

Trabajo Fin de Grado

Análisis y cálculo de la estructura de una
plataforma elevadora móvil de personal (PEMP)

MEMORIA

Autor/es

Víctor Ruiz Garrido

Director/es

Óscar Javier Abad Blasco

Escuela de Ingeniería y arquitectura. Universidad de Zaragoza.

2016/2017



Análisis y cálculo de la estructura de una plataforma elevadora móvil de personal (PEMP).

RESUMEN

En el siguiente trabajo de fin de grado vamos a abordar el análisis y cálculo de una plataforma elevadora móvil de personal (PEMP), para ello, va a tomarse como referencia la elevadora de la marca Haulotte Group modelo Compact 10.

Para la realización del trabajo se van a usar una serie de herramientas informática de diseño asistido por ordenador, en este caso "AutoCAD 2016" para diseño en 2D y "SolidWorks 2016" para diseño tridimensional, así como herramientas matemáticas como el programa "EES (Engineering Equation Solver)" para la resolución de las múltiples ecuaciones que se afrontaran a lo largo del proyecto. Además nos apoyaremos en hojas de cálculo mediante el software "Excel" de Microsoft Office.

Dicho trabajo consta de una **memoria resumen**, en la que se presenta el objetivo del proyecto y se expone un resumen de los anexos, y de **tres anexos** en los cuales se expondrá de manera extensa todo el trabajo realizado.

El trabajo lo podemos dividir en las siguientes fases.

- Introducción y presentación del proyecto
- Análisis geométrico y modelado en 2D de la tijera del mecanismo de elevación de la plataforma elevadora.
- Cálculo de las reacciones y comprobación de las propiedades mecánicas de los componentes de la PEMP.
- Selección de los perfiles a partir de los resultados obtenidos en los cálculos previos.
- .Introducción, cálculo y dimensionamiento del pistón, así como de la bomba de accionamiento del sistema hidráulico.
- Modelado, y ensamblaje de los componentes principales de la plataforma elevadora en 3D mediante el software "SolidWorks 2015" .
- Cálculo y optimización de la plataforma elevadora móvil de personal.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____



ÍNDICE

1. Introducción	4
1.1 Objeto y alcance del proyecto	4
1.2 Motivación.....	5
1.3 Conocimientos aplicados en el TFG	5
1.4 Necesidad	6
2. Plataforma elevadora móvil de personal	7
2.1 ¿Qué es una PEMP?	7
2.2 Clasificación.....	7
2.3 Características	9
2.4 Partes de una plataforma.....	11
2.5 Riesgos y medidas de seguridad.....	12
3. Planteamiento inicial del proyecto	15
4. Análisis de la geometría de la PEMP	17
5. Coeficiente de seguridad y teorías de fallo	18
6. Cálculos mecánicos iniciales	20
6.1 Dimensionamiento de las barras.....	22
6.2 Dimensionamiento de los pasadores.....	23
7. Sistema hidráulico del pistón	25
7.1 Diámetro del vástago	25
7.2 Diámetro del pistón	26
7.3 Espesor de la camisa	27
7.4 Bomba de accionamiento	28
8. Simulación en SolidWorks	29
9. Conclusiones	30
9.1 Conclusiones del proyecto	30
9.2 Aporte del Proyecto	30
9.3 Futuras líneas de investigación	31
10. Anexo I. Cálculos mecánicos	31
11. Anexo II. Sistema hidráulico	31
12. Anexo III. Modelado y simulación en SolidWorks	31
13. Bibliografía.....	32



1. Introducción

1.1 Objeto y alcance del proyecto.

En este trabajo se ha llevado a cabo el estudio, diseño, cálculo, análisis y optimización de los elementos móviles de una Plataforma Elevadora Móvil de Personal (PEMP) cumpliendo en todo momento la normativa marcada para este tipo de elevadoras.

Para comenzar, se realizara un boceto en 2D en el cual todavía no tendremos en cuenta los perfiles de los elementos a estudiar, ya que interesa únicamente la geometría para entender a la perfección el funcionamiento del sistema de elevación. Para ello hemos tomado como referencia la PEMP Compact 10 de Houlutte Group.

A continuación, se plantean las distintas posiciones de elevación de la PEMP así como las distintas posibilidades de carga y posición de esta sobre la zona de trabajo. Para cada uno de estos casos se calculan las reacciones entre los elementos provocados por las distintas situaciones de carga y elevación. Con ello, podremos definir los diagramas de esfuerzos de los elementos barra y así poder seleccionar los perfiles adecuados. Además se llevará a cabo un análisis de las uniones para dimensionar los pasadores y los espesores de la piezas que lo soportan. Así pues se realizaran cálculos de flexión aplastamiento y cortadura.

Independientemente se realizará un estudio del sistema hidráulico de la PEMP. Aquí se explicaran las distintas partes que forman el conjunto del sistema y se calculara y dimensionara el cilindro hidráulico necesario para la elevación de las tijeras del mecanismo. Del mismo modo, se seleccionara la bomba que permita suministrar el caudal y la presión necesarios al pistón.

Por último, se procederá a realizarse el modelado de la estructura en SolidWorks con el objetivo de comprobar los resultados analíticos así como para optimizar en la medida de lo posible el diseño y encontrar los puntos más débiles del sistema.



1.2 Motivación.

Mi elección sobre este tema en el Trabajo Fin de Grado se debe principalmente a la combinación de mi interés por la maquinaria de obra y la búsqueda del entendimiento de las estructuras móviles, como es este caso las tijeras de elevación de la plataforma.

1.3 Conocimientos aplicados en el TFG.

A lo largo del desarrollo del proyecto se van a aplicar diferentes conocimientos que han sido adquiridos a lo largo de estos años en las diversas asignaturas del Grado. Aquellas que más aportación tienen sobre este presente proyecto son las siguientes:

- **Resistencia de Materiales:** Aporta los conocimientos del cálculo de barras que están sometidas a unos determinados esfuerzos, ya sean tracción, compresión, flexión o pandeo de estas. Mediante dichas cargas, realizamos los diagramas de esfuerzos para interpretar de una forma más sencilla el comportamiento de las barras.
- **Estructuras:** Proporciona las bases para el entendimiento de un conjunto formado por elementos tipo barra, así como las diversas matrices necesarias para realizar los cambios de base.
- **Teoría de máquinas y mecanismos:** Asignatura de gran utilidad para adquirir los conocimientos sobre los desplazamientos geométricos de un elemento en un conjunto, así como sus grados de libertad asegurando de este modo la resolución del sistema.
- **Mecánica:** Aporta las bases para la realización de los diagramas de sólido libre, así como las ecuaciones necesarias para la resolución del equilibrio del sistema.
- **Criterios de diseño de máquinas:** Engloba en general los conocimientos aplicados en la realización de los cálculos analíticos presentes en el proyecto, desde la selección de perfiles, hasta el cálculo de uniones...
- **Cálculo y selección de elementos de máquinas:** Proporciona las bases para la realización del modelado 3D y simulación mediante elementos finitos del conjunto mediante el software SolidWorks.



1.4 Necesidad.

A la hora de realizar operaciones de mantenimiento, reparación, limpieza y construcción de edificios, las plataformas elevadoras suponen una gran ayuda para efectuar dichas operaciones.

El uso de una plataforma elevadora móvil, puede suponer algunas ventajas como se menciona a continuación:

- Una vez disponemos de la plataforma en el emplazamiento de la obra o lugar de trabajo, no sería necesario el montaje de andamiaje provisional para la realización de las tareas.
- Debido a su gran versatilidad, se puede variar sin problemas la altura de trabajo con gran facilidad, y todo ello sin depender de la ayuda de operarios.
- A pesar de su tamaño, se trata de una máquina con gran rigidez. Esto proporciona al operario encargado de su manejo una gran sensación de seguridad.

Debido al cambio en el uso, pasando de usarse principalmente en la construcción a otros sectores, es previsible que la tendencia sea adquirir más plataformas telescópicas que de tijera debido a la versatilidad de las primeras.



2. Plataforma Elevadora Móvil de Personal

2.1. ¿Qué es una PEMP?

La norma UNE EN 280:2014 define “Plataforma elevadora móvil de personal (PEMP)” como “Una máquina móvil destinada a desplazar personas hasta una posición de trabajo, con una única y definida posición de entrada y salida de la plataforma; está constituida como mínima por una plataforma de trabajo con órganos de servicio, una estructura extensible y un chasis”.

Existen plataformas sobre camión articuladas y telescópicas, autopropulsadas de tijera, autopropulsadas articuladas o telescópicas y plataformas especiales remolcables entre otras.

2.2. Clasificación

Según la norma UNE EN 280:2014, podemos dividir las PEMP 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.
- **Grupo B:** PEMP en las que la proyección vertical del centro de gravedad de la carga puede estar en el exterior de las líneas de vuelco.

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.



Debemos entender las líneas de vuelco como las líneas que componen el cuadrado o rectángulo, según el caso, que limitan exteriormente a los elementos de apoyo, ya se trate de ruedas o estabilizadores; las ilustraciones 1, 2 y 3 plasman esta idea. Por tanto, serán plataformas de grupo A las de tijera o las de mástil vertical, mientras que pertenecen al grupo B las plataformas articuladas (generalmente de brazo telescópico).

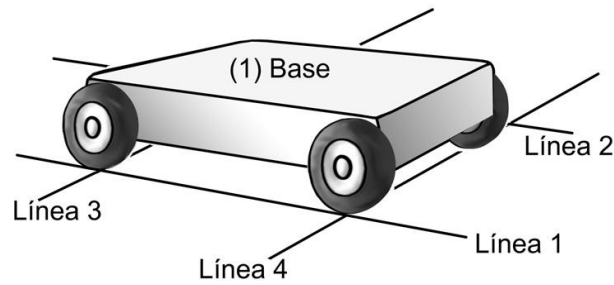


Figura 1- Configuración de vuelco Tipo 1

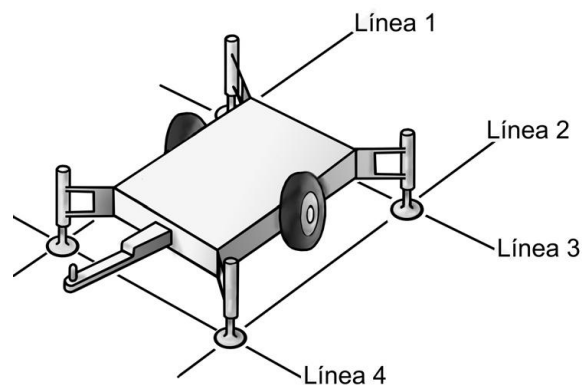


Figura 2- Configuración de vuelco Tipo 2

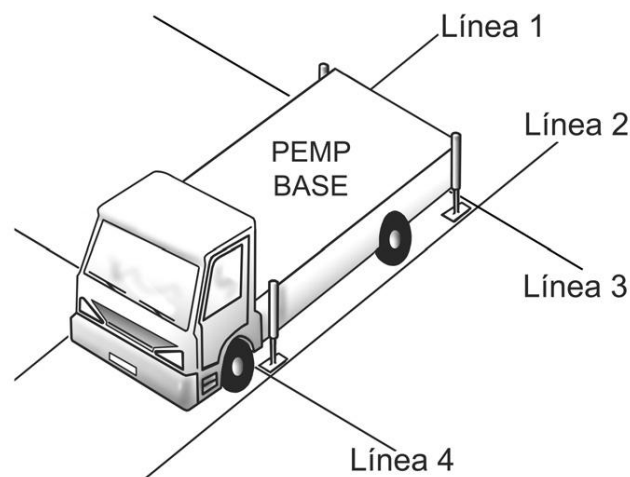


Figura 3- Configuración de vuelco Tipo 3



2.3. Características.

Dados los criterios establecidos por la NTP*634: "Plataformas elevadoras móviles de personal" las plataformas pueden tener unas características específicas por las cuales son clasificadas.

*Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Plataformas sobre camión articuladas o telescópicas:

Este tipo de plataformas se utiliza especialmente para trabajos en el exterior y a gran altura, como pueden ser labores de mantenimiento, reparaciones o tendidos eléctricos... Esta formada por un brazo articulado capaz de elevarse hasta alturas cercanas a los 70m y poder rotar desde la base 360 grados. La plataforma puede ser utilizada por tres personas como máximo.



Figura 4- Plataforma sobre camión articulada y telescópica

Plataformas autopropulsadas de tijeras:

Al igual que la anterior, este tipo de plataformas se utiliza para trabajos de mantenimiento, montajes industriales e instalaciones eléctricas. La plataforma se caracteriza por poseer una elevación vertical con un alcance máximo de 25 m, así como una gran capacidad de personas y material de trabajo debido a su cesta de gran tamaño.

La fuente de alimentación puede ser un motor de combustión o baterías.

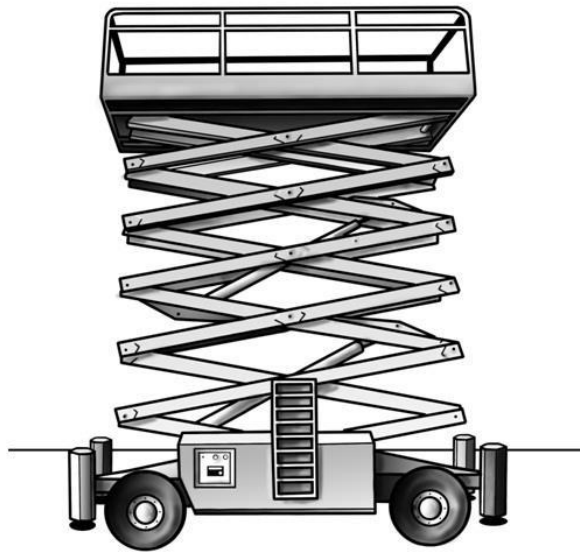


Figura 5- Plataforma autopropulsada de tijeras

Plataformas autopropulsadas articuladas o telescópicas:

Este tipo de plataformas elevadoras son usadas para trabajos en zonas con difícil acceso. Pueden ser de brazo articulado y sección telescópica o solo telescópica con alcances que pueden superar los 40 m. Al igual que el resto de plataformas pueden estar alimentadas tanto por baterías como por un motor de combustión.

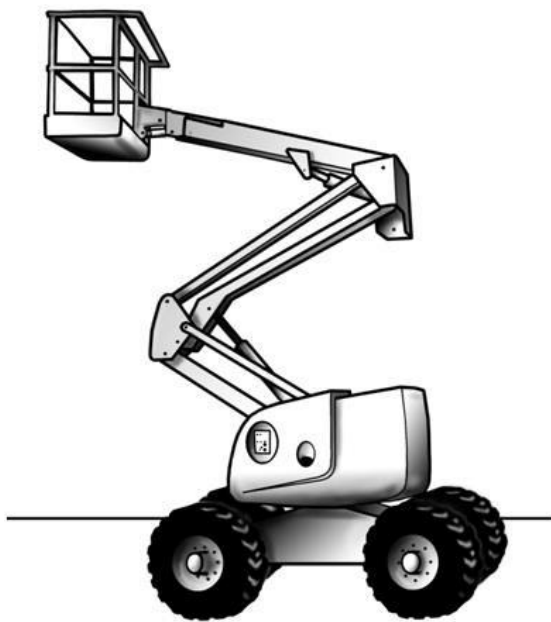


Figura 6.1- Plataforma autopropulsada articulada y telescópica

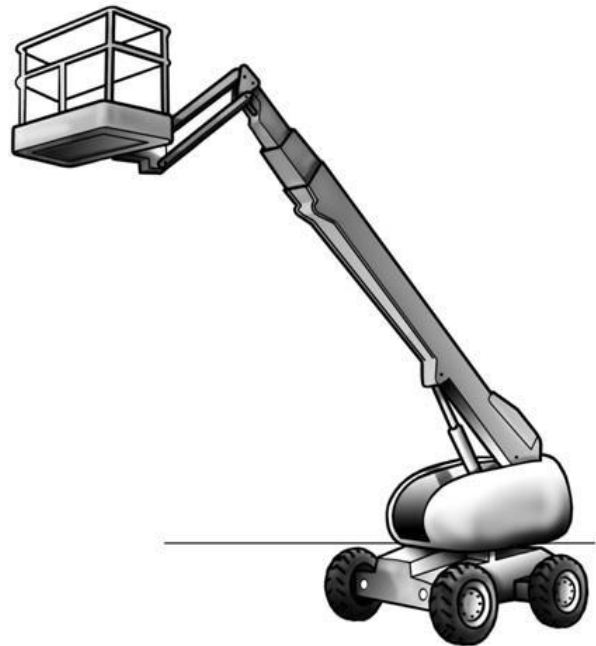


Figura 6.2- Plataforma autopropulsada de telescópica

2.4. Partes de la plataforma

De acuerdo a la normativa NTP634, una PEMP consta de los siguientes elementos:

Plataforma de trabajo

Esta formada por una bandeja rodeada por una barandilla o cesta de debe poseer una serie de requisitos.

Estructura extensible

Estructura unida al chasis sobre la cual se asienta la plataforma de trabajo, esta tiene como objetivo el situar la plataforma de trabajo en la posición adecuada para ello. Puede contar de uno o varios tramos, plumos o brazos, simples, telescópicos o articulados, estructura de tijera o cualquier combinación de todos ellos.

La proyección vertical del centro de gravedad (cdg) de la carga, durante la extensión de la estructura puede estar en el interior del polígono de sustentación o según la construcción de la maquina, en el exterior de dicho polígono.

Chasis

Es la base de la PEMP. Puede ser autopropulsada, empujada o remolcada. A su vez puede estar apoyada sobre el suelo, ruedas, orugas o bases especiales; montado sobre remolque, semi-remolque, camión o furgón; y fijado por estabilizadores, ejes, gatos u otros sistemas que aseguren su estabilidad.

Elementos complementarios

- Estabilizadores: Son todos aquellos dispositivos o sistemas que tienen como objetivo asegurar la estabilidad de la PEMP como pueden ser gatos, ejes extensibles...
- Sistemas de accionamiento: Son los sistemas que sirven para accionar todos los movimientos de las estructuras extensibles. Pueden ser accionados por cables, tornillo o piñón y cremallera.
- Órganos de servicio: Incluye los paneles de mando normales, de seguridad y de emergencia.



Figura 7- Partes de los diferentes modelos de PEMP



2.5. Riesgos y factores de riesgo

Caídas a distinto nivel

Pueden ser debidas a:

- Basculamiento del conjunto del equipo al estar situado sobre una superficie inclinada o en mal estado, falta de estabilizadores, etc
- Ausencia de barandillas de seguridad en parte o todo el perímetro de la plataforma.
- Efectuar trabajos utilizando elementos auxiliares tipo escalera, sillas, para ganar altura.
- Trabajar sobre la plataforma sin los equipos de protección individual debidamente anclados.
- Rotura de la plataforma de trabajo por sobrecarga, deterioro o mal uso de la misma.

Vuelco del equipo

Puede originarse por:

- Trabajos con el chasis situado sobre una superficie inclinada.
- Hundimiento o reblandecimiento de toda o parte de la superficie de apoyo del chasis.
- No utilizar estabilizadores, hacerlo de forma incorrecta, apoyarlos total o parcialmente sobre superficies poco resistentes.
- Sobrecarga de las plataformas de trabajo respecto a su resistencia máxima permitida.

Caída de materiales sobre personas y/o bienes

Pueden deberse a:

- Vuelco del equipo.
- Plataforma de trabajo desprotegida.
- Rotura de una plataforma de trabajo.
- Herramientas sueltas o materiales dejados sobre la superficie.
- Personas situadas en las proximidades de la zona de trabajo o bajo la vertical de la plataforma.

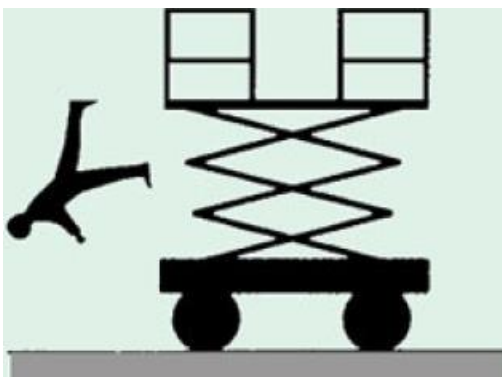


Figura 8- Plataforma de trabajo sin protección total



Figura 9- Vuelco por falta de estabilidad

Golpes, choques o atrapamientos del operario o de la propia plataforma contra objetos fijos o móviles

Normalmente se producen por movimientos de elevación o pequeños desplazamientos del equipo en proximidades de obstáculos fijos o móviles sin las correspondientes precauciones.

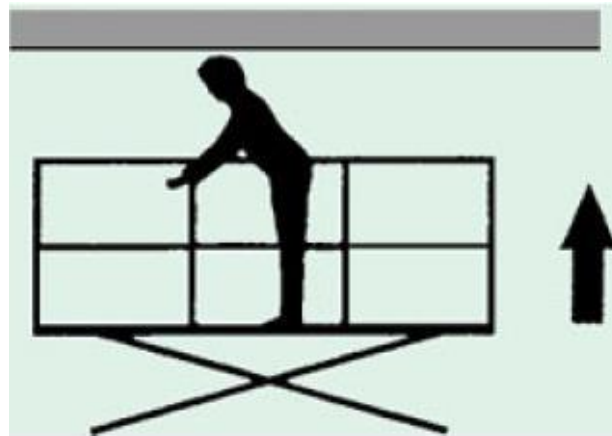


Figura 10- Choque contra objetos fijos

Contactos eléctricos directos o indirectos

La causa más habitual es la proximidad a líneas eléctricas de AT y/o BT ya sean aéreas o en fachada.



Figura 11- Contacto eléctrico directo con líneas eléctricas de alta tensión



Caídas al mismo nivel

Suelen tener su origen en la falta de orden y limpieza en la superficie de la plataforma de trabajo.

Atrapamiento entre alguna de las partes móviles de la estructura y entre ésta y el chasis

Se producen por:

- Efectuar algún tipo de actuación en la estructura durante la operación de bajada de la misma.
- Situarse entre el chasis y la plataforma durante la operación de bajada de la plataforma de trabajo.

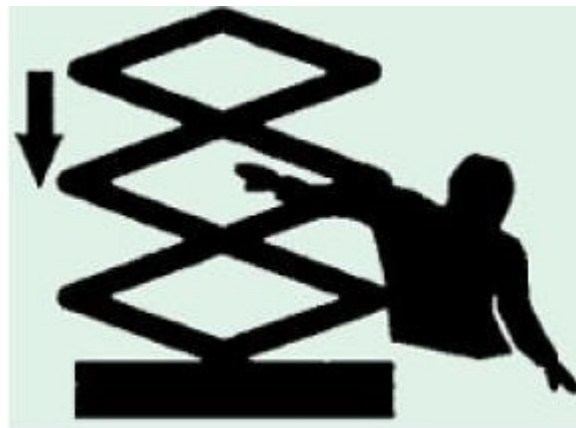


Figura 12- Atrapamiento de extremidades superiores en la estructura



3. Planteamiento inicial del proyecto

El punto de partida del presente proyecto se basa en la definición completa de la PEMP de estudio. Según la clasificación realizada en apartados anteriores, el tipo de plataforma elegida es una **plataforma autopropulsada de tijeras**, atendiendo a su traslación de **tipo 3** y **grupo A** debido a que el c.d.g. se encuentra sobre las líneas de vuelco.

Una vez escogido el modelo concreto del estudio, el siguiente paso será seleccionar los componentes principales constructivos y hacer un diseño geométrico en 2D de los mismos.

Para realizar esta selección y diseño consultaremos gran cantidad de información como catálogos de producto proporcionados por fabricantes de plataformas, manuales de instrucciones, imágenes de PEMP de internet, así como contenido audiovisual encontrado en YouTube.

Una vez seleccionada el tipo de estructura de elevación de la plataforma, nos ajustaremos a las condiciones de trabajo necesarias para dimensionar todos los elementos del conjunto que forman la tijera de la plataforma. Para ello se han realizado todos los cálculos de la geometría de la PEMP en función de la altura que esta alcanza.

El diseño de los diferentes componentes, considerados a nivel personal como principales para la descripción y funcionamiento de la PEMP, se han dimensionado de la manera más precisa posible a partir de la información recopilada. El proceso de diseño 2D se ha realizado mediante AutoCAD.

En la siguiente imagen se presenta mediante un simple croquis el conjunto de los elementos que formaran el ensamblaje de la PEMP:

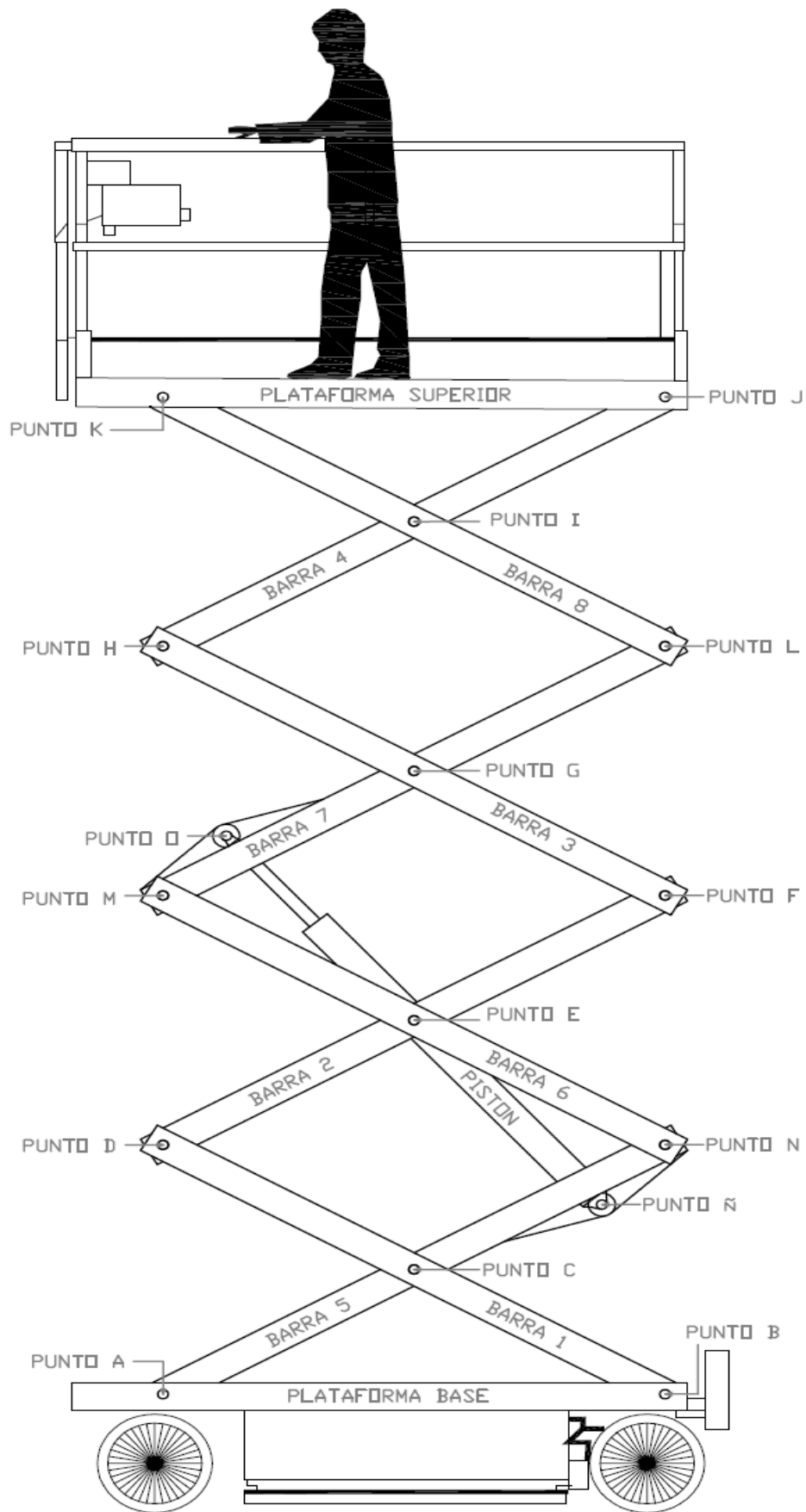


Figura 13- Croquis nombrado de la estructura de la PEMP



4. Análisis geométrico de la PEMP

En este apartado se va a dar una visión general de la geometría de la PEMP. Para ello vamos a plantear una serie de ecuaciones geométricas en función de la altura que es capaz de elevarse la plataforma. Nuestro principal objetivo es conocer tanto la longitud del cilindro hidráulico, así como el ángulo que este forma con la horizontal (Ω) a medida que se produce la elevación de la PEMP. Antes de poder analizar la geometría del cilindro, es necesario calcular los ángulos de las barras con la horizontal (α), lo cual nos resulta muy sencillo asumiendo que la longitud de todas las vigas son iguales.

Mediante el software "EES" vamos a resolver las ecuaciones para 9 posiciones de elevación.

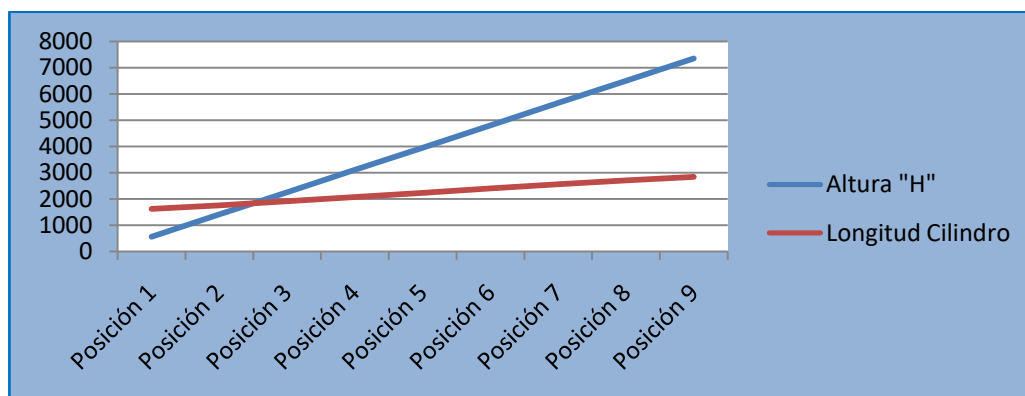
$$L_{viga} = 2150 \text{ mm}$$

$$L_{viga} \cdot \text{sen}(\alpha) = \frac{H}{4}$$

ELEVACIÓN	Altura "H" [mm]	Angulo " α " [°]	Longitud Cilindro [mm]	Angulo " Ω " [°]
Posición 1 (Reposo)	550	3,667	1616	21
Posición 2	1400	9,369	1753	29,11
Posición 3	2250	15,17	1905	36,1
Posición 4	3100	21,13	2066	42,2
Posición 5 (Punto medio)	3950	27,34	2231	47,62
Posición 6	4800	33,93	2396	52,57
Posición 7	5650	41,07	2557	57,25
Posición 8	6500	49,1	2708	61,9
Posición 9 (Punto máximo)	7350	58,72	2840	66,92

Tabla 1- Ángulo de las vigas, longitud y ángulo del cilindro en función de la altura de la PEMP

De forma grafica, observamos en la siguiente figura la longitud del cilindro con respecto a las diferentes posiciones que son capaces de alcanzar la PEMP.



Grafica 1- Longitud del cilindro en función de la altura de la PEMP



5. Coeficiente de seguridad y teorías de fallo

En los cálculos de resistencia mecánica, el factor de seguridad se puede aplicar de dos formas distintas con un mismo objetivo, el sobredimensionamiento del componente analizado.

- Dividiendo las propiedades del material que determinan el diseño por un número mayor que la unidad (Coeficiente de minoración). En este caso se modela como si el material tuviese unas características de resistencia inferiores a las reales.
- Multiplicando el valor de las fuerzas que actúan sobre un elemento resistente por un coeficiente mayor que la unidad (Coeficiente de mayoración). En este caso se analiza como si el elemento estuviera más solicitado de lo que está realmente.

Este sobredimensionamiento se justifica por varios motivos como son: previsión de desgaste o corrosión a largo tiempo, errores o desviaciones de las propiedades previstas del material, sobrecargas de uso, tolerancias e incertidumbres de los elementos y el posible error producido por el método de cálculo.

El valor de los factores de seguridad, por lo general, provienen de la experiencia empírica o la práctica, por lo cual están tabulados y contemplados en las normas. A veces es frecuente que la propia experiencia personal del diseñador fije este valor. Por lo general, el valor del coeficiente para un mismo elemento depende del tipo de uso o servicio que este va a proporcionar, así como el riesgo que supone el fallo para la integridad de una estructura, bien o persona.

$$C_S = \frac{\sigma_F}{\sigma_{\max_adm}}$$

A lo largo del desarrollo del proyecto se van a aplicar diversos coeficientes de seguridad, estos coeficientes estarán supeditados al tipo de cálculo realizado y a la teoría de fallo seleccionada.



Teoría de tensión de cortante máximo

“La falla de un material ocurre siempre que en cualquier elemento la tensión de cortadura máxima sea igual a la tensión de cortante máximo en una probeta de tracción”

La tensión de cortadura máxima viene dada por la siguiente ecuación, que se puede deducir mediante la representación de los círculos de Mohr.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2}$$

La tensión de cortadura máxima se relaciona con la tensión de fluencia del material mediante la siguiente expresión:

$$C_s = \frac{\sigma_F}{2 \cdot \tau_{max}}$$

Donde:

σ_F es la tensión de fluencia del material

C_s es el coeficiente de seguridad

Teoría de la energía de la distorsión o Von Mises

“La fluencia se producirá siempre que la energía de la distorsión en una unidad de volumen sea igual a la energía de distorsión en el mismo volumen cuando se le someta a tensión uniaxial hasta el valor de la resistencia de fluencia”

Esta teoría se basa en la tensión equivalente de Von Mises que viene expresada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2}{2}}$$

Para este caso, la tensión equivalente de Von Mises se relaciona con la tensión de fluencia del material mediante la siguiente expresión:

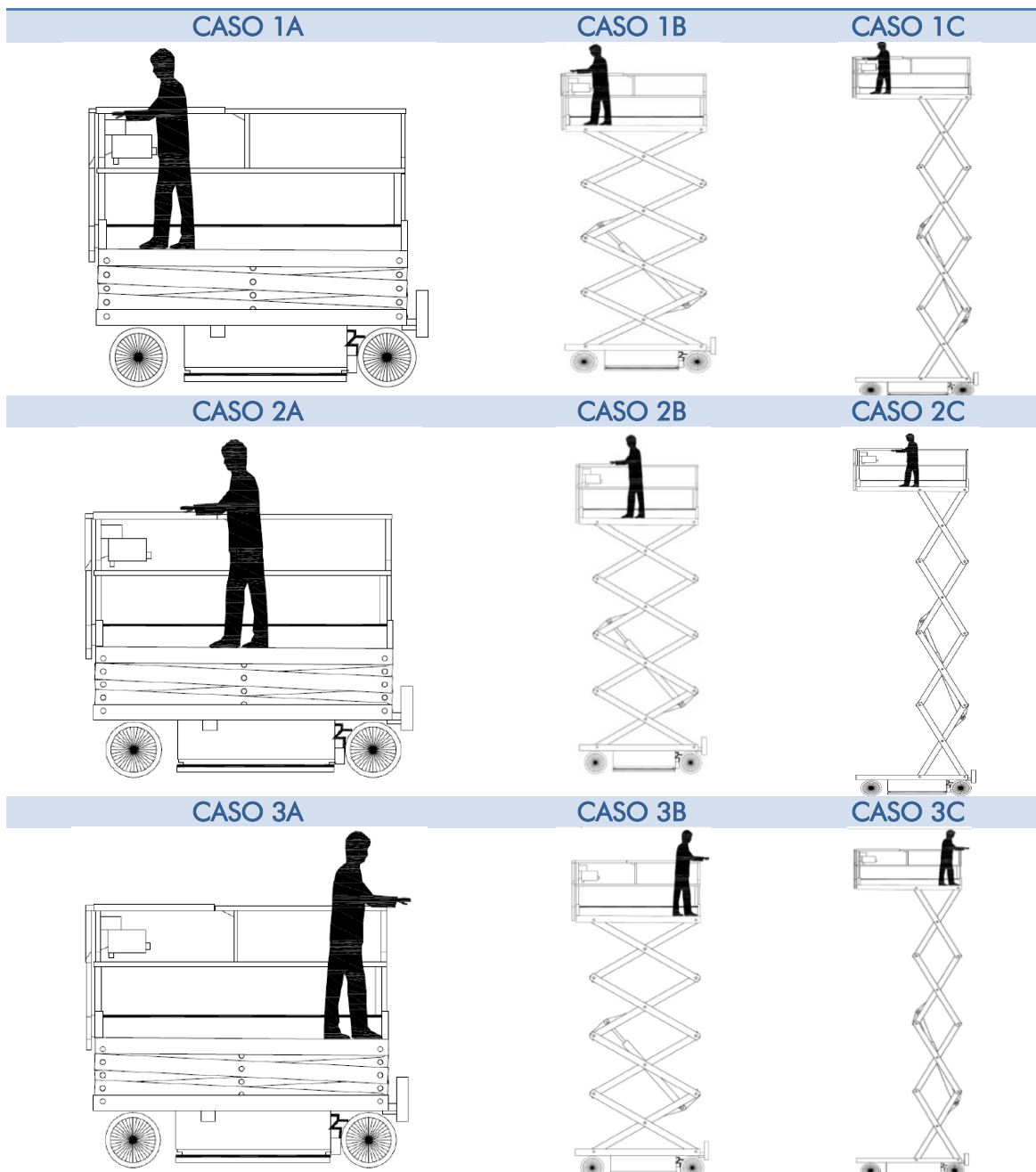
$$C_s = \frac{\sigma_F}{\sigma_{eqv}}$$



6. Cálculos mecánicos

Todos los cálculos mecánicos necesarios para el dimensionamiento de los componentes de la PEMP se han realizado en el "Anexo I. Cálculos Mecánicos" con el objetivo de asegurar las propiedades mecánicas necesarias que eviten el fallo bajo cualquier situación de trabajo.

Para dimensionar los elementos de la PEMP, se va a analizar la plataforma para 3 posiciones de elevación distintas (A,B,C), así como para 5 posiciones de carga (1,2,3,4,5).



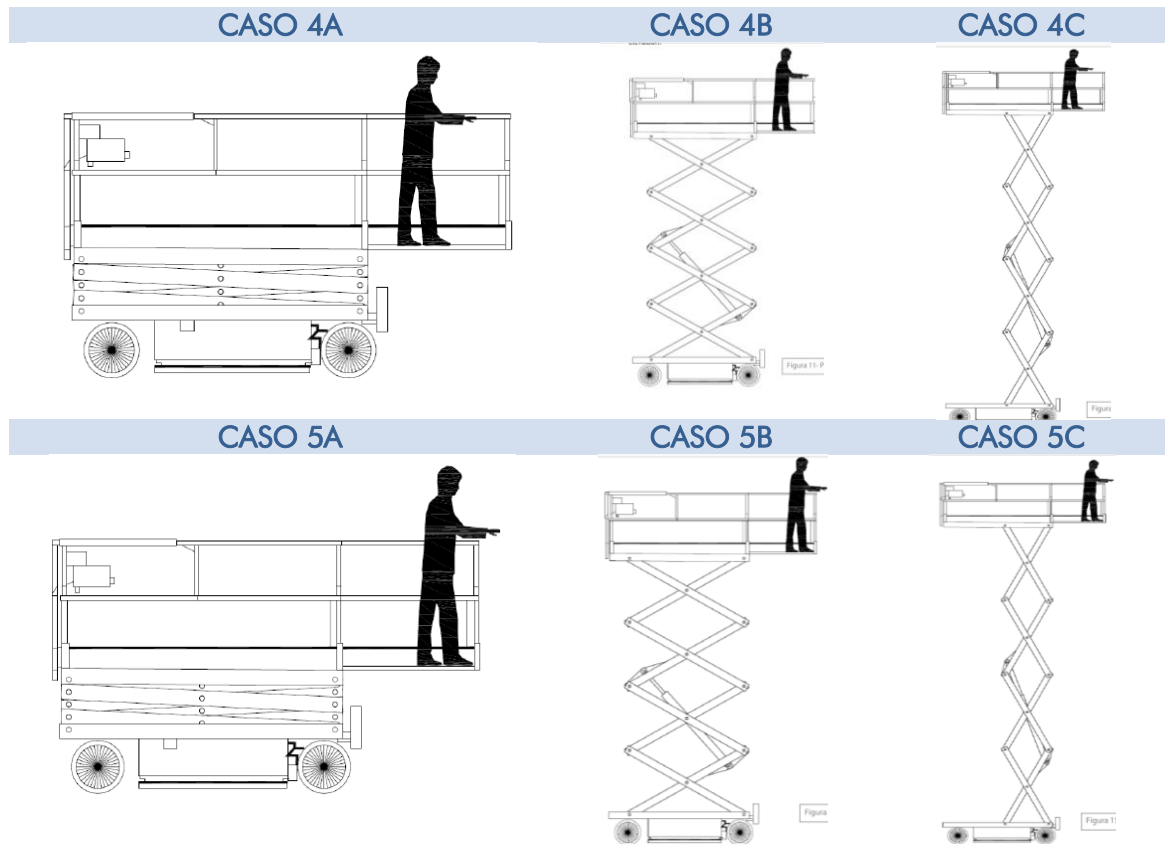


Tabla 2- Posibles casos de análisis de la PEMP

Para la realización de los cálculos mecánicos de la PEMP se ha realizado una simplificación debido a la **simetría** de la propia plataforma, por lo que únicamente se han realizado los cálculos para una tijera de elevación. De este modo tanto el peso de la plataforma como el de la carga máxima, asumiendo un reparto equitativo entre ambas tijeras se reducirá a la mitad.

El estudio de esta plataforma elevadora va a realizarse con 3 posibles cargas:

- $W_{MÁX} = 4500 \text{ N}$ (La carga se encuentre sobre la plataforma. Caso 1-2-3)
- $W_{VOL4} = 3000 \text{ N}$ (La carga se encuentra centrada en la extensible. Caso 4)
- $W_{VOL5} = 2000 \text{ N}$ (La carga se encuentra en el extremo extensible. Caso 5)

Para los cálculos se han tenido en cuenta el peso propio aproximado de los elementos barra de la estructura.



6.1 Dimensionamiento de las barras.

En primer lugar se han calculado todas las reacciones existentes entre las barras de la PEMP, para ello se han planteado los **diagramas de sólido libre** y posteriormente las **ecuaciones de equilibrio** de cada uno de los elementos. Dichas ecuaciones han sido resueltas mediante el software "EES".

A continuación, mediante una matriz de cambio de base se han obtenido las **reacciones en coordenadas locales** de cada uno de los elementos y se han analizado para los casos más desfavorables.

Seguidamente, se han realizado los **diagramas de esfuerzos** de cada barra para los casos desfavorables. Mediante el software "MEFI" se han obtenido el punto más solicitado así como el valor de los esfuerzos.

Posteriormente, se han calculado las tensiones máximas a las que están sometidas las barras, para ello se ha seguido la fórmula general de la tensión normal debido a flexión compuesta plana, es decir cuando un elemento está sometido a una fuerza de flexión y tracción o compresión simultáneamente.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_Z}{W_Z}$$

Por último, se han calculado los perfiles adecuados de cada una de las barras para evitar el fallo bajo las diversas cargas de trabajo. Para ello se ha aplicado un **coeficiente de seguridad de 3** por lo que dado el material seleccionado, su tensión máxima admisible será de:

$$\sigma_{adm_max} = 91.67 \text{ Mpa}$$

Finalmente, mediante los pasos desarrollados anteriormente se han obtenido los perfiles para cada una de las barras. A pesar de haber obtenido perfiles distintos, los cuales no difieren mucho entre ellos, a fin de facilitar el montaje se ha optado por unificar todos los perfiles.

Para ello se ha seleccionado aquel en el que se concentran mayores esfuerzos, con ello obtendremos un mayor coeficiente de seguridad del resto de barras.

Elemento/Dimensiones	Altura (h) [mm]	Ancho (b) [mm]	Espesor (e) [mm]	Coficiente de Seguridad
Barra 1	120	100	8	7,93
Barra 2	120	100	8	16,53
Barra 3	120	100	8	3,80
Barra 4	120	100	8	19,48
Barra 5	120	100	8	3,54
Barra 6	120	100	8	7,06
Barra 7	120	100	8	4,32
Barra 8	120	100	8	11,16

Tabla 3- Dimensiones finales de todas las barras



6.2 Dimensionamiento de los pasadores

Al igual que para el cálculo de los perfiles de la estructura, en el "Anexo I. Cálculos Mecánicos" se expone de forma detallada todos los pasos y teorías aplicadas para realizar los cálculos correspondientes a las uniones entre los diferentes componentes del mecanismo de la PEMP.

En este apartado se realizara un breve resumen de los cálculos, resultados y conclusiones obtenidas.

Para ello se ha utilizado la **teoría de cortante máxima** aplicando un **coeficiente de seguridad de 3** al igual que para el caso anterior. En cuanto al material seleccionado para los pasadores posee una tensión de fluencia de 590 MPa, por lo que la tensión de aplastamiento máxima y tensión de cortante máxima debe ser:

$$\sigma_{max,adm} = 196.85 \text{ MPa}$$

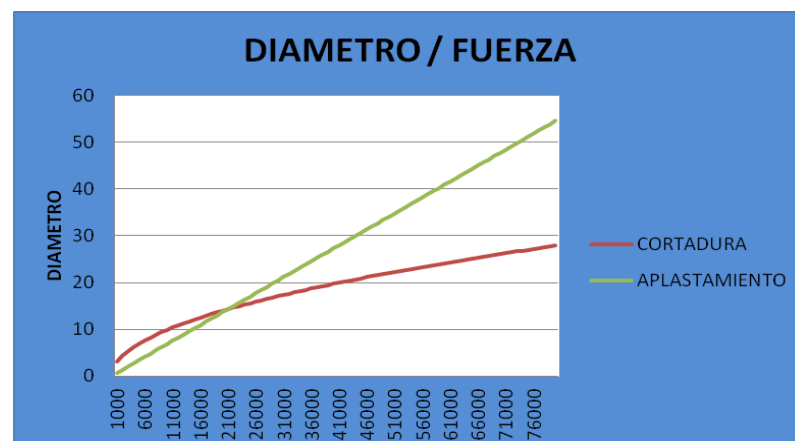
$$\tau_{max,adm} = 98.42 \text{ MPa}$$

En los elementos tipo barra, como se ha expuesto en el apartado anterior, su tensión máxima admisible es de:

$$\sigma_{max,adm} = 91.67 \text{ Mpa}$$

Como se puede observar, la tensión de aplastamiento máxima es mayor en la de los pasadores, por lo que cuando se realice el cálculo por aplastamiento, al tratarse de la misma sección, únicamente tendremos que realizar el cálculo con el elemento tipo barra.

Se han realizado los cálculos por aplastamiento, flexión y cortadura, se puede observar que para los mismos materiales y configuraciones, hay un determinado valor fuerza que supone que el cambio de fallo por cortadura a fallo por aplastamiento. Esto puede apreciarse claramente en el siguiente grafico.



Grafica 2- Posibles fallos en función de la fuerza y el diámetro



Finalmente, mediante los pasos desarrollados anteriormente se han obtenido las secciones para cada una de los pasadores. A pesar de haber obtenido secciones distintas, las cuales no difieren mucho entre ellas, a fin de facilitar el montaje se ha optado por unificar todos los pasadores.

Para ello se ha seleccionado aquel en el que se concentran mayores esfuerzos, con ello obtendremos un mayor coeficiente de seguridad del resto de pasadores.

	Diámetro [mm]	FALLO MAS RESTRICTIVO	TENSIÓN	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
Pasador A	55	CORTADURA	15,63977273	17,5833757
Pasador B	55	CORTADURA	8,253409091	33,3195649
Pasador C	55	CORTADURA	22,43848161	12,2557312
Pasador D	55	CORTADURA	22,03370171	12,4808806
Pasador E	55	CORTADURA	18,22637782	15,0880226
Pasador F	55	APLASTAMIENTO	38,13341008	7,21152395
Pasador G	55	APLASTAMIENTO	91,45096354	3,00707603
Pasador H	55	APLASTAMIENTO	53,29716717	5,15974891
Pasador I	55	APLASTAMIENTO	53,25854713	5,16349046
Pasador J	55	CORTADURA	2,979545455	92,2959573
Pasador K	55	CORTADURA	5,197727273	52,9077394
Pasador L	55	APLASTAMIENTO	53,29681858	5,15978265
Pasador M	55	APLASTAMIENTO	67,44339815	4,07749324
Pasador N	55	APLASTAMIENTO	49,87330018	5,51397239
CILINDRO	55	FLEXIÓN	53.4509	5.1449

Tabla 4- Dimensiones finales de los pasadores



7. Sistema hidráulico del pistón

A lo largo de este apartado, se realizara un breve resumen del documento "Anexo II. Sistema oleohidráulico". De este modo se presentaran los fundamentos físicos, cálculos y conclusiones obtenidas.

7.1 Diámetro del vástago.

Mediante la ecuación de la fuerza critica de pandeo para una barra con extremos articulados, se ha calculado el diámetro del vástago. Estos cálculos están de forma más desarrollada en el apartado "4.1. Cálculo del vástago" del "Anexo II. Sistema oleohidráulico".

Debemos tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos para obtener el diámetro del vástago que el momento de inercia para una sección circula viene dada por:

$$I = \frac{d^4 \cdot \pi}{64}$$

$$F_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

Analizando ambas ecuaciones, podemos apreciar como la única incógnita que tenemos es el diámetro del vástago ya que la longitud efectiva de pandeo ya es conocida desde el apartado anterior "4. Análisis geométrico de la PEMP". Se ha obtenido el valor de la fuerza del pistón que hay que recordar que hay que **duplicar el valor obtenido** debido a la simetría del problema y a su vez **multiplicarlo por 3 para aplicar el coeficiente de seguridad**.

La longitud efectiva de pandeo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$L = \beta \cdot \text{Carrera del cilindro}$$

Donde la carrera del cilindro es conocida y el parámetro $\beta = 2$ tal y como se justifica en el apartado "4.1. Cálculo del vástago" del "Anexo II"

Una vez realizados los cálculos obtenemos un diámetro del vástago de **56 mm**. Con este diámetro de vástago, nos aseguramos que la fuerza máxima a la que va a estar sometido el cilindro va a ser menor que la fuerza necesaria para que se produzca pandeo.

Este valor nos determinara a posteriori el diámetro del cilindro hidráulico ya que este se escogerá de un catalogo normalizado.



7.2 Diámetro del pistón.

Una vez definido el diámetro del vástago, lo siguiente que se debe hacer es dimensionar el diámetro del pistón. Dicho diámetro, al igual que para el vástago se va a dimensionar en función de la fuerza máxima que necesita proporcionar el cilindro hidráulico. La fuerza será la misma que para el apartado anterior a excepción que el coeficiente de mayoramiento será de 1,5.

	Fuerza [N]	F _{AVANCE} [N]
Cilindro hidráulico	55424	83136

Dicho diámetro lo vamos a calcular mediante la siguiente ecuación:

$$F_{AVANCE} = \frac{p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{10}$$

Para seguir con el cálculo, debemos asumir la presión que será la proporcionada por la bomba, en nuestro caso vamos a tomar una presión nominal de **250 bar**.

$$D = \sqrt{\frac{83136 \cdot 10 \cdot 4}{250 \cdot \pi}} \rightarrow D = 65.07 \text{ mm}$$

Para calcular el cilindro hidráulico normalizado, usaremos la **norma ISO 6020/2 – DIN 24554** con las dimensiones que esta nos proporciona y así obtener el que más se ajuste a nuestros requisitos.

Observando la tabla de las dimensiones normalizadas del cilindro hidráulico, el que más se ajusta a nuestras necesidades de trabajo es el siguiente:

$$\varnothing_{pistón} = 80 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{vástago} = 56 \text{ mm}$$

7.3. Espesor de la camisa

En este apartado, se ha realizado el **cálculo del espesor necesario de la camisa del cilindro** ("Anexo II. Sistema hidráulico" "4.3 Cálculo de la camisa del cilindro") estudiando las tensiones que se producen debido a la presión interna a la que está sometido. Para el cálculo de estas tensiones hay que distinguir entre dos suposiciones, que el cilindro sea de pared delgada o que por el contrario sea de pared gruesa.

Se ha tomado como hipótesis inicial el cálculo con pared delgada, pero no cumple los requisitos, por lo que posteriormente hemos realizado los cálculos con la **hipótesis de pared gruesa**.

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 - [r_i^2 \cdot r_o^2 \cdot (p_o - p_i) / r^2]}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 + [r_i^2 \cdot r_o^2 \cdot (p_o - p_i) / r^2]}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_z = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{p_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

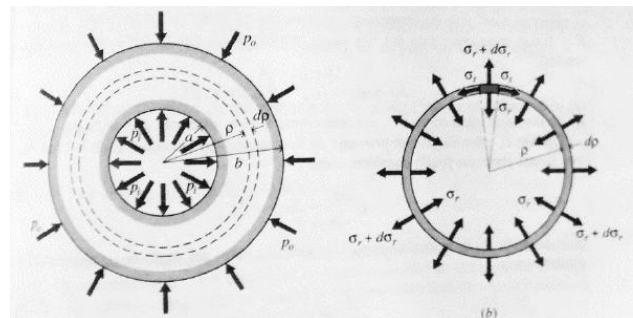


Figura 14- Ecuaciones de hipótesis de pared gruesa

A su vez, esta hipótesis, se ha realizado para dos teorías ya conocidas:

- Teoría de la energía de la distorsión o Von Mises
- Teoría de fallo de la tensión de cortante máximo

Teoría	Espesor de la camisa	$\phi_{Pistón} / e_{camisa}$
Distorsión o Von Mises	15.27 mm	5.24
Tensión de cortante máximo	10.18 mm	7.85

Una vez obtenidos los resultados de los espesores para ambas teorías mediante la hipótesis de pared gruesa, podríamos redondear los espesores al siguiente número entero o mediante catálogos de cilindros seleccionar el que más se ajuste a nuestras necesidades.



7.4. Bomba de accionamiento

Por último, en el apartado “4.4. Selección de la bomba” se han realizado los cálculos necesarios para la selección de la bomba más adecuada para el funcionamiento óptimo de nuestro sistema de elevación.

Para ello, se calculara el caudal necesario para accionar dicho cilindro hidráulico:

$$Q = A_{pistón} \cdot v_{avance} [m^3/s]$$

Donde sabemos que el área del pistón y la velocidad de avance son las siguientes:

$$A_{pistón} = \pi \cdot \left(\frac{D_{pistón}}{2}\right)^2$$

$$v_{avance} = 25 [mm/s]$$

Con los datos geométricos de nuestro cilindro podemos calcular el caudal necesario:

	$D_{pistón}$	$A_{pistón}$	V_{avance}	$Q[mm^3/s]$	$Q[l/min]$
Cilindro	80	5026.54	25	125663.7	7.5398

Necesitaremos una bomba FS2 size 5.0, ya que es capaz de proporcionarnos un caudal levemente superior al necesario.

Para una presión de 250 bar y un tamaño de bomba de 5, obtenemos en la tabla un rendimiento cercano al 78%

Una vez conocido ya el dato del rendimiento de la bomba, podemos pasar al cálculo de la potencia de accionamiento:

$$N[KW] = \frac{p[bar] \cdot Q[l/min]}{612 \cdot \eta_t} = \frac{250 \cdot 7.54}{612 \cdot 0.78} = 3.948 KW$$



8. Simulación en SolidWorks

Mediante el software SolidWorks, se ha realizado el modelado en 3D de la estructura de elevación de la PEMP al completo, el cual ha sido el objeto de estudio a lo largo del proyecto.

Para ello se ha realizado previamente el diseño de cada elemento por separado y posteriormente se ha realizado el ensamblaje teniendo en cuenta todas las relaciones de posición existentes.

Por último se ha realizado una simulación estática para los elementos más solicitados de la PEMP. En esta simulación mediante SolidWorks nos permitirá comprobar de manera más precisa el correcto dimensionado y modelado de los diferentes componentes en las situaciones más desfavorables de trabajo.

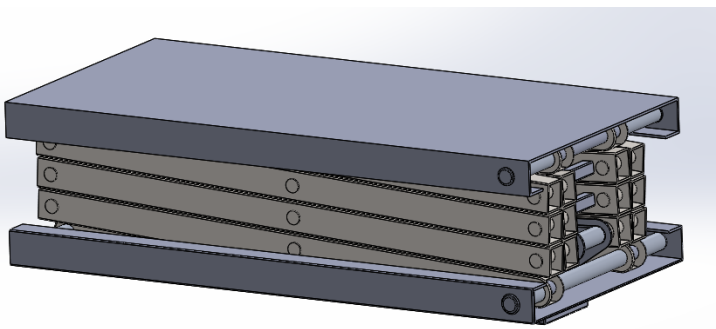


Figura 15- PEMP en posición de elevación A

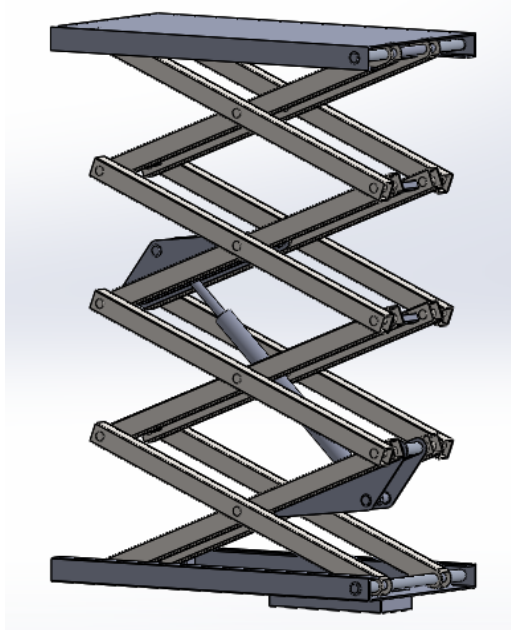


Figura 16- PEMP en posición de elevación B



Figura 17- PEMP en posición de elevación C



9. Conclusiones

9.1 Conclusiones del proyecto

Con el fin de la realización del presente proyecto, se han consultado manuales de instrucciones y mantenimiento de diferentes PEMP, tanto en libros como apuntes de diseño y normativa para este tipo de plataformas con el objetivo de establecer unas primeras condiciones de diseño, como son: Capacidad de elevación y carga, tecnología de funcionamiento así como dimensiones generales de la PEMP.

En el momento en que tenemos ya una idea aproximada del funcionamiento de la plataforma elevadora móvil de personal, centraremos nuestro estudio en los elementos que hacen posible la elevación de la PEMP, es decir, barras, pasadores, soportes y el cilindro hidráulico. Para diseñar estos elementos se ha atendido a criterios de funcionalidad y de resistencia de materiales llevando a cabo un estudio concreto para cada uno de los elementos en su momento de mayor solicitud de trabajo.

Una vez concluida la selección de perfiles de los elementos que forman el conjunto de la estructura de elevación de la PEMP, se procederá al diseño en 3D mediante el software SolidWorks. Para ello se ha modelado cada pieza por separado y posteriormente se ha realizado un ensamblaje en el que se puede obtener una idea bastante aproximada de la geometría de la plataforma. También se ha llevado a cabo un análisis estructural, para comprobar que la integridad de los diferentes componentes se mantenga intacta antes las condiciones más críticas de funcionamiento.

9.2 Aporte del proyecto al autor

La realización del Trabajo de Fin de Grado ha sido un reto a nivel personal, así como una experiencia completamente distinta de aprendizaje. Todos los conocimientos previos adquiridos a lo largo del grado se han tratado de integrar en un único proyecto.

Desde el comienzo se han realizado numerosos cambios debido a imprevistos o pequeños factores que no se han tenido en cuenta y han obligado a rehacer partes del proyecto ya que muchas de ellas están interconectadas y un pequeño cambio en un apartado puede suponer un gran cambio en otro. En muchas ocasiones estos imprevistos han sido ocasionados debido a que se ha intentado realizar la mayor semejanza con la estructura real.

Otro aspecto a tener en cuenta ha sido la gestión de tanta información disponible, tanto en las redes como en documentos físicos, la labor de filtrar toda esa información ha sido esencial y muy útil para el futuro.



Como conclusión, el desarrollo del presente proyecto me ha aportado una visión global del diseño de maquinaria, así como de las dificultades que te puedes encontrar a lo largo de un proyecto tan complejo, y las posibles soluciones a dichos problemas.

9.3 Futuras líneas de investigación

Durante la realización del "Análisis y cálculo de la estructura de una plataforma elevadora móvil de personal" se ha dado una visión global, particularizando en los temas que nos interesaban, no obstante se podría realizar una labor de investigación y análisis de:

- Cálculo del sistema motriz de la PEMP
- Estudio y diseño de la instalación eléctrica de la PEMP
- Cálculo completo del sistema hidráulico de la PEMP
- Posibles métodos de fabricación de los elementos de la PEMP
- Simulación cinemática del movimiento de la PEMP

10. Anexo I. Cálculos mecánicos

Documento independiente adjunto a la memoria.

11. Anexo II. Sistema hidráulico

Documento independiente adjunto a la memoria.

12. Anexo III. Modelado y simulación en SolidWorks

Documento independiente adjunto a la memoria.



13. Bibliografía

- GERE, JAMES. TIMOSHENKO: Resistencia de materiales. (2004)
Madrid: S.A. Ediciones Paraninfo
- ABAD BLASCO, JAVIER. Apuntes de la asignatura "Sistemas mecánicos en maquinas y vehículos" (2016)
Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.
- ABAD BLASCO, JAVIER - CANALIS MARTINEZ, PAULA - MALÓN LITAGO, HUGO. Apuntes de la asignatura "Criterios de diseño de maquinas" (2015)
Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.
- MAQLIFT PLATAFORMAS. Dimensiones y alturas de diversas plataformas.
Leganes (Madrid): Maqlift
- MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES DE ESPAÑA. NTP 634: Plataformas elevadoras móviles de personal.
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_634.pdf]
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y SALUD LABORAL DE LA UGT. Cuaderno preventivo: Plataformas elevadoras móvil de personal.
[http://ugt.cat/download/salut_laboral/plataformas_elevadoras.pdf]
- ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY. Materiales del curso de Sistemas Hidráulicos y Neumática.
[<http://cursos.aiu.edu/Sistemas%20Hidraulicas%20y%20Neumaticos/Leccion%201/Index.htm>]
- HAULOTTE SERVICES. Manual Haulotte.
L'Orme (Francia): Haulotte Group
- JLG INDUSTRIES. Service Manual.
McConnellsburg (Estados Unidos): JLG Industries
- AUTOCAD EDUCATION. Guía del estudiante para el aprendizaje del software AutoCAD. (2006)
[<http://www.formacionprofesional.info/descargas-manuales-tuto-autocad>]
- SOLIDWORKS EDUCATION. Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks. (2010)
[https://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf]



INDISA ONLINE. Transmisión de potencia hidráulica. (2012) Medellín
[<http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%20108%20%20TRANSMISI%C3%93N%20DE%20POTENCIA%20HIDR%C3%81ULICA.pdf>]