120):

El ángulo de corte será de 15° , por lo tanto su sección será:

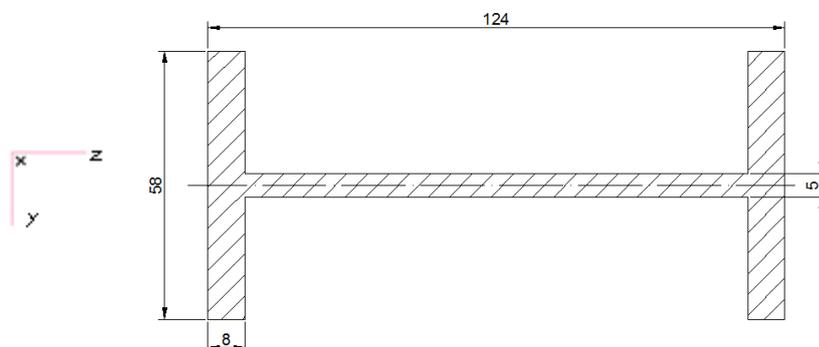


Figura 33: sección en la unión soldada de patas 1 y 2(90°)

Pata 2 inclinada (IPN 120):

El ángulo de corte será de 30° , por lo tanto su sección será:

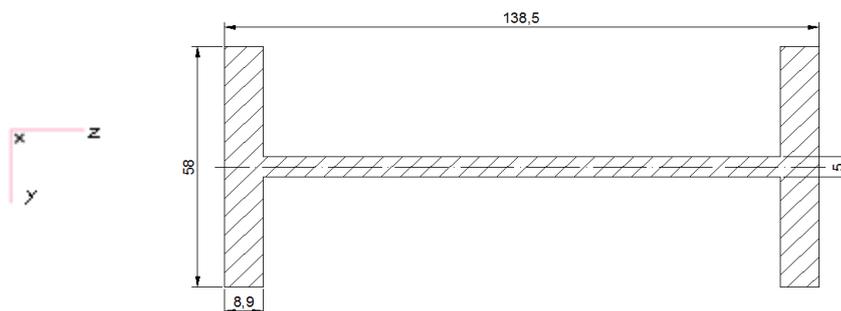


Figura 34: sección en la unión soldada de la pata 2(45°)

Pata 3 (IPN 100):

El ángulo de corte será de 15° , por lo tanto su sección será:

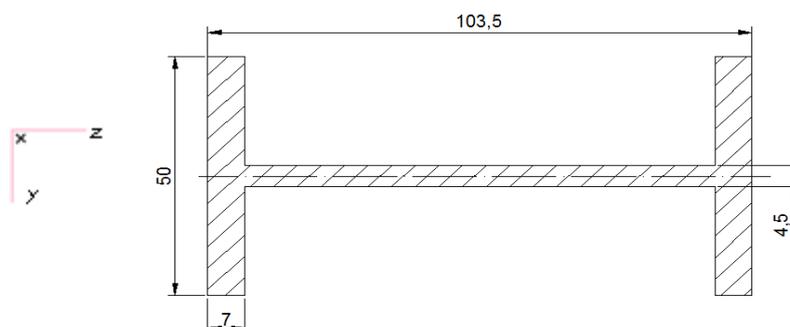


Figura. 35: sección en la unión soldada de la pata 3

Pata 4 (IPN 140):

El ángulo de corte será de 30° , por lo tanto su sección será:

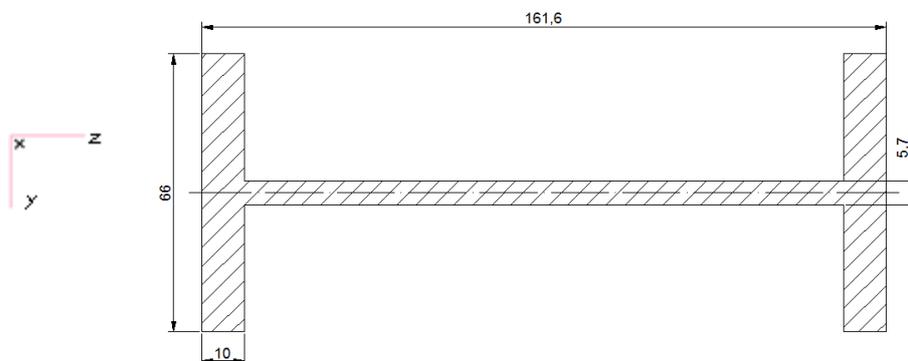


Figura 36: sección en la unión soldada de la pata 4

Una vez que se dispone de las medidas reales que hay en la unión pata-viga, para obtener los espesores necesarios de soldadura se parte de un espesor hipotético de soldadura y se intenta colocar el menor número de cordones de soldadura posible en la estructura. De esta manera se ahorrará material y se reducirá su coste cumpliendo a la vez los parámetros de seguridad (ver anexo D).

Pata 1

$$N = 4.8t = 47040 \text{ N}$$

$$M_y = 0.722 \text{ tm} = 7075600 \text{ Nmm}$$

$$V_z = 7.22 \text{ t} = 70785 \text{ N}$$

La soldadura estará distribuida de la siguiente manera:

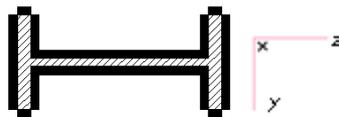


Figura 37: soldadura en pata 1

Para un espesor de 7mm:

$$A = (2 \times 58 \times 7) + (2 \times 7 \times 108) + (19.5 \times 7 \times 4) + (8 \times 7 \times 4) = 2821 \text{ mm}^2$$

$$t_1 = V_z / A = 70785 / 2821 = 25 \text{ MPa}$$

$$I_y = 2[(7 \times 108^3 / 12) + (58 \times 7^3 / 12) + (7 \times 58 \times 65^2)] + 2[(19.5 \times 7^3 / 12) + (2 \times 19.5 \times 7 \times 50.5^2)] + 2[(7 \times 8^3 / 12) + (2 \times 8 \times 7 \times 58^2)] = 7053074.6 \text{ mm}^4$$

Sabiendo que la altura máxima es de 69 mm:

$$W_y = I_y / 69 = 102218 \text{ mm}^3$$

$$n_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = (47040 / 2821) + (7075600 / 102218) = 85.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{t_1 + n}{\sqrt{2}} = (22.8 + 85.9) / \sqrt{2} = 76.8 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{t_1 - n}{\sqrt{2}} = (22.8 - 85.9) / \sqrt{2} = -44.6 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0 \text{ (la soldadura más alejada solo tiene dirección } t_1)$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = 108.7 \text{ MPa}$$

$$C_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} ; \sigma_{eq} = 235 / 2 = 117.5 \text{ MPa}$$

Comprobación: $117.5 \geq 108.7 \rightarrow$ Sí

Pata 2 (45°)

$$N = 2.56 \text{ t} = 25088 \text{ N}$$

$$M_y = 0.286 \text{ tm} = 2802800 \text{ Nmm}$$

$$V_z = 0.342 \text{ t} = 3351.6 \text{ N}$$

La soldadura estará distribuida de la siguiente manera:

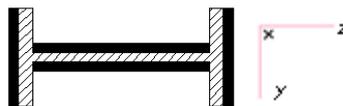


Figura. 38: soldadura en pata 2(45°)

Para un espesor de 5mm:

$$A = (2 \times 5 \times 120.7) + (2 \times 5 \times 58) = 1787 \text{ mm}^2$$

$$t_1 = V_z / A = 3351.6 / 1787 = 1.87 \text{ MPa}$$

$$I_y = 2[(5 \times 120.7^3 / 12) + (58 \times 5^3 / 12) + (5 \times 58 \times 71.75^2)] = 445243 \text{ mm}^4$$

Sabiendo que la altura máxima es de 74.25 mm:

$$W_y = I_y / 74.25 = 59965.4 \text{ mm}^3$$

$$n_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{Wz} = (25088 / 1787) + (2802800 / 59965.4) = 60.78 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{t_1 + n}{\sqrt{2}} = (1.87 + 60.78) / \sqrt{2} = 44.29 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{t_1 - n}{\sqrt{2}} = (1.87 - 60.78) / \sqrt{2} = -41.65 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0 \text{ (la soldadura más alejada solo tiene dirección } t_1)$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = 84.65 \text{ MPa}$$

$$C_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} ; \sigma_{eq} = 235 / 2 = 117.5 \text{ MPa}$$

Comprobación: $117.5 \geq 84.65 \rightarrow$ Sí

Pata 2 (90°)

$$N = 4.45t = 43649 \text{ N}$$

$$M_y = 0.413 \text{ tm} = 4047400 \text{ Nmm}$$

$$V_z = 0.464 \text{ t} = 4547.2 \text{ N}$$

La soldadura estará distribuida de la siguiente manera:

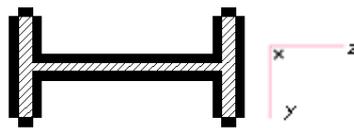


Figura 39: soldadura en pata 2(90°)

Para un espesor de 7mm:

$$A = (2 \times 58 \times 7) + (2 \times 7 \times 108) + (19.5 \times 7 \times 4) + (8 \times 7 \times 4) = 2821 \text{ mm}^2$$

$$t_1 = V_z / A = 4547.2 / 2821 = 1.47 \text{ MPa}$$

$$I_y = 2[(7 \times 108^3 / 12) + (58 \times 7^3 / 12) + (7 \times 58 \times 65^2) + 2(19.5 \times 7^3 / 12) + (2 \times 19.5 \times 7 \times 50.5^2) + 2(7 \times 8^3 / 12) + (2 \times 8 \times 7 \times 58^2)] = 7053074.6 \text{ mm}^4$$

Sabiendo que la altura máxima es de 69 mm:

$$W_y = I_y / 69 = 102218 \text{ mm}^3$$

$$n_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = (43649 / 2821) + (4047400 / 102218) = 55.07 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{t_1 + n}{\sqrt{2}} = (1.47 + 55.07) / \sqrt{2} = 40 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{t_1 - n}{\sqrt{2}} = (1.47 - 55.07) / \sqrt{2} = -38 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0 \text{ (la soldadura más alejada solo tiene dirección } t_1)$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = 76.87 \text{ MPa}$$

$$C_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}}; \sigma_{eq} = 235 / 2 = 117.5 \text{ MPa}$$

Comprobación: $117.5 \geq 76.87 \rightarrow$ Sí

Pata 3

$$N = 4.002t = 39219.6 \text{ N}$$

$$M_y = 0.135 \text{ tm} = 1323000 \text{ Nmm}$$

$$V_z = 0.052 \text{ t} = 509.6 \text{ N}$$

La soldadura estará distribuida de la siguiente manera:

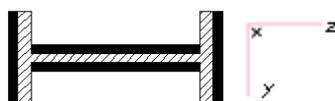


Figura 40: soldadura en pata 3

Para un espesor de 7mm:

$$A = (2 \times 50 \times 7) + (2 \times 7 \times 89.5) = 1953 \text{ mm}^2$$

$$t_1 = V_z / A = 509.6 / 1953 = 0.26 \text{ MPa}$$

$$I_y = 2[(50 \times 7^3 / 12) + (50 \times 7 \times 55.25^2) + (7 \times 89.5^3 / 12)] = 1488027.6 \text{ mm}^4$$

Sabiendo que la altura máxima es de 58.75 mm:

$$W_y = I_y / 58.75 = 25328 \text{ mm}^3$$

$$n_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{Wz} = (39219.6 / 1953) + (1323000 / 25328) = 72.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{t_1 + n}{\sqrt{2}} = (0.26 + 72.2) / \sqrt{2} = 51.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{t_1 - n}{\sqrt{2}} = (0.26 - 72.2) / \sqrt{2} = -50.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0 \text{ (la soldadura más alejada solo tiene dirección } t_1)$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = 101.96 \text{ MPa}$$

$$C_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}}; \sigma_{eq} = 235 / 2 = 117.5 \text{ MPa}$$

Comprobación: $117.5 \geq 101.96 \rightarrow$ Sí

Pata 4

$$N = 6.439t = 63102.2 \text{ N}$$

$$M_y = 0.545 \text{ tm} = 5341000 \text{ Nmm}$$

$$V_z = 0.128 \text{ t} = 1254.4 \text{ N}$$

La soldadura estará distribuida de la siguiente manera:

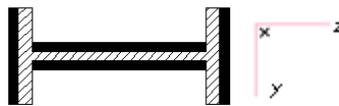


Figura 41: soldadura en pata 4

Para un espesor de 7mm:

$$A = (2 \times 7 \times 141.6) + (2 \times 7 \times 66) = 2906.4 \text{ mm}^2$$

$$t_1 = V_z / A = 1254.4 / 2906.4 = 0.43 \text{ MPa}$$

$$I_y = 2[(7 \times 141.6^3 / 12) + (66 \times 7^3 / 12) + (7 \times 66 \times 84.3^2)] = 9882520 \text{ mm}^4$$

Sabiendo que la altura máxima es de 87.8 mm:

$$W_y = I_y / 87.8 = 112557.2 \text{ mm}^3$$

$$n_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{Wz} = (63102.2 / 2906.4) + (5341000 / 112557.2) = 68.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{t_1 + n}{\sqrt{2}} = (0.43 + 68.9) / \sqrt{2} = 49.02 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{t_1 - n}{\sqrt{2}} = (0.43 - 68.9) / \sqrt{2} = 48.4 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0 \text{ (la soldadura más alejada solo tiene dirección } t_1)$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = 97.13 \text{ MPa}$$

$$C_s = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} ; \sigma_{eq} = 235 / 2 = 117.5 \text{ MPa}$$

Comprobación: $117.5 \geq 97.13 \rightarrow$ Sí

4.5.- DISEÑO DE LAS UNIONES EN LA CUBIERTA

4.5.1.- DATOS INICIALES

En este apartado se analizarán las uniones de las patas de la estructura a la cubierta de la nave. Para ello se usará el programa MSC PATRAN.

Debido a que cada pata tiene unas cargas diferentes respecto al resto (salvo su correspondiente simétrica) solamente será necesario analizar aquellas patas donde los esfuerzos son los mayores de cada fila. A partir de los resultados obtenidos de los casos más desfavorables se obtendrá la métrica de los tornillos necesaria para fijarla a la cubierta. La unión tendrá este aspecto:

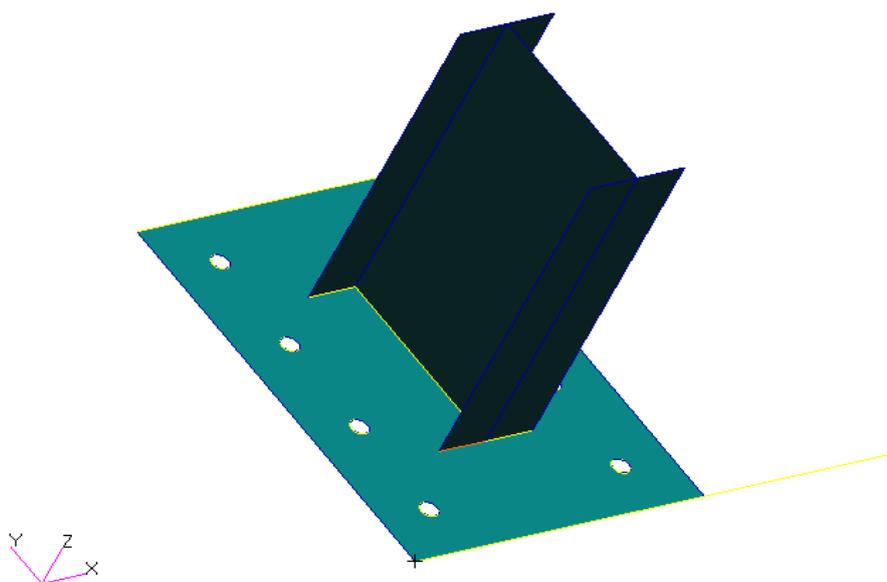


Figura 42: unión pata-cubierta

Se buscará una forma adecuada para analizar las tensiones y las deformaciones en la unión. Como la estructura tiene una forma compleja, se aplicará el Método de los Elementos Finitos.

La unión estará dividida en un número elevado regiones o subdominios, lo cuales están determinados por unos puntos representativos llamados nodos. El conjunto de todos los nodos formará lo que denominamos malla, mediante la cual, el programa será capaz de analizar los esfuerzos internos producidos en la estructura debido a las cargas.

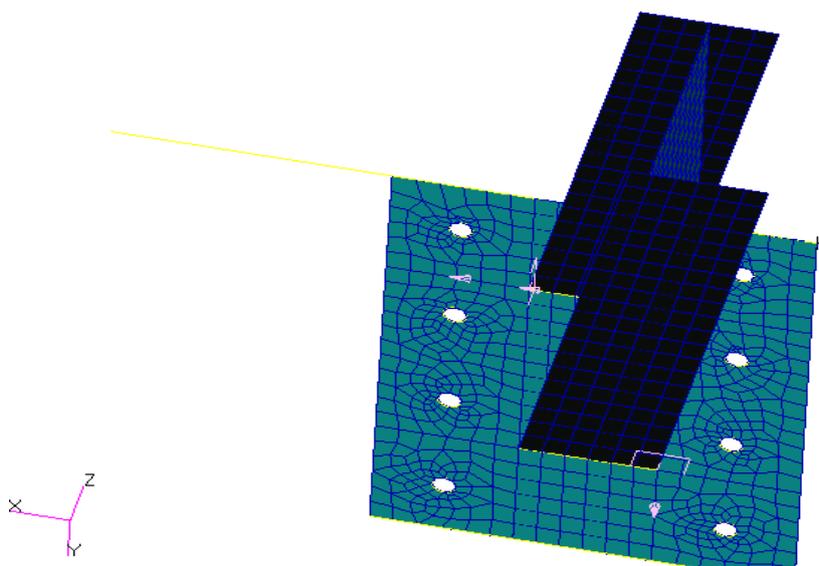


Figura 43: unión discretizada

Los datos a tener en cuenta serán los siguientes:

- El material a emplear será el acero s 235 ($E = 2.1 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$).
- La chapa irá fijada mediante tornillos de M10.
- Observar si la colocación de los ejes locales de la pata varía de un programa a otro.
- En la chapa las cargas irán mayoradas, se tomará un coeficiente de seguridad de 1.1
- La calidad del tornillo es de 6.8 por lo que su σ_{adm} será de 480 MPa.
- El coeficiente de seguridad de los tornillos es de 2.

Se analizan los momentos en todas las patas de la estructura, obtenidos anteriormente con el programa CYPECAD. Debido a que las tensiones que producen los axiles y cortantes se pueden despreciar frente a las tensiones producidas por los momentos, se empleará el mayor para observar la unión en el caso más desfavorable de cada pata.

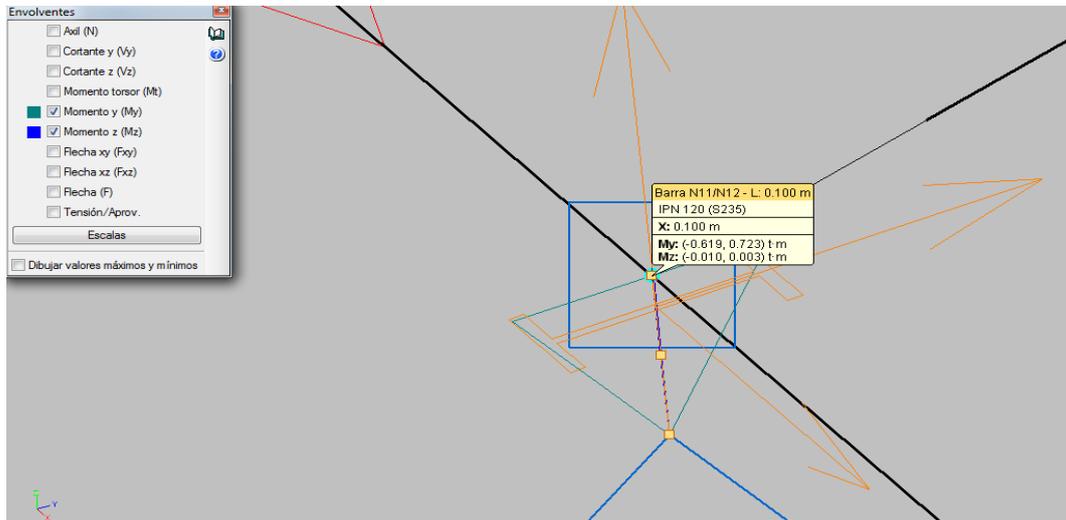


Figura 44: momentos máximos en las patas

Unidades en toneladas / metro:

1ª Pata		2ª Pata(45°)		2ª Pata(90°)		3ª Pata		4ª Pata	
My	Mz	My	Mz	My	Mz	My	Mz	My	Mz
0,483	0,039	0,154	0,012	0,232	0,01	0,079	0,004	0,329	0,007
0,722	0,01	0,286	0,011	0,413	0,01	0,135	0,004	0,545	0,007
0,715	0,023	0,252	0,029	0,359	0,026	0,133	0,011	0,612	0,016
0,629	0,008	0,232	0,007	0,35	0,006	0,117	0,003	0,598	0,004
0,629	0,004	0,23	0,001	0,348	0,001	0,118	0,001	0,594	0,001
0,629	0,002	0,231	0	0,348	0	0,118	0	0,595	0
0,629	0,001	0,231	0	0,348	0	0,118	0	0,595	0
0,629	0	0,231	0	0,348	0	0,118	0	0,595	0
0,629	0	0,231	0	0,103	0	0,118	0	0,595	0

Tabla 3: Momentos en las patas.

La tabla se ha rellenado con los datos de mitad estructura debido a que la otra mitad tiene exactamente los mismos valores por simetría.

Los valores que acompañan a cada momento máximo son los siguientes, se tendrá en cuenta el sistema de coordenadas al pasar de un programa a otro:



Pata 1

$N = -4.803 \text{ t} = -48030 \text{ N} \rightarrow$ barra sometida a compresión

$V_y = -0.105 \text{ t} = -1050 \text{ N} \rightarrow V_x$

$V_z = -7.223 \text{ t} = -72230 \text{ N} \rightarrow V_y$

$M_y = 0.722 \text{ tm} = 7220000 \text{ Nmm} \rightarrow M_x$

$M_z = 0.01 \text{ tm} = 100000 \text{ Nmm} \rightarrow M_y$

Pata 2(45°)

$N = -2.566 \text{ t} = -25660 \text{ N} \rightarrow$ barra sometida a compresión

$V_y = 0.008 \text{ t} = 80 \text{ N} \rightarrow V_x$

$V_z = 0.342 \text{ t} = 3420 \text{ N} \rightarrow V_y$

$M_y = -0.286 \text{ tm} = -2860000 \text{ Nmm} \rightarrow M_x$

$M_z = -0.011 \text{ tm} = -110000 \text{ Nmm} \rightarrow M_y$

Pata 2(90°)

$N = 4.454 \text{ t} = 44540 \text{ N} \rightarrow$ barra sometida a tracción

$V_y = 0.007 \text{ t} = 70 \text{ N} \rightarrow V_x$

$V_z = -0.464 \text{ t} = -4640 \text{ N} \rightarrow V_y$

$M_y = 0.413 \text{ tm} = 4130000 \text{ Nmm} \rightarrow M_x$

$M_z = -0.01 \text{ tm} = -100000 \text{ Nmm} \rightarrow M_y$

Pata 3

$N = 4.002 \text{ t} = 40020 \text{ N} \rightarrow$ barra sometida a tracción

$V_y = 0.002 \text{ t} = 20 \text{ N} \rightarrow V_x$

$V_z = 0.052 \text{ t} = 520 \text{ N} \rightarrow V_y$

$M_y = -0.135 \text{ tm} = -1350000 \text{ Nmm} \rightarrow M_x$

$M_z = -0.004 \text{ tm} = -40000 \text{ Nmm} \rightarrow M_y$

Pata 4

$N = -6.269 \text{ t} = -6269 \text{ N} \rightarrow$ barra sometida a compresión

$V_y = -0.003 \text{ t} = -30 \text{ N} \rightarrow V_x$

$V_z = 0.138 \text{ t} = 1380 \text{ N} \rightarrow V_y$

$M_y = 0.612 \text{ tm} = 6120000 \text{ Nmm} \rightarrow M_x$

$M_z = 0.016 \text{ tm} = 160000 \text{ Nmm} \rightarrow M_y$

Estas cargas puntuales se transformarán en distribuidas y serán colocadas en la sección de la pata, de manera que coincidan con los nodos de la malla de las patas discretizadas.

4.5.2.- ANÁLISIS DE TENSIONES EN LA PLACA DE APOYO

A partir de la unión más desfavorable se determina el espesor mínimo necesario de la placa de apoyo, para que pueda soportar las tensiones de todas las patas de la estructura.

Con un acero s235 y un coeficiente de seguridad de 1.1, las tensiones resultantes no deben ser superiores a: $235 / 1.1 = 213.63$ MPa

Espesor → Tensión

10mm → 257 MPa

20mm → 151 MPa

13mm → 198 MPa

12mm → 214 MPa

Se observa que para unos valores de 10mm y de 12mm sobrepasa la tensión máxima permitida. Los valores de 13mm y de 20mm se sitúan por debajo de la tensión máxima, pero como interesa ahorro de material se usará el espesor de 13mm de chapa para soportar toda la estructura.

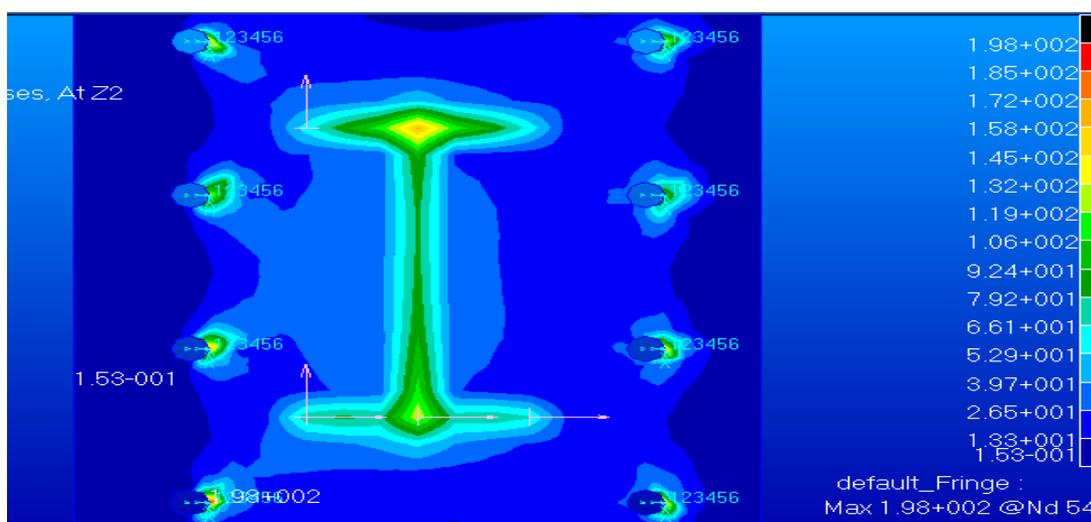


Figura 45: gráfica de tensiones en la chapa.

4.5.3.- CÁLCULO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS EN LA CUBIERTA

El coeficiente de seguridad de los tornillos es de 2, así que la σ_{eq} de cada tornillo no podrá ser superior a $480 / 2 = 240$ MPa.

PATA-1

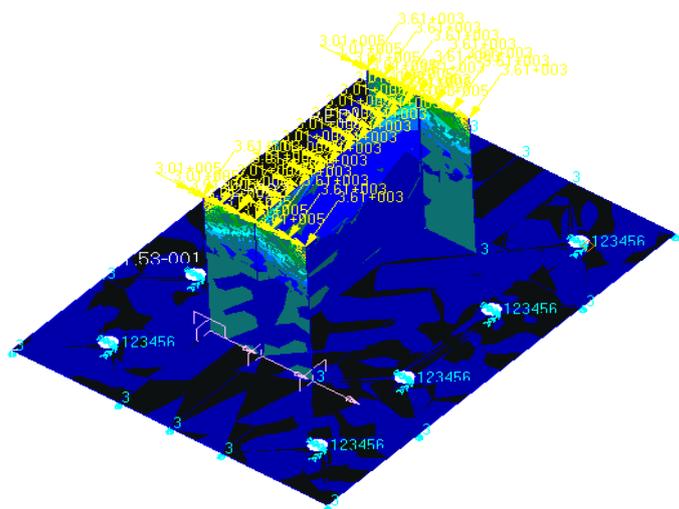


Figura 46: pata 1

Obtenidos los módulos de las fuerzas resultantes en los tornillos y utilizando una métrica de 10 mm darán como resultado los siguientes valores de tensión:

F(N)	A(mm²)	σ(MPa)
9435,5	78,5	120,197
11055	78,5	140,828
11125	78,5	141,72
9070,2	78,5	115,544
7427,4	78,5	94,6166
8553,7	78,5	108,964
9070,5	78,5	115,548
7910	78,5	100,764

Tabla 4: Tensiones tornillos pata 1.

En todos los tornillos se cumple que $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$

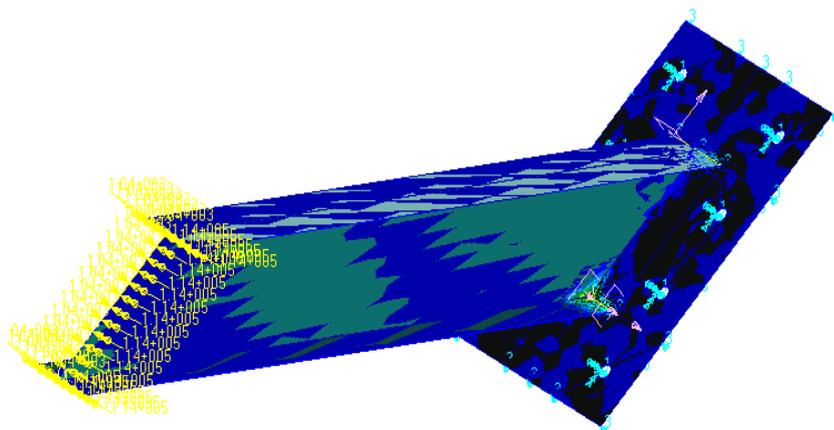
PATA-2(45°)

Figura 47: pata 2-45°

Obtenidos los módulos de las fuerzas resultantes en los tornillos y utilizando una métrica de 10 mm darán como resultado los siguientes valores de tensión:

F(N)	A(mm²)	σ(MPa)
1585,1	78,5	20,1924
1755,8	78,5	22,3669
1047,5	78,5	13,3439
749,06	78,5	9,54217
3050,7	78,5	38,8624
2661,6	78,5	33,9057
1484,1	78,5	18,9057
2252,1	78,5	28,6892

Tabla 5: Tensiones tornillos pata 2-45°.

En todos los tornillos se cumple que $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$

PATA-2(90°)



Figura 48: pata 2-90°

Obtenidos los módulos de las fuerzas resultantes en los tornillos y utilizando una métrica de 14 mm darán como resultado los siguientes valores de tensión:

F(N)	A(mm²)	σ(MPa)
15624	153,86	101,547
13242	153,86	86,0653
25689	153,86	166,963
23185	153,86	150,689
20835	153,86	135,415
18937	153,86	123,079
34983	153,86	227,369
29368	153,86	190,875

Tabla 6: Tensiones tornillos pata 2-90°.

En todos los tornillos se cumple que $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$

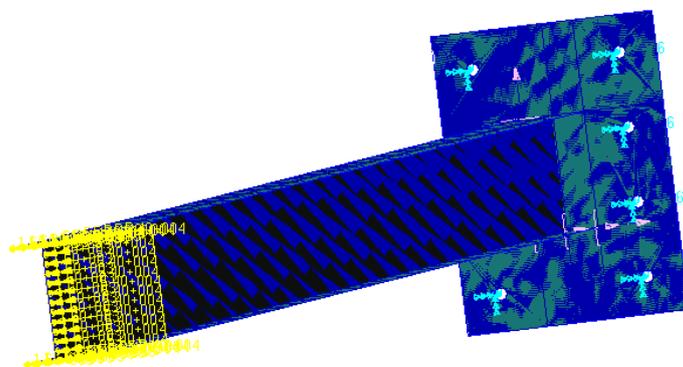
PATA-3

Figura 49: pata 3

Obtenidos los módulos de las fuerzas resultantes en los tornillos y utilizando una métrica de 10 mm darán como resultado los siguientes valores de tensión:

F(N)	A(mm²)	σ(MPa)
7189,9	78,5	91,5911
12622	78,5	160,79
45,852	78,5	0,5841
2017,4	78,5	25,6994
8794	78,5	112,025
17409	78,5	221,771
1133,4	78,5	14,4382
2815,9	78,5	35,8713

Tabla 7: Tensiones tornillos pata 3.

En todos los tornillos se cumple que $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$

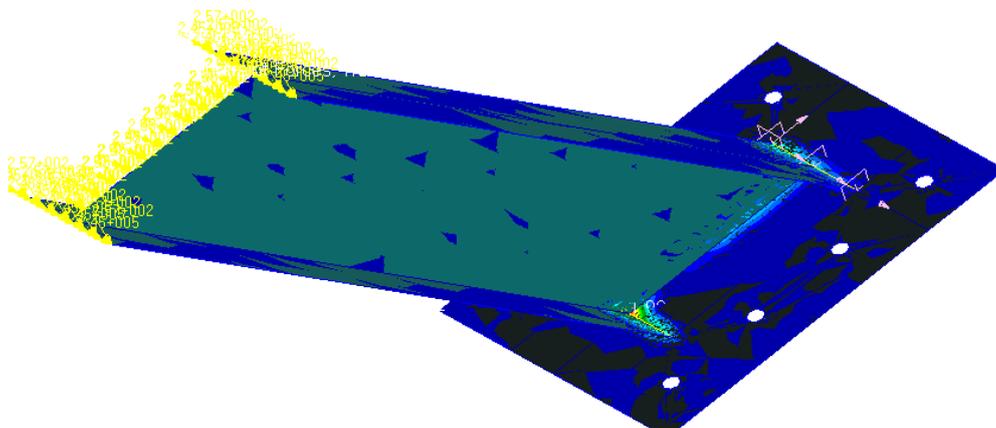
PATA-4

Figura 50: pata 4

Obtenidos los módulos de las fuerzas resultantes en los tornillos y utilizando una métrica de 10 mm darán como resultado los siguientes valores de tensión:

F(N)	A(mm²)	σ(MPa)
5988,6	78,5	76,2879
5252,8	78,5	66,9146
4250	78,5	54,1401
5622,9	78,5	71,6293
3468,3	78,5	44,1822
3715,8	78,5	47,335
2888,1	78,5	36,7911
2939,3	78,5	37,4433

Tabla 8: Tensiones tornillos pata 4.

En todos los tornillos se cumple que $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$

5.- CONCLUSIONES

Se ha realizado el diseño de una estructura para módulos fotovoltaicos a partir de un modelo con unas medidas prefijadas. Se partió de unos perfiles iniciales de IPN 80 hasta obtener los más adecuados ya que una estructura no va a ser más resistente por reforzarla mucho a base de aportar material, sino por colocar el material en las zonas adecuadas, esto es, el factor “diseño” marca la diferencia a la hora de conseguir unas buenas características de resistencia y ligereza.

Cuanto mayor fuesen los perfiles apoyados, mayores tendrían que ser las vigas que los soportan, con lo que habría un exceso de material que no es útil porque no está trabajando para las cargas aplicadas en la estructura sino a un mal diseño.

Hay que tener muy en cuenta para optimizar una geometría, la responsabilidad que tienen las piezas que se piensan sustituir, y si el nuevo elemento a introducir va a mejorar realmente las características, prestando especial atención a cual es la forma en que mejor trabaja.

En este proyecto se han ido encontrando problemas relacionados sobretodo con los ángulos y colocación de los ejes, siendo necesario en algunos casos cambiar la estructura de nuevo. Es por ello que se gana experiencia a la hora de plantear y analizar bien la situación antes de ponerse a ello.

También considero interesante el hecho de adquirir habilidades al tener que aprender por uno mismo a utilizar programas nuevos, e incluso en otros idiomas, que son las herramientas necesarias para llevar a cabo nuestros trabajos de ingeniería de una manera rápida y eficaz.

5.1.- BIBLIOGRAFÍA

1.- *ELASTICIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES*, Apuntes de la asignatura 2º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

2.- *TEORIA DE ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES*, Apuntes de la asignatura 3º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

3.- *DISEÑO DE MÁQUINAS*, Apuntes de la asignatura 3º Curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica.

4.- *Manual imprescindible de CYPE 2011*, instalaciones del edificio y cumplimiento del CTE / Antonio Manuel Reyes Rodríguez Anaya Multimedia, D. L. 2010

5.- *MSC PATRAN Reference Manual*, F.E.M. Modeling Theory Manual, MSC Software, 2001.

5.2.- CONSULTAS WEB

<http://www.wikipedia.org>

<http://www.mscsoftware.com>

<http://www.hierrotodo.com>

<http://www.soliclima.es>