



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Diseño y análisis EF de una plataforma eléctrica tipo tijera.

Design and FE analysis of electric scissor platform

Autor/es

Miguel Santolaya Bretón

Director/es

Óscar Paseta Martínez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
Enero de 2020

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño conceptual, el cálculo analítico y la simulación en Elementos Finitos (EF) de una plataforma elevadora móvil de personal (PEMP) con estructura extensible tipo tijera, de acuerdo a los criterios establecidos en la Norma UNE-EN 280:2016 en cuanto a cálculos estructurales y de estabilidad.

Para lograr este fin, se ha tomado como base un concepto inicial inspirado en modelos comerciales. El objetivo de este primer concepto es tener un diseño base que posteriormente será optimizado, buscando soluciones a los diferentes problemas que se han ido presentando a lo largo de la elaboración de este trabajo.

La primera etapa del proceso seguido para la elaboración del presente TFM engloba la determinación de las cargas que actúan sobre la PEMP, de acuerdo con la Norma, el análisis estático de la estructura, los diagramas de sólido libre de los diferentes elementos y por último los diagramas de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

La última etapa de desarrollo se centra en el modelado completo de cada una de las piezas que forman la PEMP, mediante el software de diseño CAD 3D SolidWorks y la simulación por EF, mediante el software comercial ANSYS, de los diferentes diseños de las mismas.

Los resultados de la simulación EF se comparan con los obtenidos en el análisis analítico, con el fin de validar el modelo EF y a partir de ahí estudiar con más detalle el comportamiento mecánico, en cuanto a tensiones y desplazamientos, del chasis, la estructura extensible y la plataforma de trabajo, finalizando con un estudio de pandeo de la estructura.

Contenido

Resumen	1
Índice de Tablas	4
Índice de Figuras	5
1. Introducción, objeto y alcance	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objeto y alcance	8
2. Factores de diseño y aplicación de la normativa	8
2.1 Carga nominal	9
2.2 Fuerzas debidas al viento	9
2.2.1 Sobre la plataforma de trabajo (vb)	9
2.2.2 Sobre las personas (vp)	10
2.2.3 Sobre el equipo (veq)	10
2.3 Fuerza manual (FM)	10
2.4 Mayoración de las cargas	10
3. Cálculo analítico y pre-dimensionamiento de la estructura.	10
3.1 Cargas e hipótesis de cálculo	10
3.2 Pre-dimensionamiento de la estructura	11
3.2.1 Calculo de esfuerzos en la estructura en posición superior	11
3.2.2 Cálculo de esfuerzos en la estructura en posición inferior	13
3.2.3 Cálculo de la sección de los perfiles de la estructura extensible	14
3.2.4 Cálculo de la sección de los bulones de la estructura extensible	15
3.2.4.1 Bulones de la estructura extensible	15
a) Análisis de flexión	16
b) Análisis de cortante directo	16
c) Análisis de aplastamiento	16
3.2.5 Cálculo de la sección de las guías	17
4. Análisis de estabilidad	17
5. Modelado de la geometría de la PEMP	19
6. Análisis por Elementos Finitos de la PEMP	20
6.1 Estructura extensible	22
6.1.1 Modelo de Elementos Finitos	22
6.1.2 Resultados del modelo inicial	23
6.1.2.1 Análisis de Desplazamientos	24
6.1.2.2 Análisis de Tensiones	25
6.1.3 Resultados geometría optimizada	26
6.1.3.1 Análisis de desplazamientos	27
6.1.3.2 Análisis de Tensiones	27
6.2 Chasis	29



6.2.1 Modelo de Elementos Finitos	29
6.2.2 Resultados	30
6.2.2.1 Análisis de Desplazamientos	30
6.2.2.2 Análisis de Tensiones	31
6.3 Plataforma de trabajo	32
6.3.1 Modelo de Elementos Finitos	32
6.3.2 Resultados	33
6.3.2.1 Análisis de Desplazamientos	33
6.3.2.2 Análisis de Tensiones	34
6.4 Pandeo de la estructura extensible	35
6.5 Selección del cilindro hidráulico	36
7. Conclusiones y desarrollo futuro	39
7.1 Conclusiones	39
7.2 Líneas futuras	39
Bibliografía	40
Referencias de figuras y tablas.	40

Índice de Tablas

Tabla 1. Mayoración cargas [2]	10
Tabla 2. Fuerzas norma	11
Tabla 3. Reacciones de ligadura(N). Posición superior	12
Tabla 4. Reacciones de ligadura(N). Posición inferior	14
Tabla 5. Axil y momento flector en torno al punto F	14
Tabla 6. Perfil rectangular hueco [3]	15
Tabla 7. Aceros soldables de grano fino, en la condición de normalizado [4]	15
Tabla 8. Perfil hueco redondo [5]	16
Tabla 9. Flexión en los bulones.....	16
Tabla 10. Cortante directo en los bulones	16
Tabla 11. Aplastamiento en los bulones	16
Tabla 12. Perfiles en L [6]	17
Tabla 13. Cargas. Análisis de estabilidad	18
Tabla 14. Distancias para el caso de traslación en desnivel de 5°	19
Tabla 15. Casos estabilidad	19
Tabla 16. Tipos de contactos	21
Tabla.17 Comparación de resultados analíticos vs Ansys. Coeficiente de fricción de 0,16	24
Tabla.18 Comparación de resultados analíticos vs Ansys. Coeficiente de fricción 0,01	24
Tabla 19. Presión bomba [8]	36
Tabla 20. Características cilindro [9]	37

Índice de Figuras

Figura 1. Ilustración definiciones [1].....	7
Figura 2. Diseño inicial	8
Figura 3. Plataforma de trabajo.....	9
Figura 4. Fuerzas sobre plataforma de trabajo	10
Figura 5. Fuerzas sobre plataforma de trabajo. Posición superior	11
Figura 6. Fuerzas sobre la estructura extensible. Posición superior	12
Figura 7. Fuerzas sobre plataforma de trabajo. Posición inferior	13
Figura 8. Fuerzas sobre la estructura extensible. Posición inferior	13
Figura 9. Sección rectangular hueca	14
Figura 10. Ejemplos direcciones y combinaciones de carga para la estabilidad [7].....	17
Figura 11. Ejemplo de traslación en cuesta y en desnivel.....	18
Figura 12. Operaciones de Extrusión y Corte	19
Figura 13. Operaciones de Barrido y Revolución	20
Figura 14. Ensamblaje y algunas de las relaciones de posición	20
Figura 15. Mallado de la estructura extensible	23
Figura 16. Fuerzas y apoyos de la tijera	23
Figura 17. Desplazamientos horizontales (mm). Tijera diseño inicial.....	25
Figura 18. Desplazamientos verticales (mm). Tijera diseño inicial.....	25
Figura 19. Tensiones (Mpa). Tijera del modelo inicial	26
Figura 20. Tensiones nodales (Mpa). Tijera diseño inicial.....	26
Figura 21. Tensiones máximas (MPa) bulón y barra. Posición superior	26
Figura 22. Desplazamientos horizontales (mm). Tijera diseño optimizado.	27
Figura 23. Desplazamientos verticales (mm). Tijera diseño optimizado.....	27
Figura 24. Tensiones (Mpa). Tijera del modelo inicial	28
Figura 25. Tensiones máximas (MPa) Barra y Alojamiento. Posición superior.....	28
Figura 26. Tensiones Bulones. (Mpa). Tijera diseño optimizado	28
Figura 27. Tensiones Casquillos. (Mpa). Tijera diseño optimizado	29
Figura 28. Mallado del chasis.....	30
Figura 29. Fuerzas y apoyos en el chasis.....	30
Figura 30. Desplazamientos (Mpa). Posición superior e inferior	31
Figura 31. Tensiones (Mpa). Posición superior e inferior	31
Figura 32. Mallado de la plataforma de trabajo.....	32
Figura 33. Fuerzas en la plataforma de trabajo	33
Figura 34. Desplazamientos verticales (mm). Plataforma de trabajo	33
Figura 35. Desplazamientos horizontales (mm). Plataforma de trabajo	34

Figura 36. Desplazamientos horizontales (mm). Plataforma de trabajo	34
Figura 37. Pandeo en Workbench.....	35
Figura 38. Modo 1 de pandeo	35
Figura 39. Modo 2 de pandeo	36
Figura 40. Tipo de montaje del cilindro hidráulico [10].....	37
Figura 41. Selección del diámetro del vástago [11]	38

1. Introducción, objeto y alcance

1.1 Introducción

Se define plataforma elevadora móvil de personal (en adelante PEMP) como una máquina móvil destinada a desplazar personas hasta una posición de trabajo, donde llevan a cabo una tarea, con la intención de que las personas entren y salgan de la plataforma de trabajo en una posición de acceso definida. Consiste como mínimo, en una plataforma de trabajo con controles, una estructura extensible y un chasis.

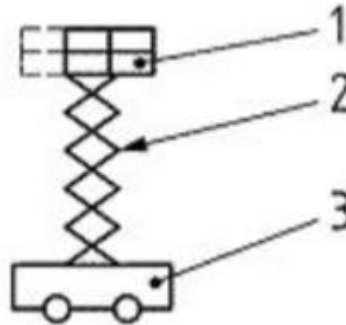


Figura 1. Ilustración definiciones [1]

1. **Plataforma de trabajo:** Plataforma rodeada por una barandilla o una cabina que puede desplazarse con su carga hasta una posición que permita efectuar trabajos de montaje, reparación, inspección u otros trabajos similares.
2. **Estructura extensible:** Estructura que está unida al chasis y porta la plataforma de trabajo y permite el desplazamiento de la plataforma hasta la posición requerida. Puede constar, por ejemplo, de una pluma o de una escala, simple, telescópica o articulada, o de una estructura de tijera, o de cualquier combinación entre ellas, con o sin posibilidad de orientación en relación a la base.
3. **Chasis:** Base de la PEMP. Puede ser remolcado, empujado, autopulsado, etc.

De acuerdo a la Norma UNE-EN 280:2016, las PEMP se dividen en dos grupos principales:

Grupo A: PEMP en las que la proyección vertical del centro de gravedad de la carga está siempre en el interior de las líneas de vuelco, en todas las configuraciones de la plataforma y a la máxima inclinación del chasis especificada por el fabricante.

Grupo B: Todo el resto de PEMP

En función de sus posibilidades de traslación, las PEMP se dividen en tres tipos:

Tipo 1: La traslación sólo es posible si la PEMP se encuentra en posición de transporte.

Tipo 2: La traslación con la plataforma de trabajo en posición elevada sólo se controla por un órgano situado sobre el chasis.

Tipo 3: La traslación con la plataforma de trabajo en posición elevada se controla por un órgano situado sobre la plataforma de trabajo.

La PEMP objeto de estudio de este trabajo pertenece al GRUPO A tipo 3.

1.2 Objeto y alcance

El fin de este trabajo es el diseño conceptual, el análisis analítico, el modelado 3D y la simulación por Elementos Finitos (en adelante EF) de una PEMP con una estructura extensible de tijera de acuerdo con la Norma UNE-EN 280:2016.

En el Anexo 1 de este trabajo se recoge un breve resumen de la misma.

Resaltar que el diseño se centra únicamente en los elementos estructurales de la PEMP y en líneas futuras se podrá tratar el desglose técnico de los mismos.

Para ello se ha tomado como base un concepto inicial, inspirado en PEMP de tijera comerciales. Tomando como base este concepto inicial, durante el trabajo se irá desarrollando y optimizando, así como buscando soluciones a los diferentes problemas que se han presentado a lo largo de la elaboración.

Se ha llevado a cabo un análisis analítico de cargas y esfuerzos, necesario para dimensionar las secciones estructurales de los diferentes elementos de la PEMP.

Este proceso engloba tanto la determinación de las cargas que actúan sobre la PEMP de acuerdo con la Norma, como el análisis estático de la estructura, el cálculo de los diagramas de sólido libre de los diferentes elementos y por último los diagramas de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

La última etapa de desarrollo se centra en el modelado completo de cada una de las piezas que forman la PEMP mediante SolidWorks y la simulación por EF, con la ayuda del software comercial ANSYS, de los diferentes diseños. Los resultados de la simulación por EF se comparan con los obtenidos en el análisis analítico, con el fin de verificar y validar el modelo EF y a partir de ahí poder estudiar con más detalle el comportamiento mecánico del chasis, la estructura extensible y la plataforma de trabajo.

2. Factores de diseño y aplicación de la normativa

La PEMP objeto de este trabajo se ha diseñado para una carga nominal de 230 kg, una altura máxima de trabajo de 10 m y para un solo operario.

Las primeras medidas aplicadas al diseño inicial se recogen en la siguiente figura.

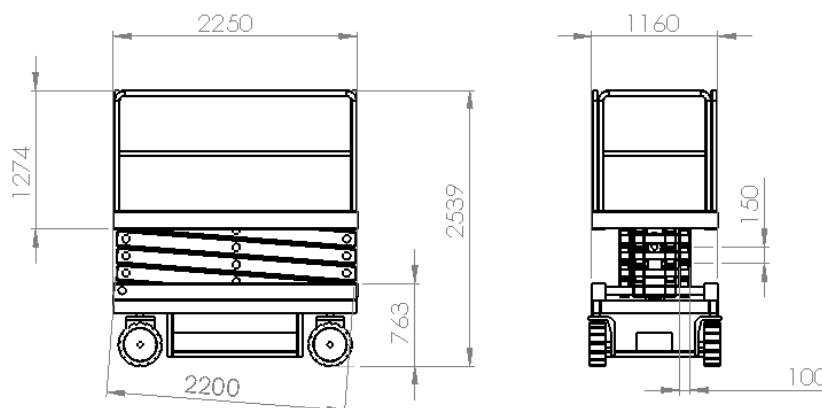


Figura 2. Diseño inicial

A continuación, se aplica la Norma, recogida en el Anexo 1, para la determinación de las cargas que actúan sobre la PEMP.

2.1 Carga nominal

$$m_p = 80 \text{ kg} \quad F_p = 80 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 784,8 \text{ N}$$

$$m_e = 200 \text{ kg} \quad F_{eq} = 150 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 1471,5 \text{ N}$$

$$n = 1 \text{ persona} \quad m = 1 * 80 + 150 = 230 \text{ kg}$$

La masa de cada persona (m_p) se supone como una carga puntual actuando a 0,1 m del borde interior de la barandilla.

La masa del equipo (m_e) debe estar repartida sobre el 25% del piso. La presión obtenida al aplicar la masa en esta área debe ser menor o igual que 3 kN/m^2 , en el caso de que sea mayor se deberá aumentar el área de aplicación hasta estar por debajo de este valor máximo.

El estado de fuerzas más desfavorables será cuando el equipo se distribuya a lo largo del lado menor de la plataforma de trabajo (Figura 3)

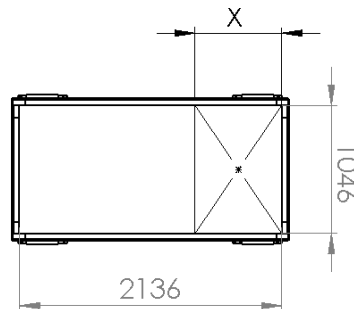


Figura 3. Plataforma de trabajo

El área de la plataforma de trabajo desde el interior de las barandillas es $A = 2,136 * 1,046 = 2,234 \text{ m}^2$. El 25% del área total es $0,5585 \text{ m}^2$.

Para una fuerza de $1471,5 \text{ N}$ se obtiene una presión de $1471,5/0,5585 = 2634 \text{ N/m}^2$, la cual está dentro del límite establecido por la norma.

Por tanto, para calcular la longitud de la zona más desfavorable se plantea la siguiente ecuación: $0,5585 = 1,046 * x$ de donde se despeja que x es $0,534 \text{ m}$, y la distancia del punto de aplicación de la carga al borde de la plataforma es $0,534/2 = 0,267 \text{ m}$.

2.2 Fuerzas debidas al viento

La fuerza del viento, según recoge la norma, es de 100 N/m^2 que se corresponde con una velocidad de viento de $12,5 \text{ m/s}$.

2.2.1 Sobre la plataforma de trabajo (v_b)

La superficie expuesta es la de las barandillas y es igual a $0,452 \text{ m}^2$.

Las barandillas son de sección rectangular, por tanto, el factor de forma a aplicar es de 1,4.

La carga total del viento sobre la plataforma de trabajo será de $0,425 * 1,4 * 100 = 63,3 \text{ N}$.

2.2.2 Sobre las personas (v_p)

Puesto que la plataforma de trabajo se ha diseñado con barandillas ranuradas, se toma una superficie expuesta para una persona de $0,7 \text{ m}^2$

La carga del viento sobre el operario será: $100 * 0,7 = 70 \text{ N}$, aplicada a 1 metro sobre la plataforma de trabajo.

2.2.3 Sobre el equipo (v_{eq})

La fuerza del viento sobre el equipo se toma como el 3% de suma, por tanto la carga de viento sobre el equipo es: $0,03 * 200 * 9,81 = 58,8 \text{ N}$ aplicada a 0,5 metros sobre la plataforma de trabajo.

2.3 Fuerza manual (F_M)

La fuerza desarrollada para una persona es de 200 N a 1,1 metros de altura sobre la plataforma de trabajo.

2.4 Mayoración de las cargas

Las cargas y fuerzas definidas en el apartado 2 deben multiplicarse por un coeficiente de seguridad parcial dado en la siguiente tabla.

Carga	Coeficiente parcial de seguridad γ_D	
	Combinación de cargas A	Combinación de cargas B
Carga nominal	1,34	1,22
Pesos muertos	1,22	1,16
Fuerzas debidas al viento	-	1,22
Fuerza manual	-	1,22

Tabla 1. Mayoración cargas [2]

3. Cálculo analítico y pre-dimensionamiento de la estructura.

El desglose de los cálculos desarrollados a lo largo de este apartado está recogido en el Anexo 2

3.1 Cargas e hipótesis de cálculo

La distribución de cargas sobre la plataforma se recoge en la siguiente figura:

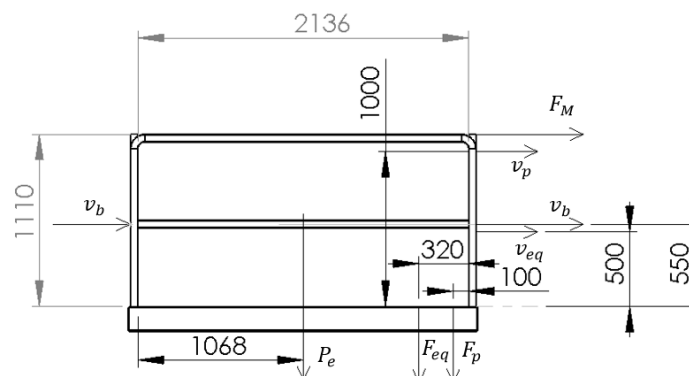


Figura 4. Fuerzas sobre plataforma de trabajo

F_M	v_p	v_b	v_{eq}	F_p	F_{eq}	P_e
200 N	70 N	63,3 N	58,8 N	784,8 N	1471,5 N	1962 N

Tabla 2. Fuerzas norma

Además de las cargas especificadas en la norma, se tiene en cuenta el peso propio de la estructura de la plataforma de trabajo (P_e) con una masa de 201 Kg, así como los coeficientes de mayoración vistos en el apartado 2.4, tomándose la combinación de cargas A para el predimensionamiento, puesto que genera el estado de tensiones más desfavorable.

Una vez determinadas las cargas que actúan sobre la plataforma y sus puntos de aplicación de acuerdo con la Norma, se va a analizar la posición superior e inferior de la tijera para determinar el estado más desfavorable y a partir de éste predimensionar tanto las barras y los bulones como el cilindro hidráulico.

En primer lugar, se lleva a cabo un análisis estático de la estructura extensible, con el objetivo de determinar las reacciones en los apoyos de la misma. En segundo lugar, se calcularán las reacciones de ligadura de las barras con los bulones por medio de diagramas de sólido libre. Por último, se determinan los diagramas de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores de las barras y bulones.

Para comprobar estructuralmente los elementos que componen la estructura se han considerado los tres tipos de fallo siguientes: fallo por axil-flexión, fallo por cortante y fallo por aplastamiento, las cuales se detallan más adelante.

3.2 Pre-dimensionamiento de la estructura

Aunque se han mayorado las cargas de acuerdo a la Norma, se va a establecer un coeficiente de seguridad a la hora de dimensionar la estructura, puesto que no se ha tenido en cuenta el peso de la estructura extensible de tijera.

3.2.1 Calculo de esfuerzos en la estructura en posición superior

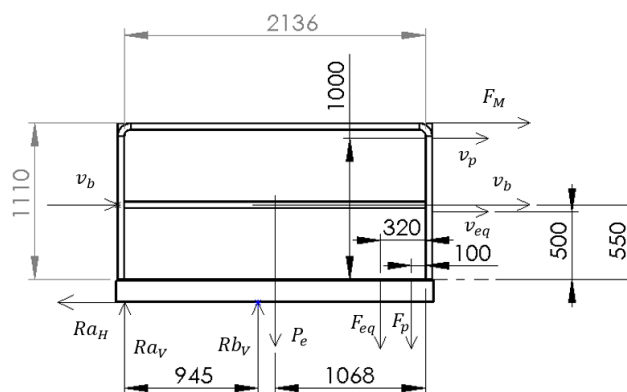


Figura 5. Fuerzas sobre plataforma de trabajo. Posición superior

El primer paso del análisis estático es determinar las reacciones en los apoyos A y B de la plataforma de trabajo. Con la distribución de fuerzas de la figura 5, se establece el sistema de ecuaciones de equilibrio en fuerzas y momentos:

- $\Sigma F_H = 0$ $Ra_H - F_M - v_p - 2 \cdot v_b - v_{eq} = 0$
- $\Sigma F_V = 0$ $Ra_V + Rb_V - F_{eq} - F_p - P_e = 0$
- $\Sigma M_a = 0$ $Rb_v \cdot 945 - F_{eq} \cdot (2136 - 320,4) - F_p \cdot (2136 - 100) - F_M \cdot 1100 - v_p \cdot 1000 - v_b \cdot 2 \cdot 550 - v_{eq} \cdot 500 - P_e \cdot 1068 = 0$

El segundo paso es determinar las reacciones N y M de los apoyos de la estructura extensible de tijera, aplicando como fuerzas externas las reacciones en los apoyos A y B calculadas anteriormente. Para ello se establece de nuevo el equilibrio de fuerzas y momentos y se resuelve el sistema de ecuaciones:

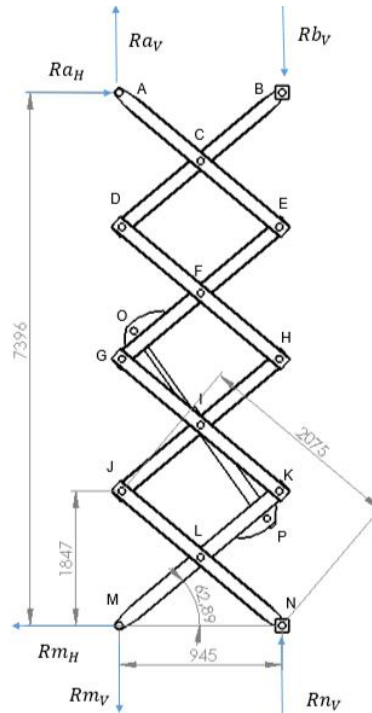


Figura 6. Fuerzas sobre la estructura extensible. Posición superior

- $\Sigma F_H = 0$ $Ra_H - Rm_H = 0$
- $\Sigma F_V = 0$ $Ra_V - Rb_V + Rm_V + Rn_V = 0$
- $\Sigma M_m = 0$ $Rn_V * 945 - Rb_V * 945 - Ra_H * 7396 = 0$

Por último, conocidas las reacciones en la estructura extensible de tijera, se analizan los diagramas de cuerpo libre en las barras para una de las dos tijeras (estas son simétricas), para obtener las reacciones de ligadura entre las barras. Resolviendo los sistemas de ecuaciones por medio del software EES, se tiene:

Barra ACE	Barra BCD	Barra DFH	Barra EFG	Barra GIK	Barra HIJ	BarraJLN	Barra KLM	Cilindro
Rah=227,7	RBh=0	Dh=1161	Eh=-1389	Gh=9218	Hh=-1385	Jh=-232	Kh=8065	Oh=-8061
Rav=1878	Rbv=4593	Dv=-2323	Ev=5038	Gv=-21231	Hv=2760	Jv=-5921	Kv=-12549	Ov=21186
Ch=1161	Ch=1161	Fh=2547	Fh=2547	Ih=1153	Ih=1153	Lh=-232	Lh=-232	Ph=-8061
Cv=-6915	Cv=-6915	Fv=-5083	Fv=-5083	Iv=-8681	Iv=-8681	Lv=-12296	Lv=-12296	Pv=21185
Eh=-1389	Dh=1161	Hh=-1385	Gh=9218	Kh=8065	Jh=-232	RNh=0	Rmh=227,7	
Ev=5038	Dv=-2323	Hv=2760	Gv=-21231	Kv=-12549	Jv=-5921	Rnv=6375	Rmv=3660	

Tabla 3. Reacciones de ligadura(N). Posición superior

3.2.2 Cálculo de esfuerzos en la estructura en posición inferior

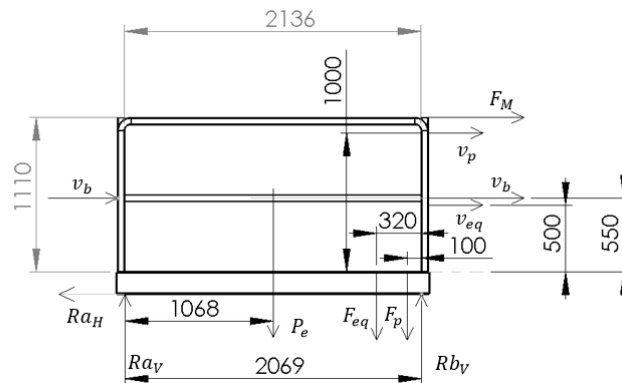


Figura 7. Fuerzas sobre plataforma de trabajo. Posición inferior

Igual que para el caso anterior, se comienza el análisis estático de la plataforma de trabajo determinando las reacciones en los apoyos A y B. Con la distribución de cargas que se muestra en la figura 7, se establece el sistema de ecuaciones de equilibrio en fuerzas y momentos:

- $\Sigma F_H = 0$ $Ra_H - F_M - v_p - 2 * v_b - v_{eq} = 0$
- $\Sigma F_V = 0$ $Ra_V + Rb_V - F_{eq} - F_p - P_e = 0$
- $\Sigma M_a = 0$ $Rb_V * 2069 - F_{eq} * (2069 - 320,4) - F_p * (2069 - 100) - F_M * 1100 - v_p * 1000 - v_b * 2 * 550 - v_{eq} * 500 - P_e * 1068 = 0$

El segundo paso es determinar las reacciones N y M de los apoyos de la tijera, aplicando como fuerzas externas las reacciones en los apoyos A y B calculadas anteriormente. Para ello se establece de nuevo el equilibrio de fuerzas y momentos y se resuelve el sistema de ecuaciones:

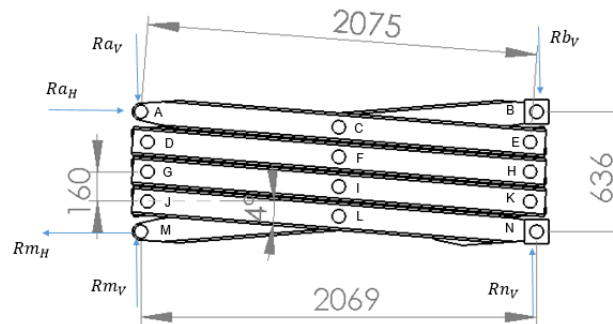


Figura 8. Fuerzas sobre la estructura extensible. Posición inferior

- $\Sigma F_H = 0$ $Ra_H - Rm_H = 0$
- $\Sigma F_V = 0$ $-Ra_V - Rb_V + Rm_V + Rn_V = 0$
- $\Sigma M_m = 0$ $Rn_V * 2069 - Rb_V * 2069 - Ra_H * 636 = 0$

Por último, conocidas las reacciones en la tijera, se analiza los diagramas de cuerpo libre en las barras para una de las dos tijeras (estas son simétricas) para obtener las reacciones de ligadura entre las barras. Resolviendo los sistemas de ecuaciones por medio del software EES, se tiene:

Barra ACE	Barra BCD	Barra DFH	Barra EFG	Barra GIK	Barra HIJ	BarraJLN	Barra KLM	Cilindro
Rah=227,7	RBh=0	Dh=34814	Eh=-30388	Gh=51533	Hh=-35027	Jh=-238,4	Kh=24671	Oh=-24660
Rav=683	Rbv=2032	Dv=665,4	Ev=1802	Gv=-3475	Hv=-648,8	Jv=-2083	Kv=-2541	Ov=7339
Ch=34814	Ch=34814	Fh=69841	Fh=60533	Ih=34789	Ih=34789	Lh=-238,4	Lh=-238,4	Ph=-24660
Cv=-1366	Cv=-1366	Fv=1314	Fv=1087	Iv=-1434	Iv=-1434	Lv=-4185	Lv=-4185	Pv=7339
Eh=-35042	Dh=34814	Hh=-35027	Gh=59460	Kh=24671	Jh=-238,4	RNh=0	Rmh=227,7	
Ev=2049	Dv=665,4	Hv=-648,8	Gv=-3976	Kv=-2541	Jv=-2083	Rnv=2102	Rmv=613	

Tabla 4. Reacciones de ligadura(N). Posición inferior

3.2.3 Cálculo de la sección de los perfiles de la estructura extensible

Para el dimensionado de barras es necesario conocer los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

La sección esta solicitada en su punto (punto P) más desfavorable por cargas axiales y momentos flectores, puesto que las tensiones debidas a los esfuerzos cortantes en ese punto de la sección son nulos. La tensión nominal de trabajo (cuando sólo existe flexión según el eje vertical o en la otra dirección es despreciable) queda definida por la siguiente expresión: $\sigma_z = \frac{N_z}{A_{sección}} + \frac{M_x}{W_x}$

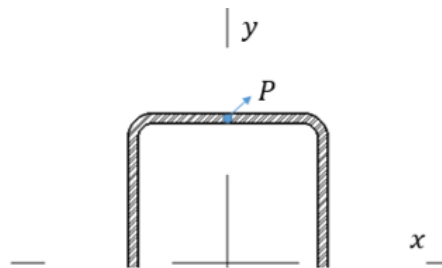


Figura 9. Sección rectangular hueca

Se analiza la sección de la barra que está sometida a los esfuerzos más desfavorables, calculando las tensiones de Von Mises en el punto más desfavorable.

El cálculo de esfuerzos se ha resuelto por medio del software MEFI. La situación más desfavorable se da en la posición inferior y para la barra EFG

La zona más solicitada de la barra se encuentra entorno al punto F y tiene los siguientes esfuerzos:

	Extensión
Flector	$2,82 * 10^6 Nmm$
Axil	$4,98 * 10^4 N$

Tabla 5. Axil y momento flector en torno al punto F

Se ha seleccionado un acero estructural S355 grado J0. Es un acero no aleado laminado en caliente y con altas exigencias de soldabilidad. Se ha consultado la gama de perfiles de un suministrador, eligiendo un perfil que satisfaga los requerimientos dimensionales necesarios (suficiente para alojar los bulones) y cumpla los requerimientos resistentes según norma. El perfil seleccionado es un perfil estructural de sección rectangular 120x80x3 con un área de sección de $11,41 \text{ cm}^2$ y un módulo resistente de $38,4 \text{ cm}^3$

TAMBO	ESPEJOR	MASA LINEAL	ÁREA DE LA SECCIÓN	MOMENTO DE INERCIA		RADIO DE GIRO		MÓDULO ELÁSTICO		MÓDULO PLÁSTICO		CONSTANTES DE TORSIÓN		ÁREA SUPERFICIE EXTERIOR	FACTOR DE FORMA
HxB mm	T mm	M Kg/m	A cm ²	I _{xx} cm ⁴	I _{yy} cm ⁴	i _{xx} cm	i _{yy} cm	W _{elxx} cm ³	W _{elyy} cm ³	W _{plxx} cm ³	W _{plyy} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _e m ² /m	A _{s/v} m ⁻¹
120x80	3	8,96	11,41	230,20	123	4,48	3,29	38,4	30,9	46,2	35,0	255	50,8	0,390	341,6
	4	11,73	14,95	294,59	157	4,44	3,24	49,1	39,3	59,8	45,2	331	64,9	0,386	258,4
	5	14,41	18,36	353,14	188	4,39	3,20	58,9	46,9	72,4	54,7	402	77,8	0,383	208,6
	6	16,98	21,63	406,06	215	4,33	3,15	67,7	53,8	84,3	63,5	469	89,4	0,379	175,4
	8	21,39	27,24	475,83	252	4,18	3,04	79,3	62,9	102,0	76,9	584	108,0	0,366	134,2
	10	25,56	32,57	534,14	281	4,05	2,94	89,0	70,3	117,8	88,7	676	122,4	0,357	109,6
	12	28,31	36,06	524,61	279	3,81	2,78	87,4	69,8	122,3	92,4	708	127,0	0,338	93,8

Tabla 6. Perfil rectangular hueco [3]

$$\sigma_{nominal} = \frac{N_z}{A_{sección}} + \frac{M_x}{W_x} = 117 \text{ Mpa} \quad C_s = \sigma_f / \sigma_{nominal} = 3$$

Con un coeficiente de seguridad de 3, el perfil seleccionado, es un perfil rectangular de 120x80x3 de acero estructural S355J0, suministrado por Hierros Leitz. A priori el coeficiente de seguridad parece muy elevado, pero por un lado hay que tener en cuenta que se producirán tensiones locales en la zona donde se insertan los bulones y que además el perfil tiene que tener unas dimensiones mínimas para alojarlos.

3.2.4 Cálculo de la sección de los bulones de la estructura extensible

Los bulones son los elementos de unión entre las barras, éstos van insertados en los casquillos que a su vez van soldados a las barras, con el fin de repartir las tensiones entre los casquillos y los bulones. Aunque la plataforma está compuesta por 4 tipos de bulones, se van a dimensionar todos con el mismo perfil normalizado, exceptuando los bulones que sirven como unión al cilindro hidráulico que se estudiarán aparte. Con el fin de disminuir el peso de la estructura se ha escogido un perfil normalizado redondo hueco.

En el análisis se estudiará su fallo por cortante directo, por aplastamiento y por flexión. Se empleará MEF1 para el cálculo de los momentos flectores. El bulón más solicitado se encuentra en el punto de unión F, por lo que se dimensionarán todos los bulones a partir del valor de esta carga, que es de 69854 N. Por el contrario la fuerza que actúa sobre los bulones que sirven de unión al cilindro hidráulico es la que produce el cilindro e igual a 51458 N.

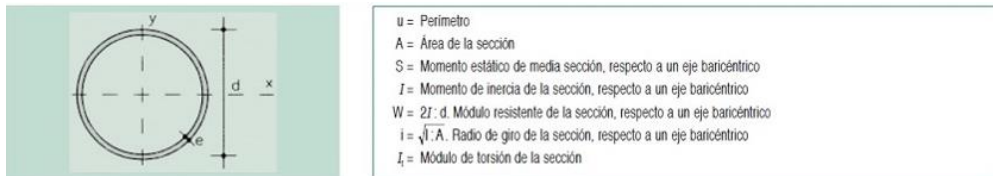
3.2.4.1 Bulones de la estructura extensible

Puesto que el requerimiento a flexión es muy elevado, se ha escogido un acero estructural S460N, soldable de grano fino y en condición de normalizado, con una tensión de fluencia superior a la de las barras de la estructura extensible.

Tipo \ Grado	S 275	S 355	S 420	S 460
N	S 275 N	S 355 N	S 420 N	S 460 N
NL	S 275 NL	S 355 NL	S 420 NL	S 460 NL

Tabla 7. Aceros soldables de grano fino, en la condición de normalizado [4]

La siguiente figura muestra los perfiles normalizados europeos para una sección hueca redonda:



Perfil	Dimensiones			Términos de sección						Peso
	d mm	e mm	u mm	A cm ²	S cm ³	I cm ⁴	W cm ³	i cm	I _t cm ⁴	p kp/m
∅ 65.3	65	3	204	5.84	5.78	28.10	8.65	2.19	56.20	4.58 C
∅ 65.4	65	4	204	7.67	7.46	35.80	11.60	2.16	71.60	6.02 C
∅ 70.2	70	2	220	4.27	4.62	24.70	7.05	2.41	49.40	3.35 P
∅ 70.3	70	3	220	6.31	6.73	35.50	10.10	2.37	71.00	4.95 P
∅ 70.4	70	4	220	8.29	8.72	45.30	12.90	2.34	90.60	6.51 C
∅ 75.2	75	2	236	4.58	5.33	30.50	8.15	2.58	61.10	3.60 P
∅ 75.3	75	3	236	6.78	7.78	44.00	11.70	2.54	88.00	5.32 P
∅ 75.4	75	4	236	8.92	10.10	56.30	15.00	2.51	113.00	7.00 P
∅ 80.2	80	2	251	4.90	6.09	37.30	9.33	2.76	74.60	3.85 C
∅ 80.3	80	3	251	7.26	8.90	53.90	13.50	2.72	108.00	5.70 C
∅ 80.4	80	4	251	9.55	11.60	69.10	17.30	2.69	138.00	7.50 C
∅ 90.3	90	3	283	8.19	11.40	77.60	17.30	3.07	155.00	6.43 P
∅ 90.4	90	4	283	10.80	14.80	100.00	22.30	3.04	200.00	8.48 P

Tabla 8. Perfil hueco redondo [5]

Para los bulones de la estructura extensible, se ha seleccionado un perfil redondo hueco de 80 mm de diámetro por 4 mm de espesor, con un área 9,55 cm² y modulo resistente 17,3 cm³.

Para los bulones que sirven de unión al cilindro hidráulico, se ha seleccionado un perfil redondo hueco de 65 mm de diámetro por 4 mm de espesor, con un área 7,67 cm² y modulo resistente 11,6 cm². El acero seleccionado es el mismo que para el resto de bulones, S460N.

a) Análisis de flexión

Para el diseño de los bulones a flexión se comienza calculando el módulo resistente de la sección

$$W = \frac{M_{max}}{\sigma_{nominal}} \text{ y se concluye determinando el coeficiente de seguridad a flexión } C_s = \frac{\sigma_f}{\sigma_{nominal}}$$

	M _{max}	W	C _s
Estructura	2,79 * 10 ⁶ Nmm	15,16 cm ³	2,85
Hidráulico	1,67 * 10 ⁶ Nmm	10,89 cm ³	3,2

Tabla 9. Flexión en los bulones

b) Análisis de cortante directo

F_{nominal} = τ_{adm} * A donde τ_{adm} es la tensión tangencial admisible y su valor responde al criterio de falla de Tresca ($\frac{\sigma_y}{2}$) y A es el área sobre la que actúa la tensión.

	Cortante	F _{nominal}	A	C _s
Estructura	Simple	69854 N	9,11 cm ²	3,1
Hidráulico	Doble	51458 N	3,5 cm ²	6,8

Tabla 10. Cortante directo en los bulones

c) Análisis de aplastamiento

F_{nominal} = σ_b * A_b donde σ_b es la tensión admisible de aplastamiento y A es el área proyectada del bulón e igual al diámetro del pasador por la anchura de contacto.

	Criterio	σ _{adm}	σ _b
Estructura	σ _{adm} ≥ σ _b	153,33 Mpa ≥ 10,91 Mpa	
Hidráulico		153,33 Mpa ≥ 9,89 Mpa	

Tabla 11. Aplastamiento en los bulones

3.2.5 Cálculo de la sección de las guías

Se ha seleccionado un perfil normalizado en L, con una sección de 120x120x10, un módulo resistente de 36 cm³ y para un acero S355N

Se ha analizado su fallo a flexión, obteniendo un momento flector máximo por medio de MEFI de 3,52 * 10⁶Nmm.

$$W = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}} = 29,7 \text{ cm}^3$$

$$C_s = \frac{\sigma_f}{\sigma_{nominal}} = 3,63$$

Perfiles L

A = Área de la sección
 I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
 I_z = Momento de inercia de la sección, respecto a z
 I_y = Momento de inercia de la sección, respecto a y
 $W_x = I_x / (b - c)$. Módulo resistente de la sección, respecto a X
 $W_y = I_y / v_1$. Módulo resistente de la sección, respecto a y
 $i_x = \sqrt{I_x / A}$. Radio de giro de la sección, respecto a X
 $i_z = \sqrt{I_z / A}$. Radio de giro de la sección, respecto a z
 $i_y = \sqrt{I_y / A}$. Radio de giro de la sección, respecto a y

u = Perímetro
 p = Peso por m
 a = Diámetro del agujero del roblón normal

Perfil	Dimensiones				Posición del centro					Términos de sección										Agujeros			Peso
	b	e	r	t	v ₁	v ₂	w	A	I _x	I _y	I _z	I _p	W _x	W _y	i _x	i _y	i _z	w ₁	w ₂	w ₃	a	p	
	mm	mm	mm	mm	cm	cm	cm	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	kg/m	
L 100. 8	100	8	12	6,0	3,90	2,74	3,87	15,50	145,0	230,0	59,8	19,90	15,50	3,06	3,85	1,96	45	60	40	25	12,20	P	
L 100. 10	100	10	12	6,0	3,90	2,82	3,99	19,20	177,0	280,0	72,9	24,60	18,30	3,04	3,83	1,95	45	60	40	25	15,00	P	
L 100. 12	100	12	12	6,0	3,90	2,90	4,11	22,70	207,0	328,0	85,7	29,10	20,90	3,02	3,80	1,94	45	60	40	25	17,80	C	
L 100. 15	100	15	12	6,0	3,90	3,02	4,27	27,90	249,0	393,0	104,0	35,60	24,40	2,98	3,75	1,93	45	60	40	25	21,90	C	
L 120. 10	120	10	13	6,5	4,69	3,31	4,69	23,20	313,0	497,0	129,0	36,00	27,50	3,67	4,63	2,36	50	80	40	25	18,20	P	
L 120. 12	120	12	13	6,5	4,69	3,40	4,80	27,50	368,0	584,0	152,0	42,70	31,50	3,65	4,60	2,35	50	80	40	25	21,60	P	
L 120. 15	120	15	13	6,5	4,69	3,51	4,97	33,90	445,0	705,0	185,0	52,40	37,10	3,62	4,56	2,33	50	80	40	25	26,60	C	

Tabla 12. Perfiles en L [6]

4. Análisis de estabilidad

En este apartado se han mayorado las cargas de acuerdo a la combinación B establecida por la norma, pues esta combinación es más desfavorable para la estabilidad.

La norma da ejemplos de direcciones y combinaciones de carga posibles para el estudio de estabilidad. Estos ejemplos se han tomado como base para este análisis.

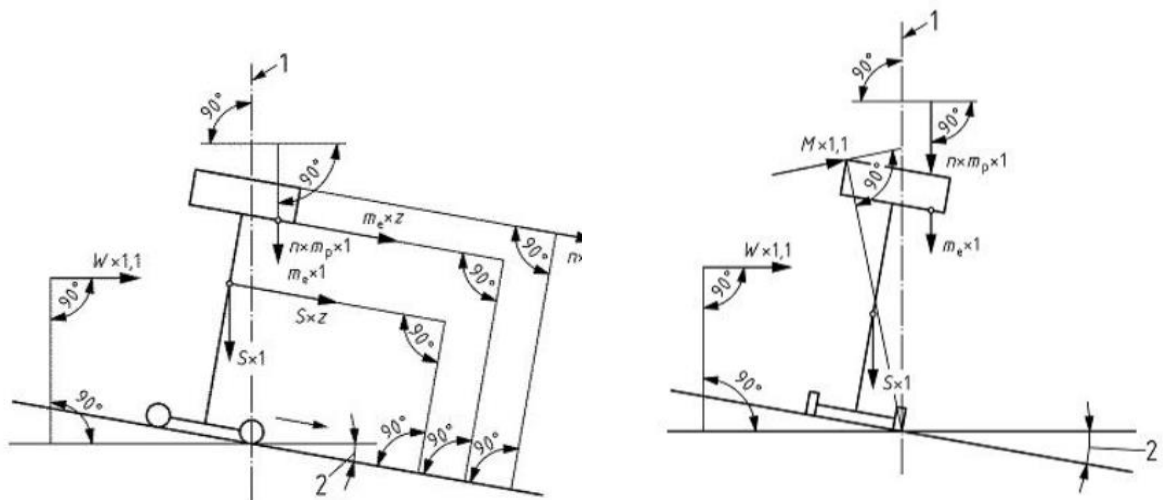


Figura 10. Ejemplos direcciones y combinaciones de carga para la estabilidad [7]

Donde:

S	Peso muerto estructura	23897 N
Mp	Masa de una persona	957,5 N
Me	Masa del equipo	1795,2 N
W	Fuerza del viento	154,45 N
M	Fuerza manual	244 N

Tabla 13. Cargas. Análisis de estabilidad

Mediante SolidWorks se han dibujado las situaciones de estabilidad a calcular, tanto para traslación como para parada. Se ha decido situar un contrapeso en la base de la plataforma simulando el peso de los componentes (baterías, mandos...) y del propio contrapeso de la máquina. Por medio de este contrapeso se consigue que la PEMP pueda trasladarse en desniveles de 5° (Anexo 3.1).

Se ha estudiado la estabilidad en traslación y parada para diferentes pendientes. Los cálculos y figuras empleados en cada uno de los casos están recogidos en el Anexo 3.

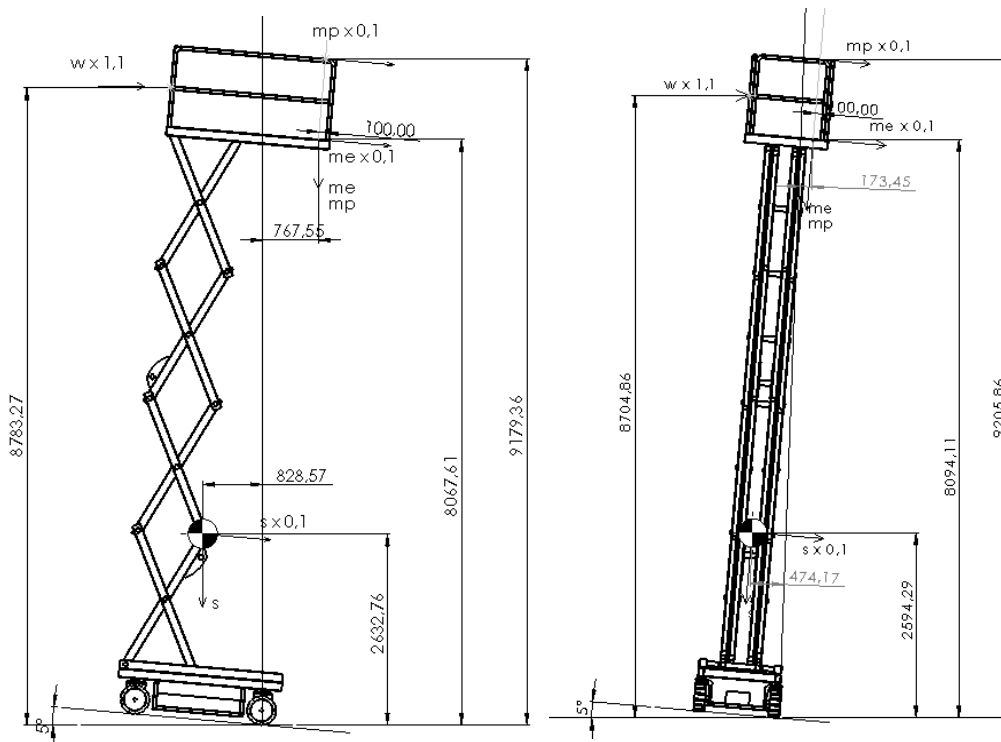


Figura 11. Ejemplo de traslación en cuesta y en desnivel

Según recoge la norma en cuanto al cálculo de momentos de estabilización y vuelco, estos deben calcularse respecto a las líneas de vuelco más desfavorables y en cada uno de los casos, el momento de estabilización debe ser mayor al momento calculado.

Por tanto, una vez establecidas las fuerzas que actúan en la PEMP para cada uno de los casos y sus distancias respecto a la línea de vuelco, se realiza un sumatorio de momentos respecto al punto de vuelco más desfavorable. Si el momento de estabilización es mayor que el de vuelco la PEMP no volcaba para ese caso.

A continuación, se analiza el caso de traslación en desnivel de 5° (Figura 11, derecha). El resto de los casos están recogidos y desarrollados en el Anexo 3 y solo se mostrarán los resultados obtenidos.

Se establece el sumatorio de momentos para este caso:

$$\Sigma M_V = S * x_s + S * 0.1 * \text{sen}(\alpha) * x_s - S * 0,1 * \text{cos}(\alpha) * y_s - (me + mp) * x_{pe} - W * 1,1 * y_w - me * \text{sen}(\alpha) * x_{pe} - me * \text{cos}(\alpha) * y_e - mp * \text{sen}(\alpha) * x_{pe} - m * \text{cos}(\alpha) * y_p = 980118 \text{ Nmm}$$

Donde:

Ys	Yp	Ye	Yw	Xpe	Xs
2578,49 mm	9205,86 mm	8094,11 mm	8704,86 mm	173,45 mm	474,17 mm

Tabla 14. Distancias para el caso de traslación en desnivel de 5°

El resultado del sumatorio de momentos es positivo, es decir, el momento de estabilización es mayor que el momento de vuelco. Por tanto, la PEMP permite traslaciones en un desnivel máximo de 5°.

Los resultados para los restantes casos, se recogen en la siguiente tabla:

Traslación en cuesta (5°)	Resultante del sumatorio de momentos: 6,159E + 06 Nmm	Sumatorio de momentos positivo. Momento de estabilización mayor que el de vuelco
Parada en desnivel (5%)	Resultante del sumatorio de momentos: -1,326E + 06 Nmm	Sumatorio de momentos negativo. Momento de vuelco mayor que el de estabilización
Parada a nivel	Resultante del sumatorio de momentos: 1,020E + 07 Nmm	Sumatorio de momentos positivo. Momento de estabilización mayor que el de vuelco
Traslación en desnivel (5%) Sin contrapeso	Resultante del sumatorio de momentos: -2,650E + 06	Sumatorio de momentos negativo. Momento de vuelco mayor que el de estabilización

Tabla 15. Casos estabilidad

Concluyendo, la PEMP permite desplazamientos en cuesta y en desnivel no superiores al 5°. Por el contrario, solo se permite su operación en superficies planas.

5. Modelado de la geometría de la PEMP

El modelado consiste en la creación, modificación y optimización del diseño 3D de la PEMP, para posteriormente estudiar su comportamiento mecánico por medio del análisis EF. El proceso de modelado se ha realizado por medio del software SolidWorks.

El primer paso, es el diseño de todos los elementos estructurales que componen la PEMP. Estos se modelan a partir de croquis 2D basados en los diseños de las secciones (barras, bulones...) analizados con anterioridad. Por medio de sucesivas operaciones (extrusión, revolución, barrido...) se le da volumen al croquis, teniendo así la pieza 3D final.

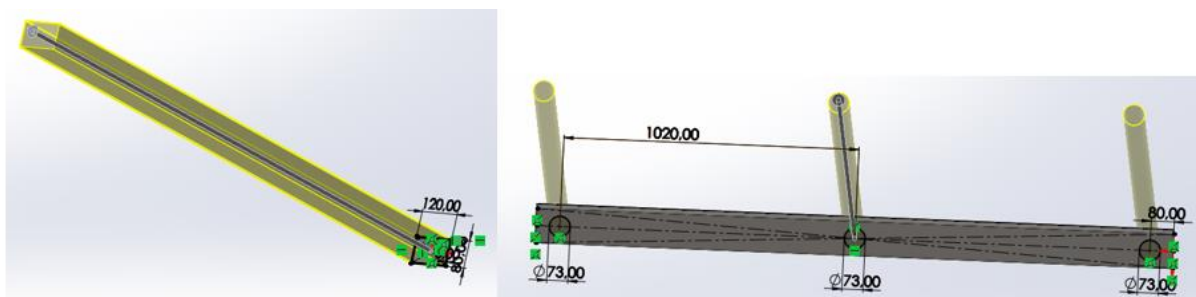


Figura 12. Operaciones de Extrusión y Corte

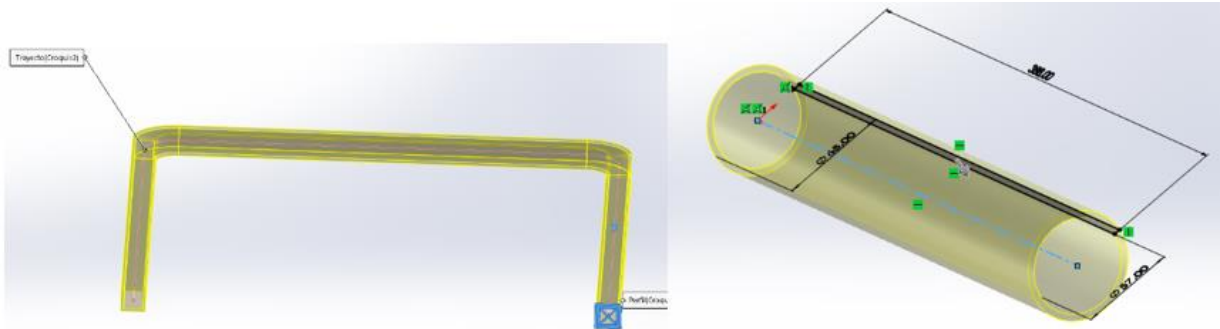


Figura 13. Operaciones de Barrido y Revolución

El segundo paso consiste en ensamblar todas las piezas previamente modeladas a través de relaciones de posición (coincidencia, concetricidad, distancia...) para formar un ensamblaje.

El ensamblaje final de la PEMP está compuesto a su vez de los subensamblajes diseñados para el chasis y la plataforma de trabajo, los cuales se unen a la estructura extensible de tijera formando así el ensamblaje final.

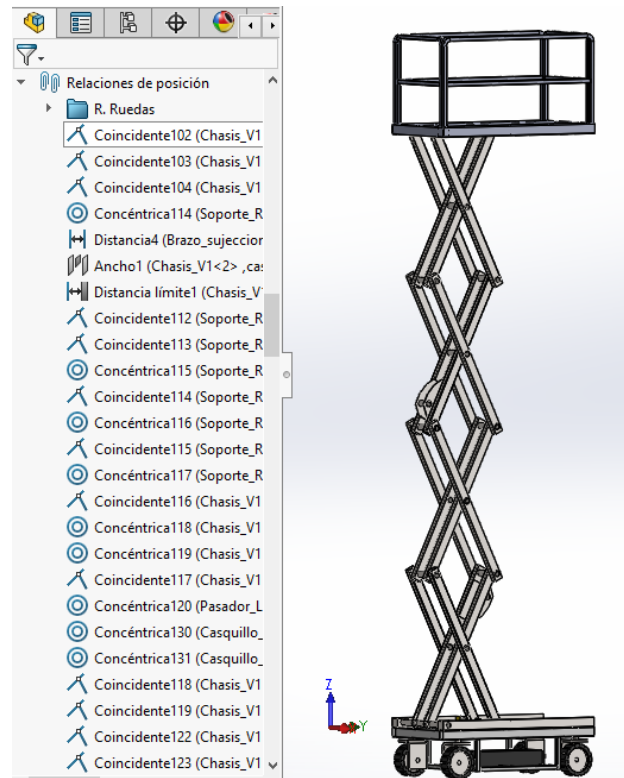


Figura 14. Ensamblaje y algunas de las relaciones de posición

6. Análisis por Elementos Finitos de la PEMP

Se ha estudiado el comportamiento mecánico del chasis, de la plataforma de trabajo y de la estructura extensible de tijera, mediante modelos de EF desarrollados con el software comercial Ansys. En concreto se han desarrollado 3 modelos de EF, uno para la plataforma, otro para la estructura extensible y otro para el chasis.

A continuación, se describen los distintos aspectos considerados al realizar los modelos de EF:

a) Contactos

Ansys distingue cinco tipos de contacto entre los elementos que componen el modelo. A continuación, se muestra una tabla resumen del tipo de contacto y su comportamiento.

Contact Type	Iterations	Normal Behavior (separation)	Tangencial Behavior (Sliding)
Bonded	1	No Gaps	No sliding
No separation	1	No Gaps	Sliding allowed
Frictionless	Multiple	Gaps allowed	Sliding allowed
Rough	Multiple	Gaps allowed	No sliding
Frictional	Multiple	Gaps allowed	Sliding allowed

Tabla 16. Tipos de contactos

En este proyecto, se ha trabajado con los contactos Bonded y Frictional. El primero no permite la separación ni el deslizamiento, igualando los desplazamientos en los nodos para los dos elementos en contacto. El segundo permite el desplazamiento axial y el deslizamiento entre los elementos en contacto, simula el comportamiento de un contacto real con fricción y por tanto debe asignarse un coeficiente de fricción según los tipos de material en contacto.

A los componentes soldados o que no se mueven ni deslizan entre sí, se les ha asignado el contacto bonded. Este contacto es de tipo lineal.

Para los elementos que deslizan entre sí se ha optado por contactos con fricción asignándoles un coeficiente de rozamiento de 0,16, fricción entre acero lubricado. Este contacto es de tipo lineal y requiere de un cálculo iterativo para su análisis.

b) Mallado

El mallado se ha realizado principalmente y siempre que el programa lo ha permitido con hexaedros. Este método de malla, a diferencia de los tetraedros, tiene un comportamiento menos rígido debido al mayor número de nodos por elemento.

Para los elementos cilíndricos se ha optado por un Sweep. Este método realiza un barrido de hexaedros entre dos caras de similar topología.

Además, puesto que los perfiles tienen espesores de milímetros, se ha optado por elementos de orden cuadrático con el fin de obtener buenos resultados utilizando un único elemento en el espesor.

Por último, con el objetivo de cambiar el tamaño de los elementos de malla, ya sea debido a que se quiere refinar un elemento específico o porque el número de nodos y elementos es muy elevado para el cálculo del modelo, se ha empleado el comando Sizing.

c) Cargas y condiciones de contorno

El comando Remote Displacement permite restringir, liberar o establecer los valores de los desplazamientos del centro de gravedad de una superficie en los tres ejes, tanto en traslación como en rotación.

Se ha empleado para establecer las condiciones de contorno para todos los modelos estudiados.

Los valores y puntos de aplicación de las fuerzas que soporta la PEMP son los mismos que los obtenidos en el desglose de la Norma (Apartado 2). Además, se ha introducido el peso de la estructura en los modelos.

d) Ajustes del análisis

Debido a que el contacto friccional es un contacto no lineal, el método de cálculo va a ser iterativo. Para ello Ansys establece diferentes áreas de contacto y realiza el cálculo del equilibrio de fuerzas. Finalmente, si la resultante es menor que un determinado valor, el modelo converge y pasaría a otra nueva iteración con otra nueva área de contacto.

El modelo se ha programado para 5 substeps para facilitar la convergencia de la solución.

e) Materiales

Todos los elementos están fabricados en acero de distintas calidades, por tanto, se asume el comportamiento elástico lineal para desplazamientos y deformaciones en todos los modelos, lo que implica pequeñas deformaciones y régimen elástico de deformaciones. Se ha considerado un módulo elástico de 210GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3.

f) Análisis de desplazamientos

Se ha consultado el código técnico de la edificación (CTE) para desplazamientos en estructuras, con el objetivo de establecer un criterio para fijar un máximo en el valor de los mismos y asegurar el correcto funcionamiento en servicio de la estructura, ya que la norma no prescribe nada en este aspecto. Esto no significa que se deba cumplir con el criterio establecido en el CTE.

Para desplazamientos horizontales, se va a considerar que el desplazamiento total debe ser menor que 1/150 de la altura total de la estructura.

Para desplazamientos verticales se va a considerar que el desplazamiento local debe ser menor que 1/100 de la estructura horizontal.

Con este criterio se van a analizar los desplazamientos en el estado superior, puesto que supone un riesgo para el operario. Además, cuando comienza a elevarse la PEMP desde el estado inferior, la estructura extensible ya se encuentra sometida a desplazamientos inducidos por las cargas a elevar, con lo cual la comprobación se centra en los desplazamientos horizontales producidos al moverse el operario dentro de la plataforma y los producidos por el viento.

6.1 Estructura extensible

Puesto que se ha optimizado el modelo con respecto al diseño inicial, se compararán los resultados de las diferentes modificaciones que se han llevado a cabo hasta llegar al diseño final.

6.1.1 Modelo de Elementos Finitos

En este apartado se particulariza el procesado que se ha realizado para el modelo de la estructura extensible. La explicación de estos comandos está detallada en la introducción de este apartado.

a) Contactos

Frictional: contactos entre los bulones y los casquillos.

Bonded: contactos entre los casquillos y sus alojamientos en las barras.

Para simular el cilindro hidráulico y determinar su reacción sobre la estructura se han unido por medio de una conexión tipo Beam los dos bulones del cilindro. Para establecer la conexión Beam hay que introducir como parámetro de entrada el radio de la viga, por tanto, es necesario predimensionar el cilindro (Anexo 5) para la fuerza máxima teórica desarrollada por él

b) Mallado

Barras: Método de hexaedros con elementos cuadráticos.

Bulones y casquillos: Método de barrido (Sweep) por hexaedros con elementos cuadráticos. En los alojamientos de los casquillos de las barras se ha hecho un Sizing de la malla a 8 mm con el objetivo de afinar el contacto entre el casquillo y la barra.

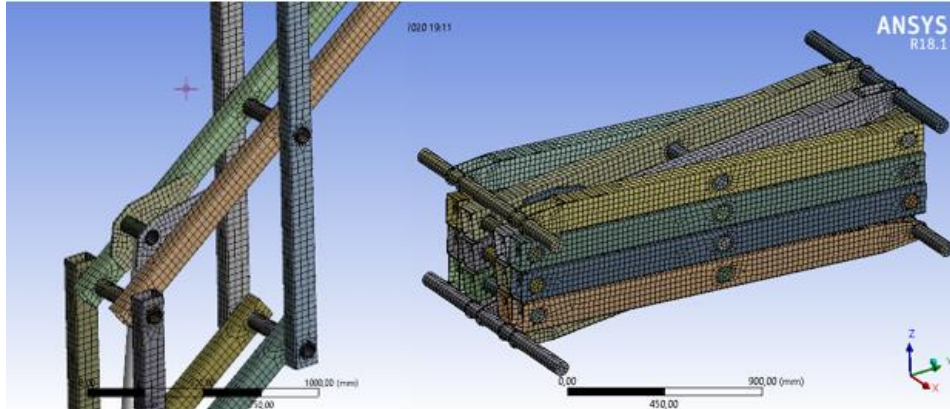


Figura 15. Mallado de la estructura extensible

c) Cargas y condiciones de contorno.

En los apoyos de los bulones con la guía sólo se ha permitido la rotación en el eje axial del bulón (eje X). En los apoyos de los bulones con los tacos que van sobre la guía se ha permitido tanto la rotación en el eje axial, como la traslación sobre la guía (eje Y).

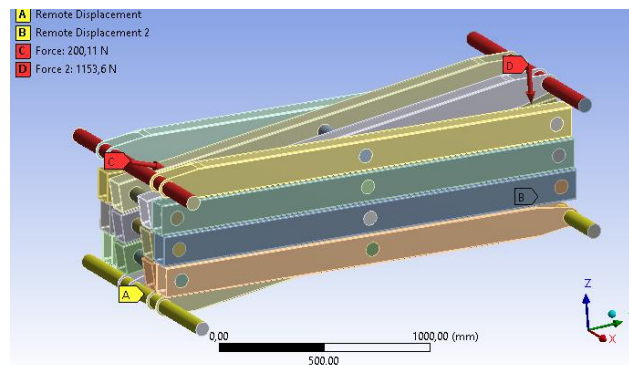


Figura 16. Fuerzas y apoyos de la tijera

6.1.2 Resultados del modelo inicial

El primer análisis tiene como objetivo verificar el correcto comportamiento de la simulación, para esto se comparan los resultados de las reacciones en los apoyos y en el cilindro hidráulico con los cálculos analíticos. Con este objetivo, no se ha tenido en cuenta el peso de la estructura en este modelo.

	RMH			RMV		
	Analítico	ANSYS	Error	Analítico	ANSYS	Error
Superior	-455,4 N	-455,4 N	0 %	-7320 N	-7185,1 N	1,8%
Inferior	-455,4 N	-455,4 N	0 %	1226 N	1327,1 N	8,2%

	RNV			Cilindro		
	Analítico	ANSYS	Error	Analítico	ANSYS	Error
Superior	12749 N	12615 N	1,0%	45334 N	33080 N	27%
Inferior	4203 N	4101,9 N	2,4%	51458 N	42310 N	17,7%

Tabla.17 Comparación de resultados analíticos vs Ansys. Coeficiente de fricción de 0,16

Aunque los valores para las reacciones no presentan un error importante, no ocurre lo mismo con los valores del cilindro hidráulico. Esto puede ser debido al rozamiento en los contactos frictional que se oponen al giro y por tanto ayudan a que esta reacción sea menor.

Para demostrar esto, se ha simulado otra vez el modelo, pero en esta ocasión se ha supuesto un coeficiente de fricción de 0,01 (cercano a 0).

	RMH			RMV		
	Analítico	ANSYS	Error	Analítico	ANSYS	Error
Superior	-455,4 N	-455,4 N	0 %	-7320 N	-7200, N	1,6 %
Inferior	-455,4 N	-455,4 N	0 %	1226 N	1233,4 N	0,6 %
	RNV			Cilindro		
	Analítico	ANSYS	Error	Analítico	ANSYS	Error
Superior	12749 N	12630 N	0,9 %	45334 N	43598 N	3,8 %
Inferior	4203 N	4195,6 N	0,2%	51458 N	50113 N	2,6 %

Tabla.18 Comparación de resultados analíticos vs Ansys. Coeficiente de fricción 0,01

Para este modelo el error no supera el 4%. Por tanto, se cumple nuestra hipótesis de que la diferencia en el caso anterior era debido al rozamiento en los casquillos, que disminuye la fuerza del cilindro en pasivo y, por tanto, la aumentará en activo (cuando el cilindro intente mover la estructura). Si se analiza en situación activa se observa que la diferencia entre el valor teórico y el real es la fuerza de rozamiento que debe vencer el cilindro para empezar el movimiento. Numéricamente $50113 \text{ N} - 42310 \text{ N} = 7803 \text{ N}$ de fuerza de rozamiento que debe vencer el cilindro. Se concluye que la fuerza máxima que realizara el cilindro va a ser mayor en una situación activa.

Por ello, se ha dimensionado el cilindro hidráulico (Apartado 6.5) para un fuerza de $50113 \text{ N} + 7803 \text{ N} = 57916 \text{ N}$.

No obstante, esta simulación solo se ha empleado para cerciorarse de que los cálculos son correctos, el estudio de la estructura se ha realizado con contactos de 0,16 puesto que es el contacto real que existe.

A continuación, se analizan los resultados en cuanto a tensiones y desplazamientos en los casos más desfavorables. En estas simulaciones se incluye el peso de la estructura.

6.1.2.1 Análisis de Desplazamientos

Los desplazamientos horizontales máximos se dan en las barras que van unidas a la plataforma de trabajo.

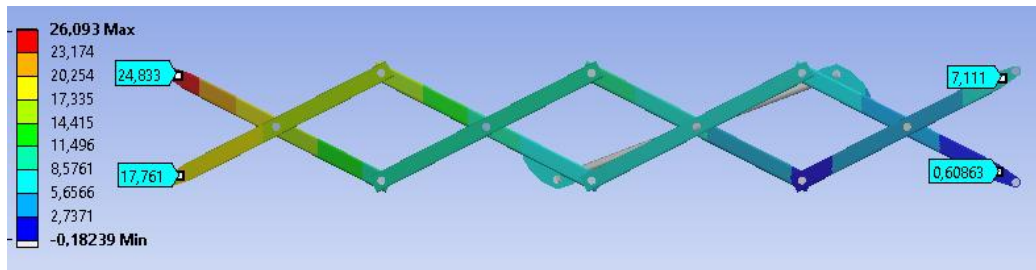


Figura 17. Desplazamientos horizontales (mm). Tijera diseño inicial.

Para desplazamientos horizontales se considera que el desplazamiento total debe ser menor que $H/150$. Con H igual a 7396 mm , el desplazamiento debe ser menor que $49,6 \text{ mm}$. El desplazamiento global del modelo es de $23,82 - 7,3 = 16,5 \text{ mm}$. Valor de desplazamiento admisible.

Los desplazamientos verticales máximos se dan en las barras que sirven como soporte de la plataforma de trabajo.

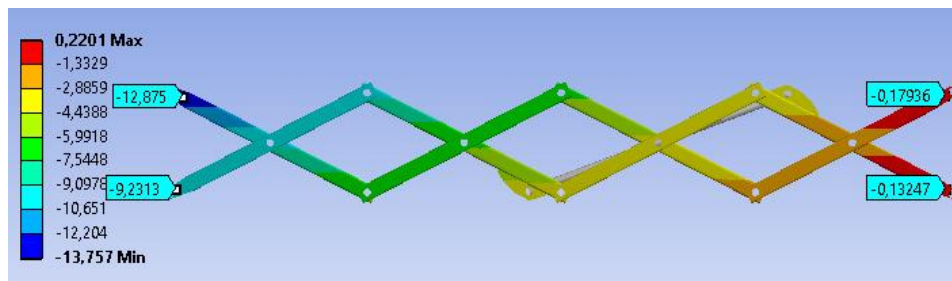
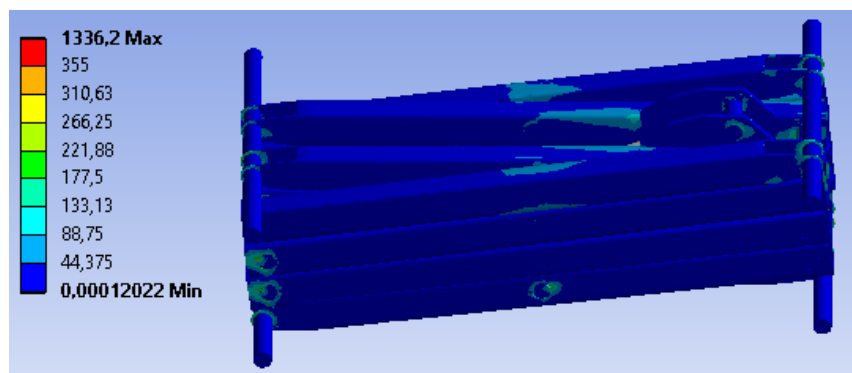


Figura 18. Desplazamientos verticales (mm). Tijera diseño inicial.

Para desplazamientos verticales se considera que el desplazamiento local debe ser menor que $1/100$ de la estructura horizontal. Con L igual a 945 mm , el desplazamiento debe ser menor que $9,45 \text{ mm}$. El desplazamiento local del modelo es de $12,87 - 9,23 = 3,64 \text{ mm}$. Valor de desplazamiento admisible.

6.1.2.2 Análisis de Tensiones



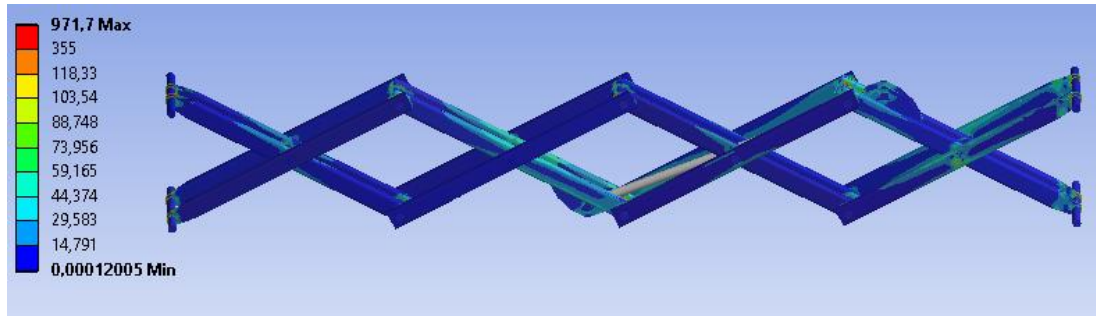


Figura 19. Tensiones (Mpa). Tijera del modelo inicial

Se observan para ambos modelos tensiones muy altas localizadas en zonas de unos pocos nodos.

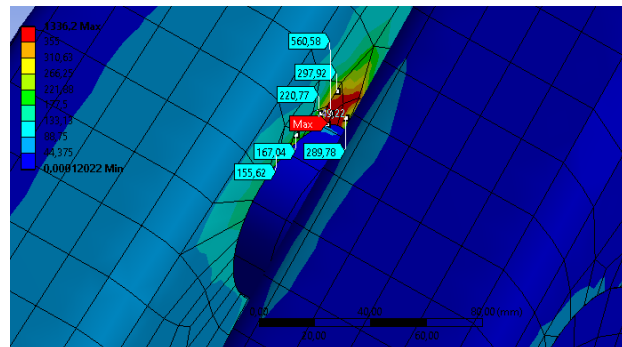


Figura 20. Tensiones nodales (Mpa). Tijera diseño inicial

Con el objetivo de restringir estas tensiones, se ha filtrado el valor de las mismas en función de la tensión de fluencia (355 Mpa). En el modelo optimizado se han añadido casquillos en los bulones para evitar estos concentradores de tensiones y mejorar la distribución de las mismas.

Analizando por separado las barras y bulones donde se dan las mayores tensiones (Barra EFG, estado inferior) y despreciando las tensiones máximas nodales, obtenemos unos coeficientes de seguridad de:

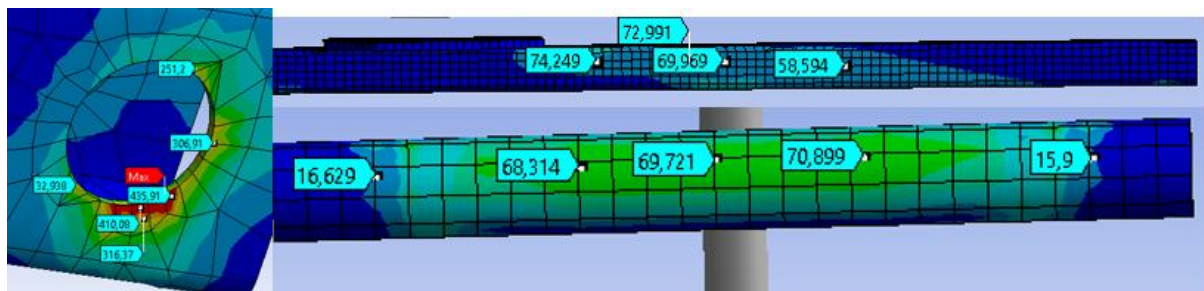


Figura 21. Tensiones máximas (MPa) bulón y barra. Posición superior

$$C_{s\text{Barra}} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{\text{nominal}}} = \frac{355 \text{ Mpa}}{74 \text{ Mpa}} = 4,8 ; C_{s\text{bulon}} = \frac{460 \text{ Mpa}}{69 \text{ Mpa}} = 6,7 ; C_{s\text{alojamiento}} = \frac{355 \text{ Mpa}}{435 \text{ Mpa}} = 0,81$$

Con el objetivo de mejorar el coeficiente de seguridad en los alojamientos, se han modelado casquillos que van soldados a éstos.

6.1.3 Resultados geometría optimizada

A continuación, se analizan los resultados en cuanto a tensiones y desplazamientos. En estas simulaciones se incluye el peso de la estructura.

6.1.3.1 Análisis de desplazamientos

Los desplazamientos horizontales máximos se dan en las barras que sirven como soporte de la plataforma de trabajo.

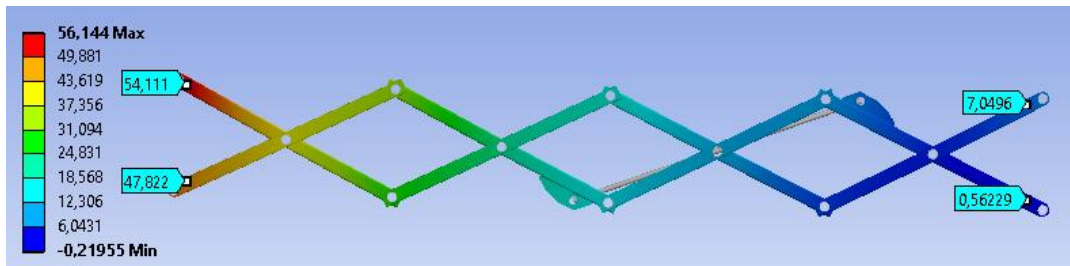


Figura 22. Desplazamientos horizontales (mm). Tijera diseño optimizado.

Para desplazamientos horizontales se considera que el desplazamiento total debe ser menor que $H/150$. Con H igual a 7396 mm , el desplazamiento debe ser menor que $49,3 \text{ mm}$. El desplazamiento global del modelo es de $54 - 7,05 = 46,95 \text{ mm}$. Valor de desplazamiento admisible.

Los desplazamientos verticales máximos se dan en las barras que sirven como soporte de la plataforma de trabajo.

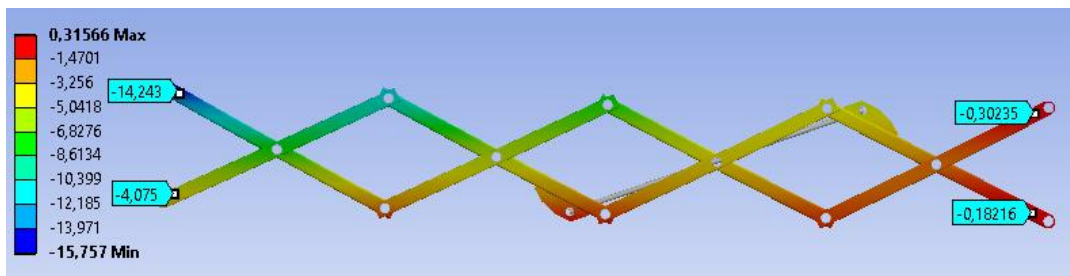
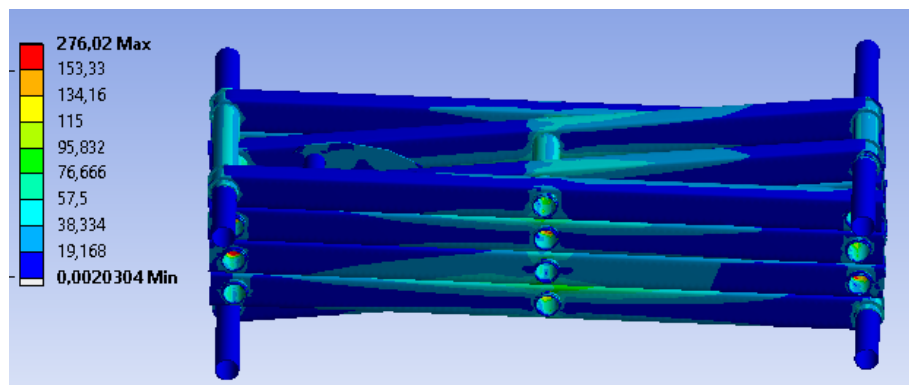


Figura 23. Desplazamientos verticales (mm). Tijera diseño optimizado.

Para desplazamientos verticales se considera que el desplazamiento local debe ser menor que $1/100$ de la estructura horizontal. Con L igual a 945 mm , el desplazamiento debe ser menor que $9,45 \text{ mm}$. El desplazamiento local del modelo es de $14,243 - 4,075 = 10,17 \text{ mm}$. Valor de desplazamiento admisible.

6.1.2.2 Análisis de Tensiones



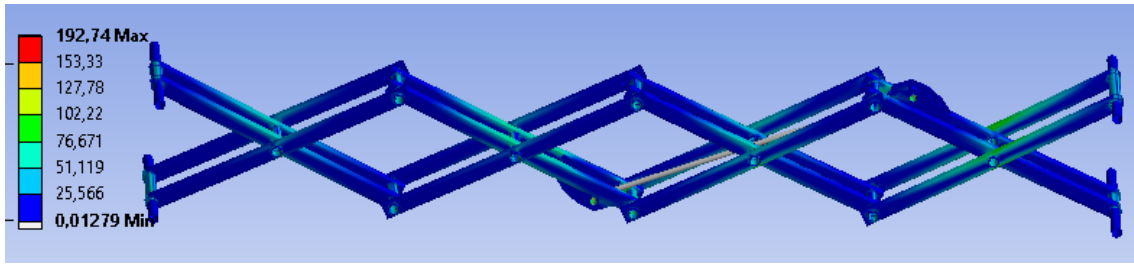


Figura 24. Tensiones (Mpa). Tijera del modelo inicial

A continuación, se van a analizar por separado las barras, bulones y casquillos donde se dan las mayores tensiones (Barra EFG) y se calculan los coeficientes de seguridad para comprobar si plastifican.

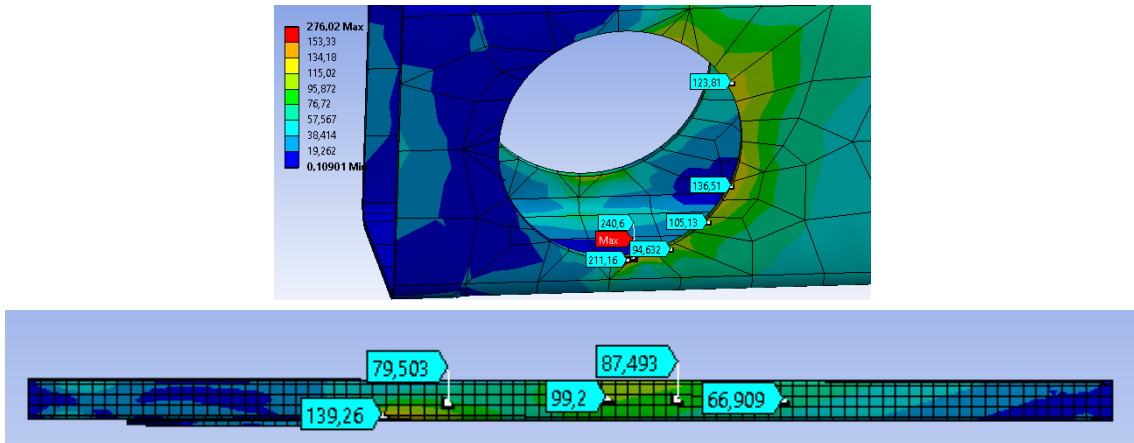


Figura 25. Tensiones máximas (MPa) Barra y Alojamiento. Posición superior.

$C_{sBarra} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{nominal}} = \frac{355 \text{ Mpa}}{139 \text{ Mpa}} = 2,55$; $C_{s,alojamiento} = \frac{355 \text{ Mpa}}{241 \text{ Mpa}} = 1,47$. Con estos resultados se verifica que las barras no plastifican para las tensiones máximas dadas.

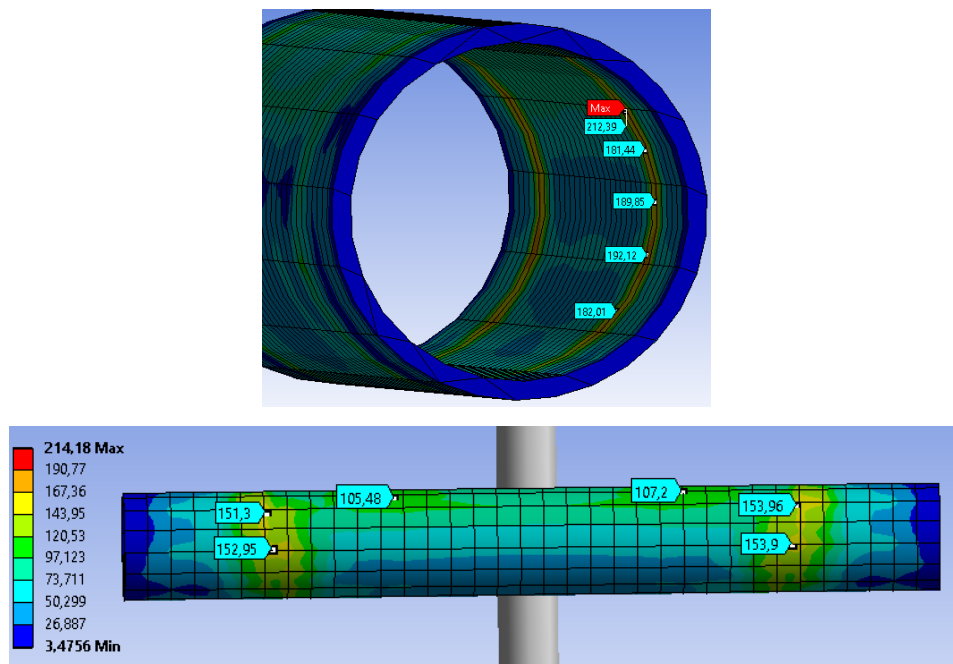


Figura 26. Tensiones Bulones. (Mpa). Tijera diseño optimizado

$C_{s_bulon} = \frac{460 \text{ Mpa}}{214 \text{ Mpa}} = 2,1$. Con estos resultados se verifica que los bulones no plastifican para las tensiones máximas dadas.

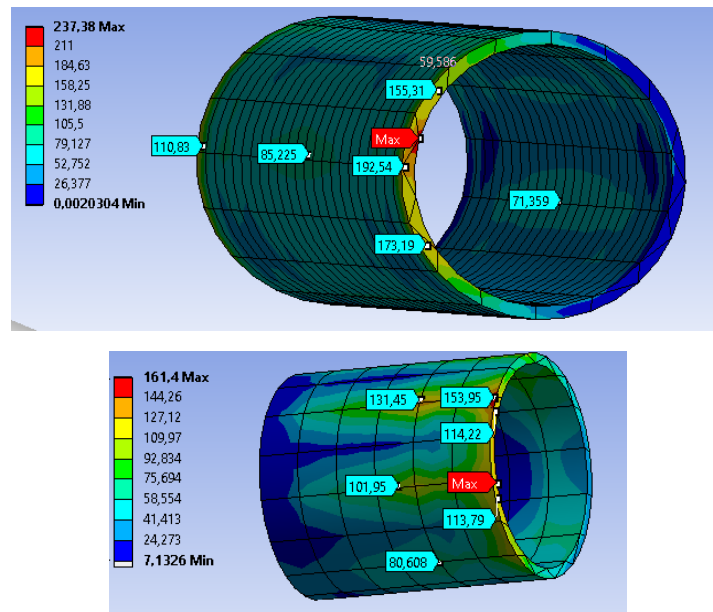


Figura 27. Tensiones Casquillos. (Mpa). Tijera diseño optimizado

$C_{s_Casquillo_Central} = \frac{460 \text{ Mpa}}{237 \text{ Mpa}} = 1,94$; $C_{s_Casquillo_lateral} = \frac{460 \text{ Mpa}}{161 \text{ Mpa}} = 2,85$. Con estos resultados se verifica que los bulones no plastifican para las tensiones máximas dadas. En cuanto al casquillo lateral se obtiene un coeficiente muy alto, por tanto se va a seleccionar un acero de menor calidad, $C_s = \frac{355 \text{ Mpa}}{161 \text{ Mpa}} = 2,2$.

6.2 Chasis

6.2.1 Modelo de Elementos Finitos

En este apartado se particulariza el procesado que se ha realizado para el modelo de la estructura extensible. La explicación de estos comandos esta detallada en la introducción de este apartado.

a) Contactos

Frictional: contactos entre los tacos y las guías.

Bonded: contactos entre los restantes elementos estructurales (guías, perfiles...)

b) Mallado

Método de hexaedros dominantes con elementos cuadráticos, para las guías, tacos y los perfiles que sustentas a las guías.

Método de barrido por hexaedros con elementos cuadráticos, para los casquillos de los ejes de las ruedas y para los perfiles inferiores donde se alojan las baterías, mandos...

En los alojamientos de los tacos, guías y perfiles se ha hecho un sizing de la malla a 8 mm con el objetivo de afinar el mallado en la zona del contacto.

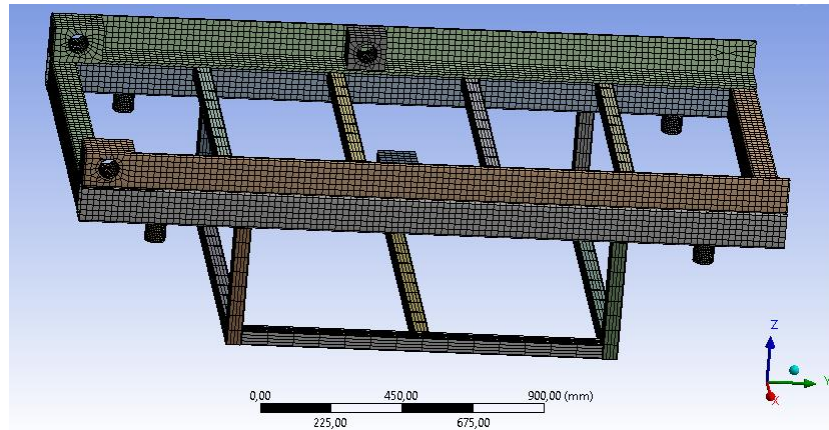


Figura 28. Mallado del chasis

c) Cargas y condiciones de contorno.

En los casquillos que sirven como alojamientos a los ejes de las ruedas y que van soldados al chasis solo se ha permitido la rotación en el eje axial del casquillo (eje Z)

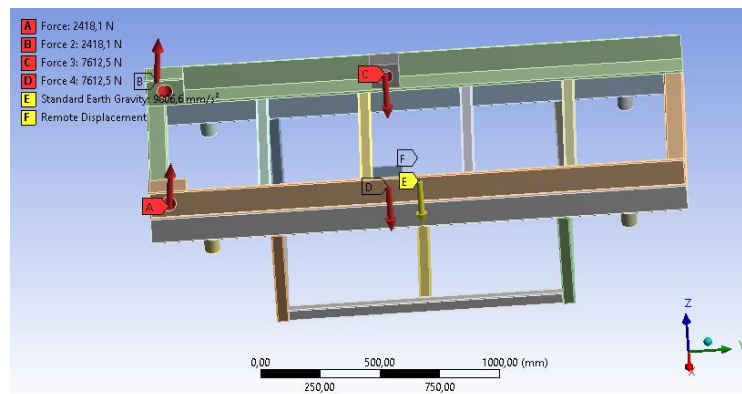
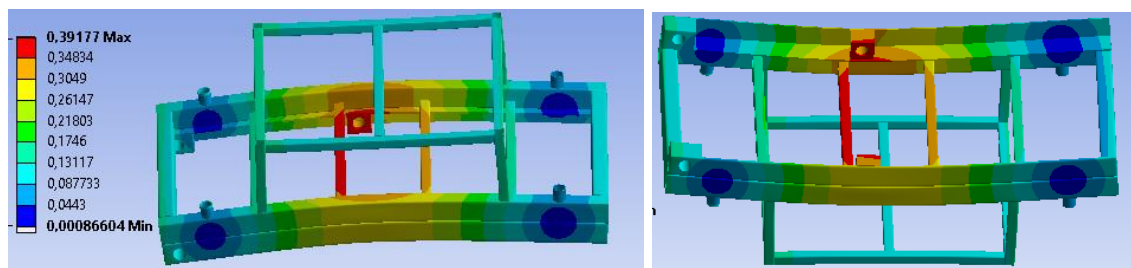


Figura 29. Fuerzas y apoyos en el chasis

6.2.2 Resultados

A continuación, se analizan los resultados en cuenta a tensiones y desplazamientos, en estas simulaciones se incluye el peso de la estructura.

6.2.2.1 Análisis de Desplazamientos



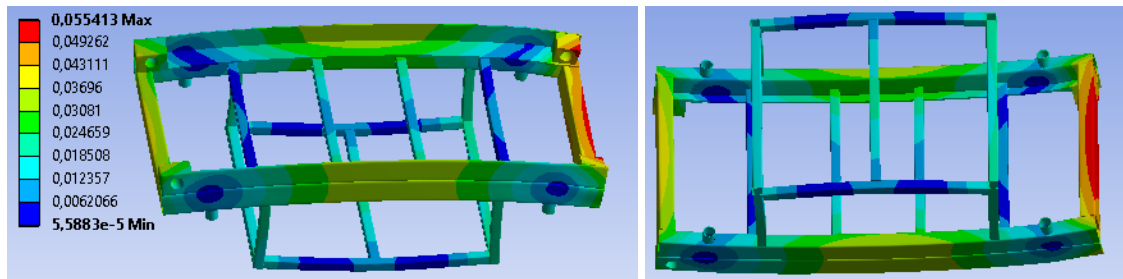


Figura 30. Desplazamientos (Mpa). Posición superior e inferior

Los resultados en cuanto a desplazamientos son muy bajos en comparación con las dimensiones del chasis. Por tanto, no se aplica ningún criterio para su estudio.

6.2.2.2 Análisis de Tensiones

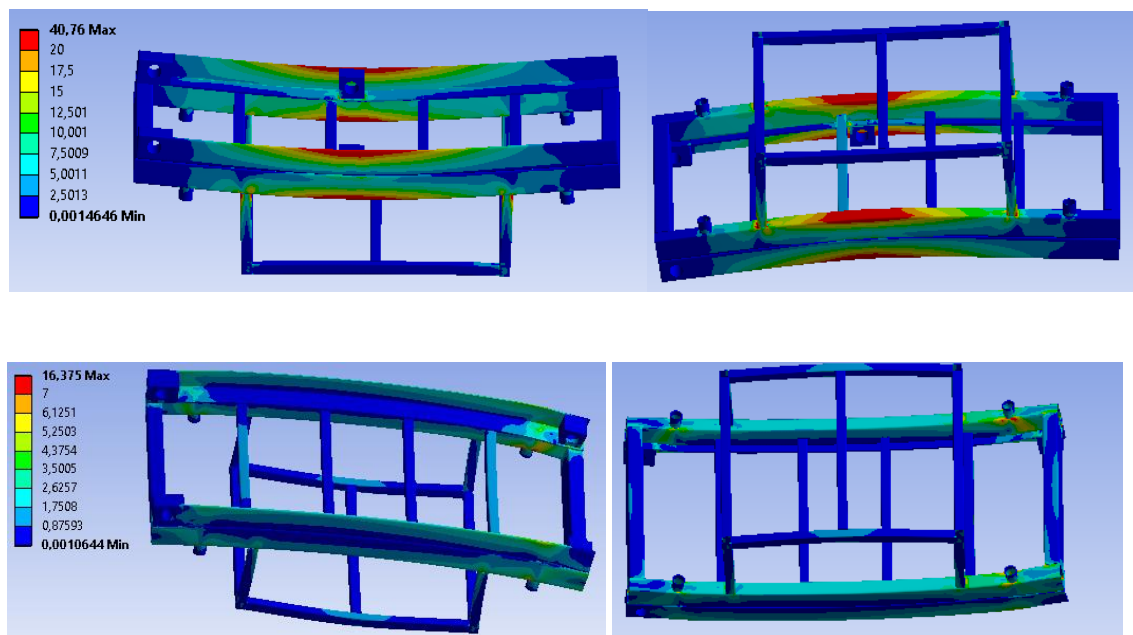


Figura 31. Tensiones (Mpa). Posición superior e inferior

Las tensiones máximas se dan en estado superior para las guías y las vigas que las sustentan. A continuación, se va a estudiar el coeficiente de seguridad de ambos componentes con el fin de verificar que no plastifique.

$$C_s = \frac{\sigma_f}{\sigma_{nominal}} = \frac{355 \text{ Mpa}}{40,76 \text{ Mpa}} = 8,7$$

Los largueros se dimensionaron con una sección rectangular hueca de 120x80x5. Las guías son las mismas que se dimensionaron para el apartado 3.2.5

El material asignado es un acero S355N, es más que suficiente para evitar que plastifiquen, incluso se podrían dimensionar las vigas para un perfil menor. Aplicando un acero S275 de menor tensión de fluencia que el elegido, se tiene $C_s = \frac{275 \text{ Mpa}}{40,76 \text{ Mpa}} = 6,74$

En líneas futuras se optará por redimensionar los perfiles del chasis con el objetivo de abaratar costes y peso de la PEMP.

6.3 Plataforma de trabajo

6.3.1 Modelo de Elementos Finitos

En este apartado se particulariza el procesado que se ha realizado para el modelo de la estructura extensible. La explicación de estos comandos está detallada en la introducción de este apartado.

a) Contactos

Frictional: contactos entre los tacos y las guías.

Bonded: contactos entre los restantes elementos estructurales (guías, perfiles, chapa...)

b) Mallado

Método de hexaedros dominantes con elementos cuadráticos, para las guías, los tacos y la chapa

Método de barrido por hexaedros con elementos cuadráticos para los perfiles de las barandillas y largueros de la chapa

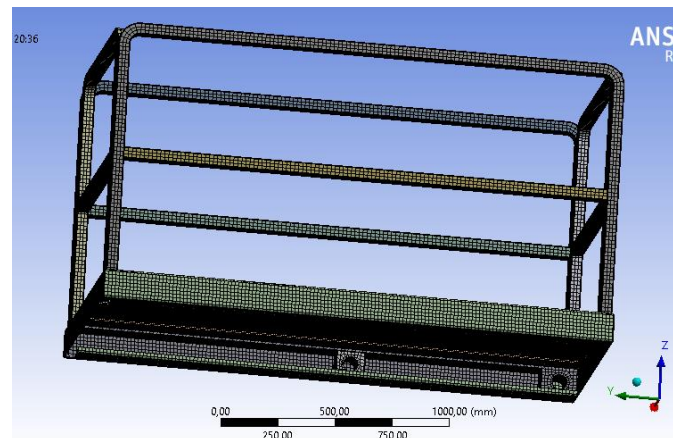


Figura 32. Mallado de la plataforma de trabajo

c) Cargas y condiciones de contorno.

En los apoyos de los bulones con la guía solo se ha permitido la rotación en el eje axial del bulón (eje X)

En los apoyos de los bulones con los tacos que van sobre la guía se ha permitido tanto la rotación en el eje axial, como la traslación sobre la guía (eje Y)

Para la simulación del estado tensional, se han introducido las cargas vistas en la norma (apartado 1) como fuerzas en puntos remotos (remote points). Estos puntos se han ubicado en las distancias marcadas por la norma. Por el contrario, para simular la carga debida al viento se ha introducido la presión del viento (100 N/m por norma) en todas las superficies expuestas consideradas en el apartado 1.

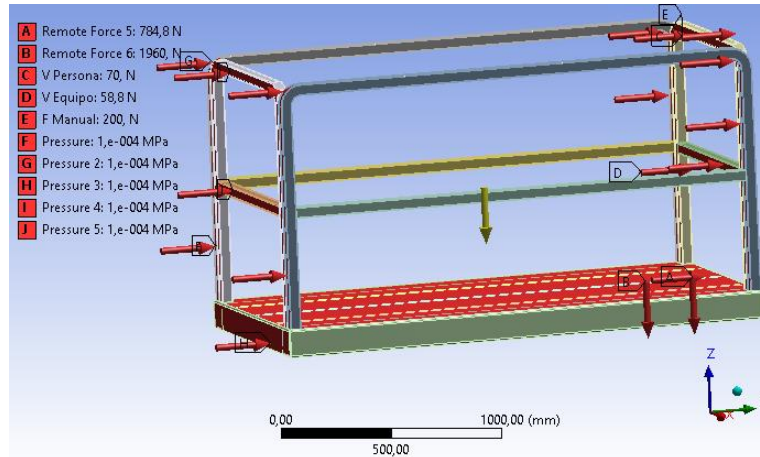


Figura 33. Fuerzas en la plataforma de trabajo

6.3.2 Resultados

A continuación, se analizan los resultados en cuenta a tensiones y desplazamientos, en estas simulaciones se incluye el peso de la estructura. Los resultados son bastante similares para los dos estados (superior e inferior). No obstante, para el caso superior se da la situación más desfavorable, por lo que se analizan los resultados para este último caso.

6.3.2.1 Análisis de Desplazamientos

Los desplazamientos verticales máximos se dan en la chapa donde actúan las cargas del equipo y el peso del operario.

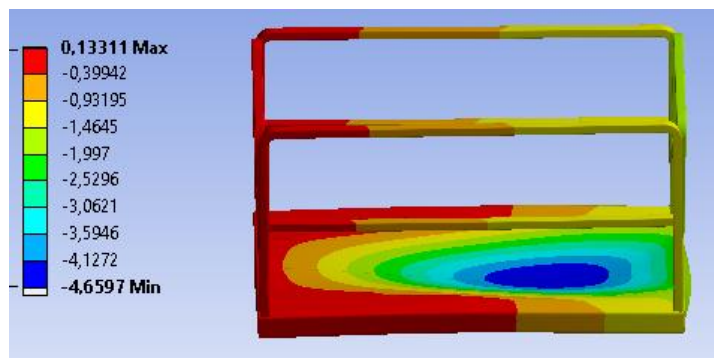


Figura 34. Desplazamientos verticales (mm). Plataforma de trabajo

Para el desplazamiento vertical se considera que el desplazamiento máximo debe ser menor que 1/100 de la estructura horizontal. Con L igual a 1146 mm, el desplazamiento debe ser menor que 11,46 mm. El desplazamiento vertical máximo de la chapa es de 4,65 mm. Valor de desplazamiento admisible.

Los desplazamientos horizontales máximos se dan en las barandillas donde actúa la presión generada por el viento.

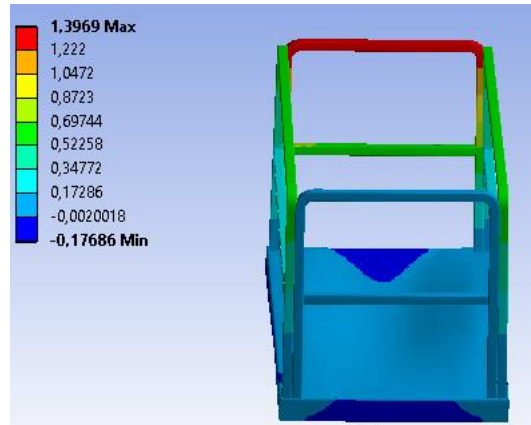


Figura 35. Desplazamientos horizontales (mm). Plataforma de trabajo

Para desplazamientos horizontales se considera que el desplazamiento total debe ser menor que $H/150$. Con H igual a 1100 mm , el desplazamiento debe ser menor que $7,3 \text{ mm}$. El desplazamiento horizontal máximo en la barandilla es de $1,4 \text{ mm}$. Valor de desplazamiento admisible.

6.3.2.2 Análisis de Tensiones

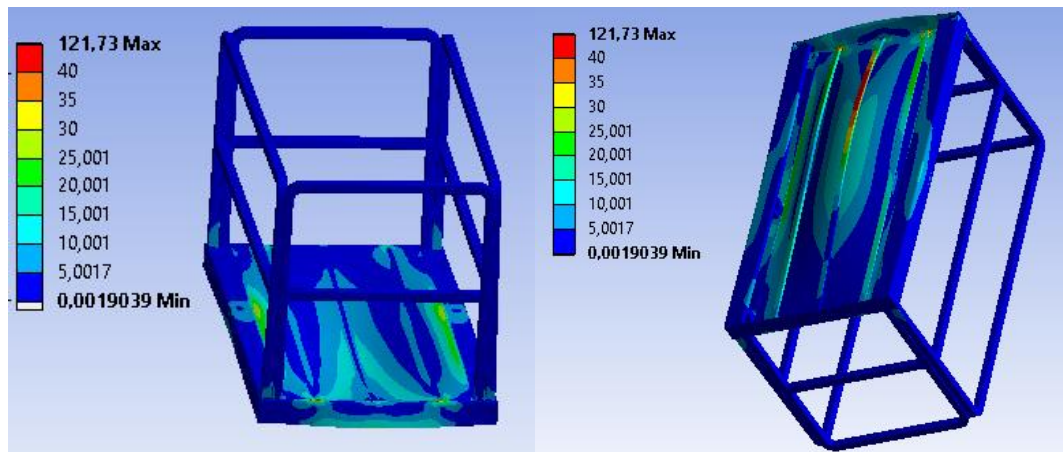


Figura 36. Desplazamientos horizontales (mm). Plataforma de trabajo

Las mayores tensiones se dan en los largueros y en su punto de unión con la chapa, por ello se va a analizar el coeficiente de seguridad para verificar que no plastifiquen.

$$C_s = \frac{\sigma_f}{\sigma_{nominal}} = \frac{355 \text{ Mpa}}{121,17 \text{ Mpa}} = 2,93.$$
 Con los resultados de tensiones obtenidos en Ansys, un acero S355N es suficiente para evitar que plastifiquen. Los largueros se han dimensionado con una sección rectangular hueca de $40 \times 20 \times 3$ y la chapa tiene un espesor de 4 mm .

6.4 Pandeo de la estructura extensible

Para el estudio de pandeo se parte de los resultados obtenidos en la estructura extensible. Estos resultados establecen las cargas y condiciones de contorno del modelo para pandeo.

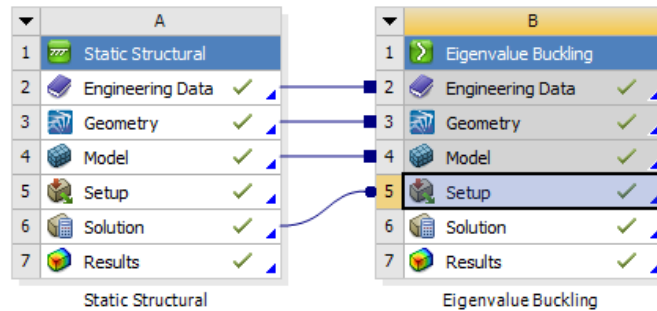


Figura 37. Pandeo en Workbench

La simulación es no lineal debido a los contactos friccionales, por lo que el parámetro de carga obedece a la siguiente expresión $(1 + \lambda) * F$. Este parámetro se interpreta como el factor de seguridad de pandeo respecto a la carga que actúa, por tanto, $(1 + \lambda)$ debe ser mayor que la unidad para que la estructura no pandee.

En la simulación se han obtenido dos modos de pandeo para la estructura.

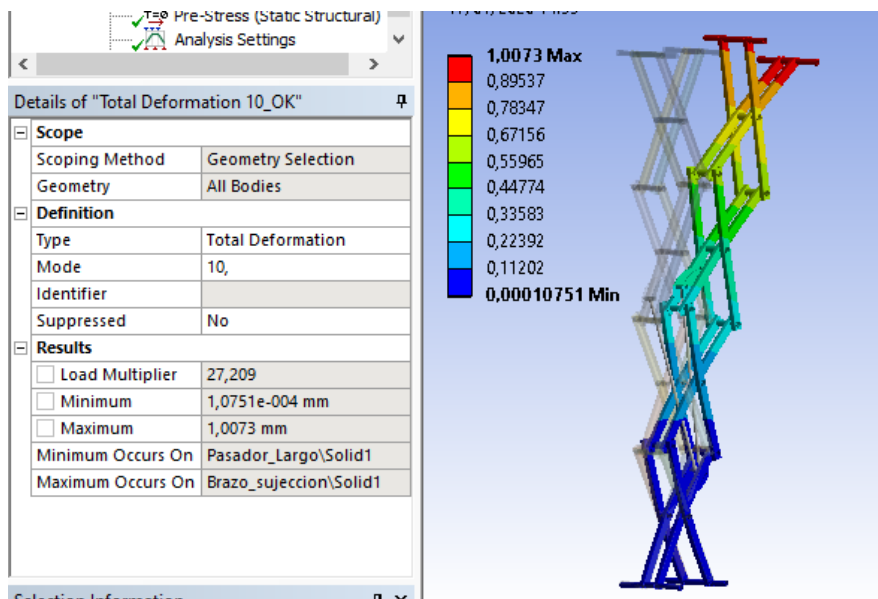


Figura 38. Modo 1 de pandeo

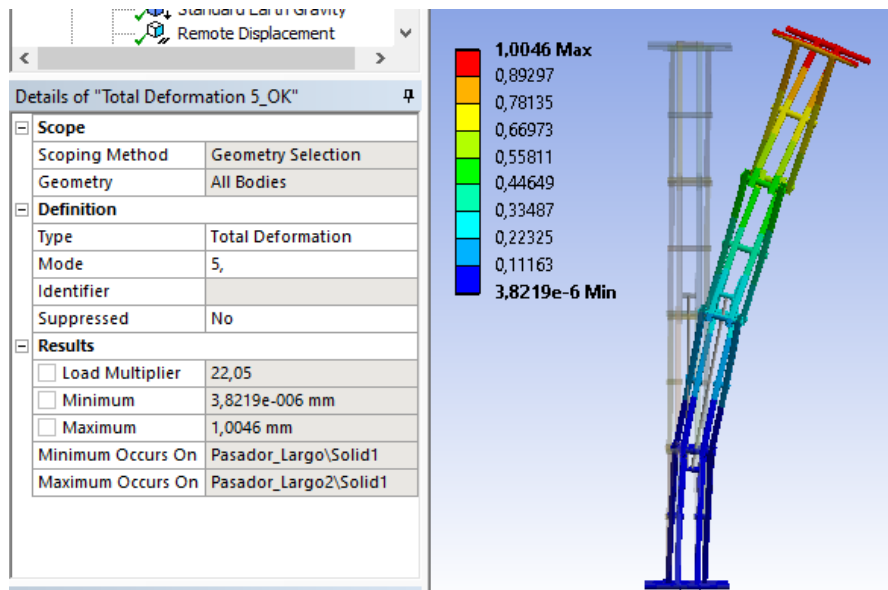


Figura 39. Modo 2 de pandeo

Se han obtenido unos parámetros de pandeo de 22 y 27, es decir, la estructura pandeará para una carga de trabajo de más veinte veces mayor a la que solicita la estructura.

6.5 Selección del cilindro hidráulico

El sistema elegido para transmitir el empuje de la plataforma es un cilindro hidráulico y la fuerza máxima que desarrollará es la que se da en los puntos de anclaje O y P analizados anteriormente, ésta es máxima cuando la plataforma está replegada.

Como se ha visto en el apartado 6.1, la fuerza máxima que desarrolla el cilindro se da en el estado activo del mismo. Por ello a la fuerza de trabajo máxima hay que sumarle la fuerza de rozamiento que debe vencer éste para empezar el movimiento, $F_{max} = 51458 + 7803 = 57916$ N.

La carrera que desarrolla el vástago es la diferencia entre la longitud del cilindro extendido y comprimido e igual a $2583\text{ mm} - 1584\text{ mm} = 999\text{ mm}$

Tomando como referencia la presión de la bomba dada por algunos fabricantes de plataformas de tijera similares a la desarrollada en este trabajo, se tiene:

Bomba de funciones	
Tipo	Engranajes
Desplazamiento por revolución	4 cc
Caudal a 172 bares	15 l/min

Tabla 19. Presión bomba [8]

Donde la presión de avance necesaria para el cilindro es: $P = F_{max}/A_{av}$ con $A_{av} = \frac{\pi \cdot d_{pistón}^2}{4}$, el diámetro del pistón es $64,85\text{ mm}$

A continuación, se muestra un catálogo comercial para seleccionar los diámetros del pistón y del vástago, puesto que el cilindro se adquirirá comercialmente.

CARACTERÍSTICAS										
Norma	ISO 6020/2 - 1991 DIN24554									
Tipo de construcción	Tapas y fijaciones con tirantes									
Presión mínima	15 bar									
Presión nominal	180 bar									
Presión de prueba	240 bar									
Posición de montaje	s/pedido									
Temperatura de fluido	-20°C + 80°C con juntas tipo M									
	-20°C + 150°C con juntas tipo W									
Fluido	Aceite mineral									
Viscosidad	12...90 m.m ² ./s									
Filtración	Grado de filtración según NAS 1638									
Tipo de estanqueidad	Ver código para pedido									
Ø Camisa - Pistón (m/m)	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
Ø Vástago	12/18	14/22	18/28	22/36	28/45	36/56	45/70	59/90	70/110	90/140
Velocidad max. (m/s) tipo M	0,5			0,4			0,25			
Velocidad max. (m/s) tipo Y	1						0,7			
Tolerancia para carrera	0 + 2 mm Norma ISO 8131									
Carrera máxima	4000 mm									

Tabla 20. Características cilindro [9]

El diámetro del pistón más próximo al dimensionado es de 80 mm. A continuación, se selecciona el diámetro del vástago a partir de la gráfica dada por el fabricante. Para ello, es necesario definir, la fuerza de trabajo del cilindro (conocida y de valor 57916 N), su coeficiente de seguridad (3) y la longitud virtual. Ésta viene dada por la expresión $\alpha * L$, donde α depende del método de sujeción empleado en su montaje y L es la carrera del cilindro e igual a 999 mm.

El tipo de conexión para el cilindro es el definido en el tipo VI (Figura 41), por tanto $\alpha = 2$ y longitud virtual 1998 mm.

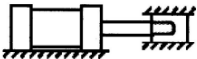
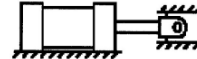
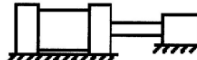


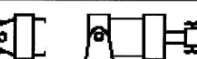
Tipos de montaje	Conexión del extremo del vástago	Tipo de conexión	Factor de pandeo
Grupos 1 o 3 - Los cilindros de gran longitud de carrera deben montarse usando en un extremo una base rígida y alineada para soportar la fuerza principal y en el extremo opuesto un soporte parecido. Se aconseja un soporte intermedio para el caso de carreras muy largas	Fijo y guiado rígido	I 	0,5
	Pivote y guiado rígido	II 	0,7
	Soporte sin guiado rígido	III 	2
Grupo 2	Pivote y guiado rígido	IV 	1
	Pivote y guiado rígido	V 	1,5
	Pivote y guiado rígido	VI 	2

Figura 40. Tipo de montaje del cilindro hidráulico [10]

El diámetro de vástago seleccionado según la gráfica es de 56 mm

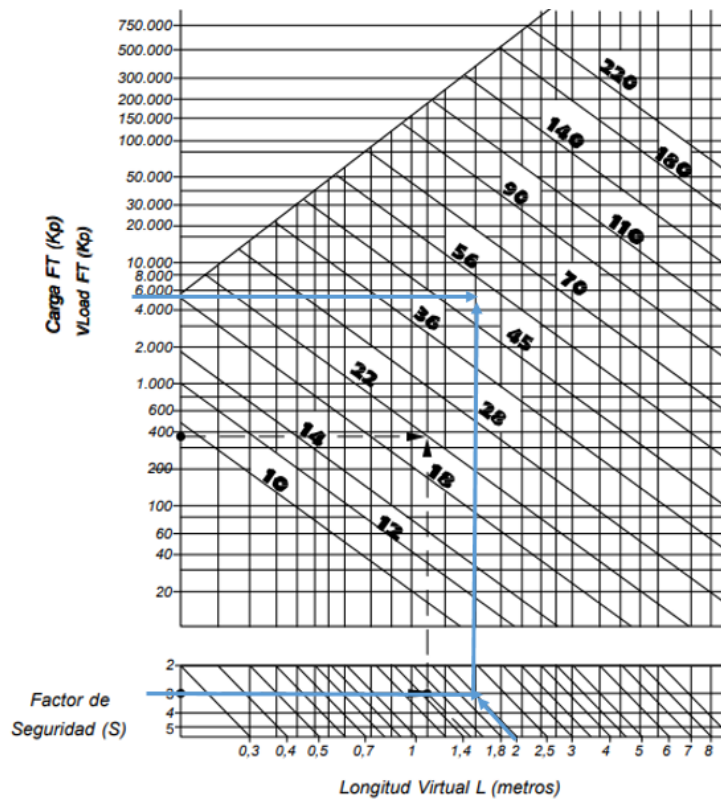


Figura 41. Selección del diámetro del vástago [11]

Por último, se comprueba que la presión de trabajo del cilindro escogido es menor que la dada por el fabricante (180 bar), asegurando la resistencia a pandeo del cilindro.

$$P = \frac{F_{max}}{A_{av}} \text{ con } A_{av} = \frac{\pi \cdot d_{pistón}^2}{4}, \quad P = \frac{57916 \text{ N}}{\pi \cdot 80^2 \text{ mm}^2 / 4} = 11,52 \text{ Mpa} = 115,2 \text{ bares}$$

El cilindro escogido tiene un diámetro de pistón de 80 mm, un diámetro de vástago de 56 mm y una presión de trabajo de 116 bares.

7. Conclusiones y desarrollo futuro

El objetivo de este trabajo era realizar un diseño conceptual de una PEMP de tijera, de acuerdo a la norma UNE-EN 280. Para ello se realizó un cálculo analítico, un modelado de todas y cada una de las piezas estructurales y por último un análisis EF de los ensamblajes estructurales (chasis, estructura extensible y plataforma de trabajo). Obteniendo como resultado una PEMP que cumple con la Norma UNE-EN 280 en cuanto a cálculos estructurales y de estabilidad.

Se comenzó con un diseño inicial, basado en PEMP's comerciales, cuya estructura extensible, aunque cumplía ampliamente los requisitos de carga, presentaba algún problema como tensiones altas en las zonas donde los bulones se ensamblan a las barras de la estructura. Este diseño inicial se optimizó y se puso solución a estos problemas, obteniendo el modelo final, el cual, con secciones de perfiles óptimos, cumple el objetivo para el que se diseñó, tanto analíticamente como en el estudio EF.

7.1 Conclusiones

Las conclusiones obtenidas del presente trabajo son las siguientes:

- Se ha diseñado una PEMP que cumple los requisitos estructurales recogidos en la Norma UNE-EN 280
- El diseño inicial pudo optimizarse gracias a la disposición de casquillos para alojar los bulones, que mejoraron el reparto de tensiones con respecto a alojar directamente los bulones en los perfiles estructurales, permitiendo además reducir las secciones de la estructura extensible.
- El rozamiento producido entre los bulones y los casquillos produce un incremento de la fuerza sobre la teórica (sin rozamiento) que el cilindro tiene que ejercer para empezar a poner en movimiento la estructura

7.2 Líneas futuras

- Realización de un estudio de fatiga de la estructura mediante Ansys. Este estudio está recogido en la Norma.
- Redimensionamiento del chasis, puesto que el coeficiente de seguridad obtenido es muy alto. Se podrían optimizar las secciones de los perfiles o diseñar el chasis mediante chapa plegada.
- Elaboración de planos técnicos.

Bibliografía

Norma UNE-EN 280:2014+A1:2016. Plataformas elevadoras móviles de personal

James M. Gere. Timoshenko. Resistencia de Materiales. 5ª Edición, 2018. Paraninfo.

Sergio Gómez González. El gran libro de SolidWorks. 3ª Edición, 2019. Marcombo

Documento Básico SE Seguridad estructural. Ministerio de Fomento. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. 20 diciembre 2019

Instrucción Acero Estructural EAE. Capítulo VI. Comisión Permanente de Estructuras de Acero. Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana. Gobierno de España

Referencias de figuras y tablas.

[1] [2] [7]. Norma UNE-EN 280:2014+A1:2016. Plataformas elevadoras móviles de personal.

[3]. http://www.hierrosleitza.com/upload/secciones-publicas/dimensiones-nominales-y-caracteristicas_1_original.pdf

[4]. Instrucción Acero Estructural EAE. Capítulo VI. Comisión Permanente de Estructuras de Acero. Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana. Gobierno de España. Pág. 99.

[5] [6]. <https://ingemecanica.com/tutoriales/prontuariodeperfiles.html>

[8]. Genie. Manual de mantenimiento.GS-1530 a GS-3246. Pág. 17.

[9] [11]. <http://static.plenummedia.com/35586/files/20180403115201-cilindros-hidraulicos--iso6620-2-catalogo-general.pdf>. Pag 6-8.

[10] <https://neumaticahidraulica.files.wordpress.com/2011/04/sesion-6.pdf>. Pág. 11