



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# ESTUDIO DE DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PIEZA MEDIANTE LA MODELIZACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL CON UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Directora: SANCHEZ ROMERO, MONTSERRAT  
Subdirector: WEYLER PEREZ, RAFAEL

Gerson Darío Moreno Yauri

22 de Junio de 2021

## SUMARIO

|   |    |
|---|----|
| Capítulo 1. DEFINICIÓN DEL TRABAJO.....                     | 2  |
| 1.1 Motivación .....  | 2  |
| 1.2 Antecedentes .....                                      | 2  |
| 1.3 Objetivo.....   | 2  |
| 1.4 Alcance del Proyecto .....                              | 3  |
| 1.5 Requerimientos .....                                    | 3  |
| 1.6 Planificación del proyecto .....                        | 3  |
| Capítulo 2. SELECCIÓN DE LA PIEZA A ESTUDIAR .....          | 4  |
| 2.1 Pieza a diseñar: Horquilla de Carretilla Elevadora..... | 4  |
| 2.2 Carretillas elevadoras: estado del arte.....            | 5  |
| 2.2.1 Definición y partes.....                              | 5  |
| 2.2.2 Historia .....  | 7  |
| 2.2.3 Presente y Futuro .....                               | 9  |
| 2.2.4 Regulación vigente .....                              | 10 |
| 2.3 Clases de horquillas y características .....            | 11 |
| 2.3.1 Normativa vigente .....                               | 13 |
| 2.3.2 Particularidades de la horquilla de análisis.....     | 14 |
| 2.3.2 Fabricación y materiales .....                        | 17 |
| Capítulo 3. DESARROLLO DEL DISEÑO.....                      | 18 |
| 3.1 Prediseño .....   | 18 |
| 3.2 Método de los elementos finitos .....                   | 20 |
| 3.2 Funcionamiento .....                                    | 23 |
| Capítulo 4. CÁLCULO Y SIMULACIONES.....                     | 24 |
| 4.1 Análisis teórico estructural.....                       | 24 |
| 4.1.1 Reacciones.....                                       | 24 |
| 4.1.2 Fuerzas internas .....                                | 26 |
| 4.1.3 Deformaciones .....                                   | 28 |
| 4.2 Modelización .....                                      | 31 |
| 4.2.1 Dimensionado.....                                     | 31 |
| 4.2.2 Simulaciones.....                                     | 32 |
| 4.3 Análisis de resultado .....                             | 39 |
| 4.4 Software Edupack y materiales adecuados .....           | 41 |
| Capítulo 5. PRESUPUESTOS .....                              | 44 |
| Capítulo 6. CONCLUSIONES.....                               | 46 |
| Capítulo 7. LINEAS FUTURAS.....                             | 47 |
| Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA.....                               | 48 |
| ANEXOS .....  | 49 |

## CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

### 1.1 MOTIVACIÓN

El motivo principal de este estudio es el programa ANSYS del cual había utilizado en la optativa Método de los Elementos Finitos para la Ingeniería. Un software que definiré más adelante con detalle pero que básicamente, a partir de condiciones iniciales, es capaz de calcular diferentes comportamientos (mecánicos, eléctricos, magnéticos, aerodinámicos, etc.) con una más que considerable precisión y utilizando un método matemático muy trabajado.

Ya sea porque en la asignatura todo giraba alrededor de este método o porque se me daba bien desde el principio, cada ejercicio que hacíamos con ANSYS me parecía más interesante.

Así pues, quería encontrar una pieza para estudiar desde cero y plasmarlo en ANSYS. Este TFG me permite realizarme, con ayuda de mis tutores y el conocimiento previo y durante el proyecto, podré terminar la carrera con la satisfacción de hacer un trabajo final de grado que realmente me motiva.

### 1.2 ANTECEDENTES

La concreción del estudio surgió tras varios días de búsqueda de una pieza mecánica fácil de identificar y encontrar en el ámbito industrial.

Las horquillas y en su conjunto las carretillas elevadoras están presentes en casi todo el ámbito industrial ya que cualquier producto en su ciclo de vida ha sido llevado por una carretilla. Adicionalmente, la pieza en concreto no es compleja de diseñar y también está expuesta a condiciones concretas muy reconocibles que ayudan a su sencilla simulación.

Ya teniendo el objeto definido, no he encontrado muchos estudios específicos a casos que pueda requerir una empresa. Sí en cambio diversos trabajos que engloban carretillas en tu totalidad.

Por lo tanto, la riqueza que encontré en la variedad de horquillas, encajes, pesos, etc. me han permitido acotar el proyecto a un caso en particular donde un cliente requiera horquillas para un tipo de palets y carga.

### 1.3 OBJETIVO

El objetivo es diseñar una horquilla adecuada a las condiciones/requerimientos de un caso en particular. Entendiendo los esfuerzos y comportamientos mecánicos de la pieza para su posterior modelización y simulación a través de un software basado en el método de los elementos finitos.

#### 1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

- Se buscará documentación de la historia de las carretillas además de la reglamentación y estado actual de ellas.
- Se identificarán las diferentes clases de horquillas del mercado, así como las normas que las regulan.
- Se presentarán hipótesis de trabajos de una o más clases de horquillas para su posterior modelización en ANSYS.
- Se buscará el diseño más adecuado al caso, así como su optimización para encontrar el material más adecuado.

#### 1.5 REQUERIMIENTOS

1. La pieza final modelizada en ANSYS debe cumplir la norma vigente regulatoria con respecto a los valores dimensionales.
2. La horquilla deberá ser adecuada para la carga de palets europeos homologados.
3. La deformación elástica con carga nominal no deberá sobre pasar el 1% de la longitud horizontal de la pieza.
4. El coeficiente de seguridad de la horquilla deberá ser como mínimo del 1,5.

#### 1.6 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

Seguidamente, se resumirán el tipo de tareas a realizar en el proyecto. Para ver más detalles de la planificación del estudio, ver documento adjunto *Project Charter*.

1. En primer lugar, se deberá conocer la historia y todo lo que implica la carretilla elevadora. Tanto la coyuntura en la cual surgió el invento como en la actualidad y futuro. Básicamente documentarse de esta herramienta tan común en los almacenes. Esta primera tarea puede ser larga ya que habrá que recoger toda clase de información contrastada.
2. Posteriormente, analizar las principales partes del vehículo y enfocarse en la pieza de estudio: la horquilla. Encontrar clases, fabricantes, reglamentación vigente y contrastes que podemos añadir al estudio.
3. Como requerimiento del estudio, se tendrá que modelizar la pieza según normativa actual. Se diseñará la pieza con un software 3D para obtener los diferentes planos.
4. Modelizar, la pieza se creará desde cero en el programa ANSYS, tanto con las medidas normalizadas como con las variaciones que podamos darle según el apartado 2. Las variaciones e hipótesis que se puedan añadir serán clave para la riqueza del estudio, ya que en estas se podrán encontrar resultados significativos, o no, de las diferentes clases de horquillas.
5. En consecuencia, la siguiente tarea es el análisis de resultados, tanto numéricos como gráficos, se tendrán que examinar y validar con los conocimientos ingenieriles correspondientes. Aquí se realizará una tarea de recopilación y búsqueda de información teórica de los comportamientos estructurales encontrados, será clave la ayuda de la tutora del trabajo, profesora del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería.

6. Como añadido se ha pensado incorporar al estudio el uso de la herramienta Edupack, un programa que contiene una base de datos para encontrar materiales y sus respectivos fabricantes, todo a partir de valores numéricos técnicos a consecuencia de las simulaciones y cálculos.
7. Finalmente, se presentarán las conclusiones del estudio y las líneas futuras de investigación posibles a partir de este.

## CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA PIEZA A ESTUDIAR

### 2.1 PIEZA A DISEÑAR: HORQUILLA DE CARRETILLA ELEVADORA

La pieza del cual el TFG girará entorno se llama horquilla, o también conocida en el sector logístico como 'uña'. Las horquillas son piezas que se encuentran localizadas en la parte frontal de una carretilla elevadora.



1 Ejemplo de horquillas en uso.

En este capítulo presentaremos de manera general la carretilla elevadora y detallaremos sus principales partes hasta llegar al sujeto de estudio.

## 2.2 CARRETILLAS ELEVADORAS: ESTADO DEL ARTE

### 2.2.1 DEFINICIÓN Y PARTES

La carretilla elevadora o comúnmente denominado toro mecánico, es un vehículo de tracción motorizado destinado a la manipulación de cargas. Seguramente todos hemos odio hablar de ella, pero lo que a lo mejor no nos damos cuenta, es que la gran mayoría de objetos que tenemos en casa, han sido transportados en algún momento de su ciclo de vida por un toro mecánico.



2 Carretilla estándar de mercado

Gracias a dos barras planas paralelas en la parte frontal, llamadas horquillas, y un contrapeso localizado en la parte trasera, estos vehículos son capaces de soportar y elevar distintas cargas. Actualmente pueden utilizar diferentes tipos de motor, eléctrico, diésel, combustión interna por gas natural, etc. Con la dirección en las ruedas traseras, permite precisión en radios de giros pequeños y una mejor estabilidad. Por lo que su uso es habitual en almacenes, industrias, etc. focalizado en tareas de carga y descarga. (Maquinza, 2019) (Escrapalia, 2018)

A continuación, se presentarán las principales partes y piezas que podemos encontrar en una carretilla elevadora genérica (Gonzalez, 2017) (Trullàs, 2012) (CertifyME, 2020):



### 3 Partes principales de una carretilla

1. Mástil de elevación: es el ensamblaje vertical encargado de subir y bajar la carga. Compuesto por rieles que además añaden más estabilidad en el eje lateral. Se acciona por lo general hidráulicamente y es desplazado por uno o más cilindros hidráulicos mediante cadenas o directamente.
2. Pórtico de seguridad: normalmente hecha de plástico resistente junto con rejillas, protege al conductor de la caída de objetos.
3. Faros: alumbrado dirigido a la carga.
4. Volante: control de dirección.
5. Asiento: anatómico y dotado de suspensión para evitar la transmisión de vibraciones hacia el conductor ya que las carretillas carecen de sistemas de amortiguación (no instalados para evitar riesgos de vuelvo).
6. Cubierta: generalmente de plástico, protege al motor y contrapeso.
7. Contrapeso: localizado en la parte trasera, impide que la carretilla se incline hacia adelante.
8. Eje de dirección: normalmente ubicado en las ruedas traseras, dirigen el montacargas. De esta manera se permiten giros más adecuados y precisos al tener el pale delante del conductor.
9. Eje de tracción/ruedas motrices: ubicado en las ruedas delanteras, permiten maniobras respecto al eje trasero.
10. Cilindro de inclinación: mecanismo intrínseco al mástil que controla la inclinación de este y también al movimiento vertical.

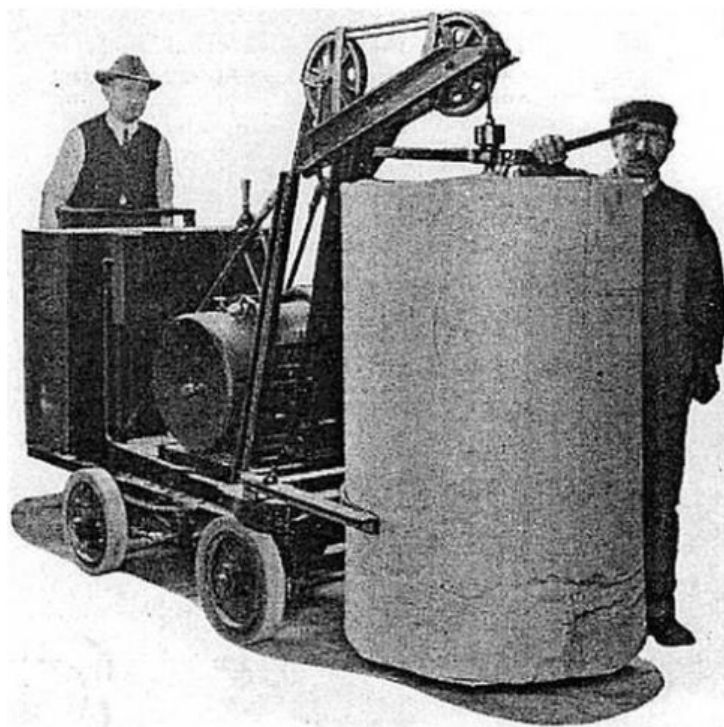
11. Horquilla: el sujeto de análisis de este trabajo, pieza maciza que sobresale del montacargas y soporta el peso de la carga. También se conocen como cuchillas, uñas o dientes. Existen diferentes modelos de horquillas según varios parámetros como el montaje, se hablará de ello próximamente.
12. Portahorquillas: como el nombre indica, soporte rectangular unido al mástil donde se montan las horquillas.
13. Respaldo de carga: la función del respaldo es evitar que la carga ejerza presión sobre el mástil o que caiga sobre el conductor.

---

### 2.2.2 HISTORIA

La carretilla elevadora tiene un largo e histórico pasado. Hoy en día se encuentran carretillas muy eficientes y potentes, sin embargo, ha cambiado mucho tras los primeros antecesores a finales del siglo XIX. (Lucendo, 2020)

El primer precedente conocido fue el montacargas. En 1851 Waterman presentó el montacargas, una plataforma unida a un cable accionado por una máquina de vapor. Este invento se limitaba a transportar objetos, sin una elevación considerable del nivel del suelo. (Sanchez, 2013)



4 Imagen de una máquina precursora de la carretilla

No fue hasta el siguiente siglo cuando en 1913/15 se anunciarán las primeras carretillas capaces de desplazar cargas verticalmente. Junto con los motores eléctricos en alza, se añadieron baterías para una mejor autonomía en la carretilla. En 1917 la compañía Clark Material Handling presentó lo que muchos llaman la carretilla elevadora original. En ella ya encontramos al operario trabajando sentado en la parte trasera. (The Lilly Company, s.f.)

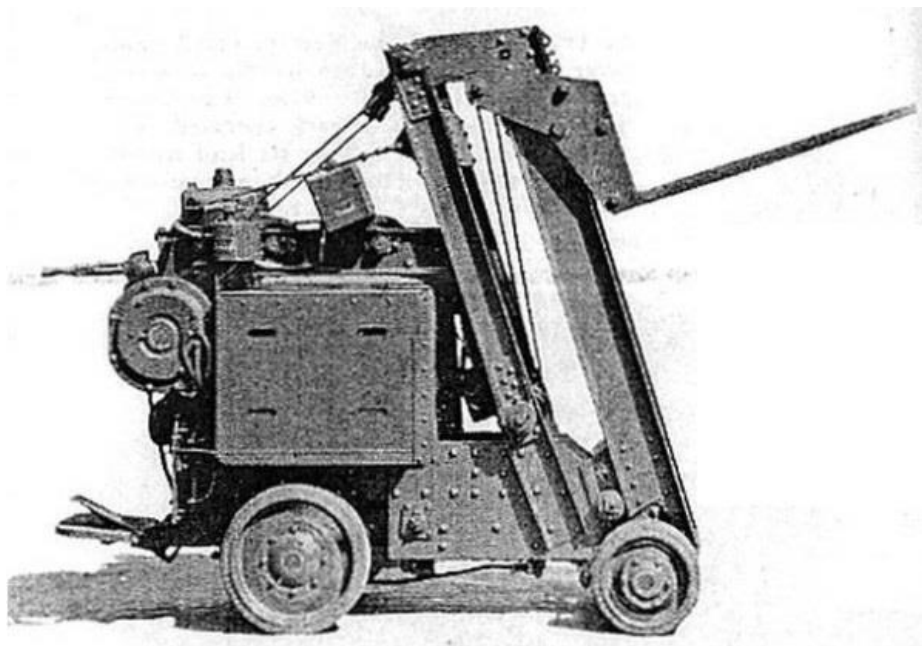




5 Carretilla tradicional en el ámbito industrial

El invento tuvo una gran acogida y junto con la demanda de más industrias en medio de la Primera Guerra Mundial, cada vez más eran los ingenieros que trabajaban en el desarrollo de nuevas mejoras.

Finalmente, en 1923 encontramos las primeras carretillas elevadoras tal y como las conocemos ya que se añadieron las horquillas y un mástil elevador.



6 Imagen de un primer prototipo industrial

El gran avance, pero, se produjo en 1950. La escasez de trabajadores a consecuencia de la Segunda Guerra Mundial y la normalización del palet, aceleró aún más la popularidad del invento. A partir de entonces las mejoras en diferentes ámbitos fue exponencial. Por un lado, la búsqueda de mayor potencia en los motores para elevar cargas más pesadas, se introdujo los motores diesel. Por otro lado, se añadió jaulas protectoras donde el trabajador se sentaba.

La evolución continua de la mano con la industria del automóvil, pero a diferencia a de este último, las ventas apenas han decaído por las diferentes crisis pasadas.

### 2.2.3 PRESENTE Y FUTURO

Como se ha comentado antes, el desarrollo de esta herramienta va en paralelo con el sector del automóvil. Es por eso por lo que desde hace ya varias décadas la conciencia ambiental ha producido muchos cambios como motores menos contaminantes. Los motores eléctricos y baterías reinan en este ámbito, las carretillas eléctricas permiten bajos consumos y menor coste de mantenimiento, en este aspecto es donde más se busca mejorar. (Cranes and Machinery, s.f.)



7 Carretilla de bajo consumo

Por otro lado, y tal vez menos importante, el diseño se ha visto estancado, ya sea porque poco se pueda hacer o por que se quiera. El aspecto de las carretillas elevadoras no varía entre las diferentes marcas líderes del sector por ejemplo Toyota, KION Group, Jungheinrich, etc.



8 Carretilla Toyota



9 Carretilla KION Group



10 Carretilla Jungheinrich

Final y paralelamente con lo descrito, cada vez más se está incorporando a la industria carretillas robotizadas que no necesitan un operario que los conduzca. La automatización robótica está en alza y aunque hay puntos que aún están por mejorar, como la seguridad y la precisión, no cabe duda de que en 'x' tiempo se impondrán frente a la carretilla convencional. (Toyota, s.f.)



11 Captura de animación de una carretilla autónoma

---

#### 2.2.4 REGULACIÓN VIGENTE

La normalización en global de este vehículo no existe, sí en cambio diferentes aspectos como la formación de operarios y capacidades en sus piezas como la horquilla.

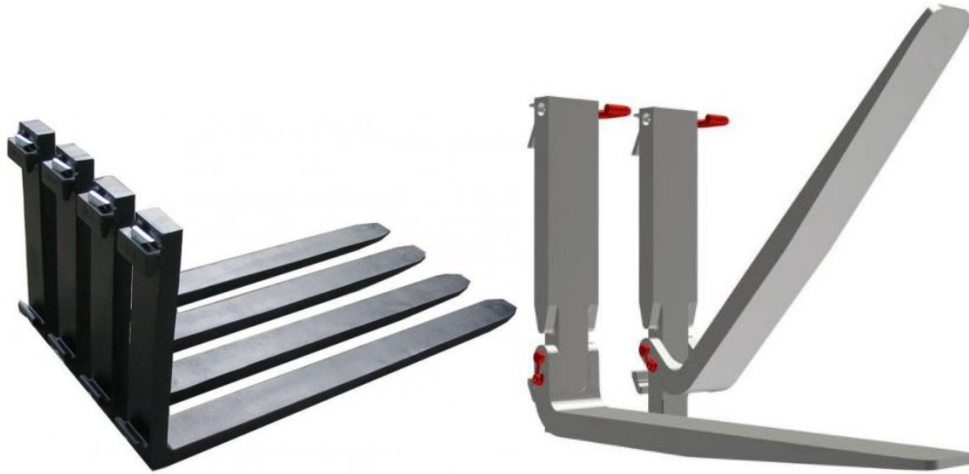
Con respecto al uso de la carretilla, actualmente en España no hay una formación normalizada oficial para ser conductor de carretillas elevadoras. En cambio, se encuentran reales decretos (Real Decreto 31/95 art. 18 y 19 de la Ley de prevención de Riesgos Laborales, Real Decreto 1215/1997, artículo 5) que garantiza que los trabajadores reciban una formación adecuada de las herramientas de trabajo, así como información sobre los riesgos laborales derivados de la utilización de estos. Es por eso, que la formación deberá estar centrada específicamente en el tipo de puesto de trabajo y tendrá que adaptarse periódicamente según la aparición de nuevas tecnologías.

Sí bien no hay formación concreta obligatoria, la enseñanza es impartida por la propia empresa o academia y esta deberá ser avalada y supervisada por un técnico de prevención de riesgos laborales.

Por otro lado, las entidades certificadas con la *ISO 9001 de gestión de calidad*, es requisito que sus operarios de carretillas hayan recibido formación específica según la *UNE 58451 Formación de los operadores de carretillas de mantenimiento hasta 10.000 kg*, normalizado por AEONOR desde el año 2012 (Didascalía Educational Group, s.f.).

### 2.3 CLASES DE HORQUILLAS Y CARACTERÍSTICAS

Las clases de horquillas son tan variadas como el uso que se les puede dar. En la búsqueda de ello, se encuentran desde horquillas plegables hasta alargadores para hacer más extensa el alcance de soporte de carga. (Llorsa carretillas, s.f.)



12 Horquilla estándar FEM

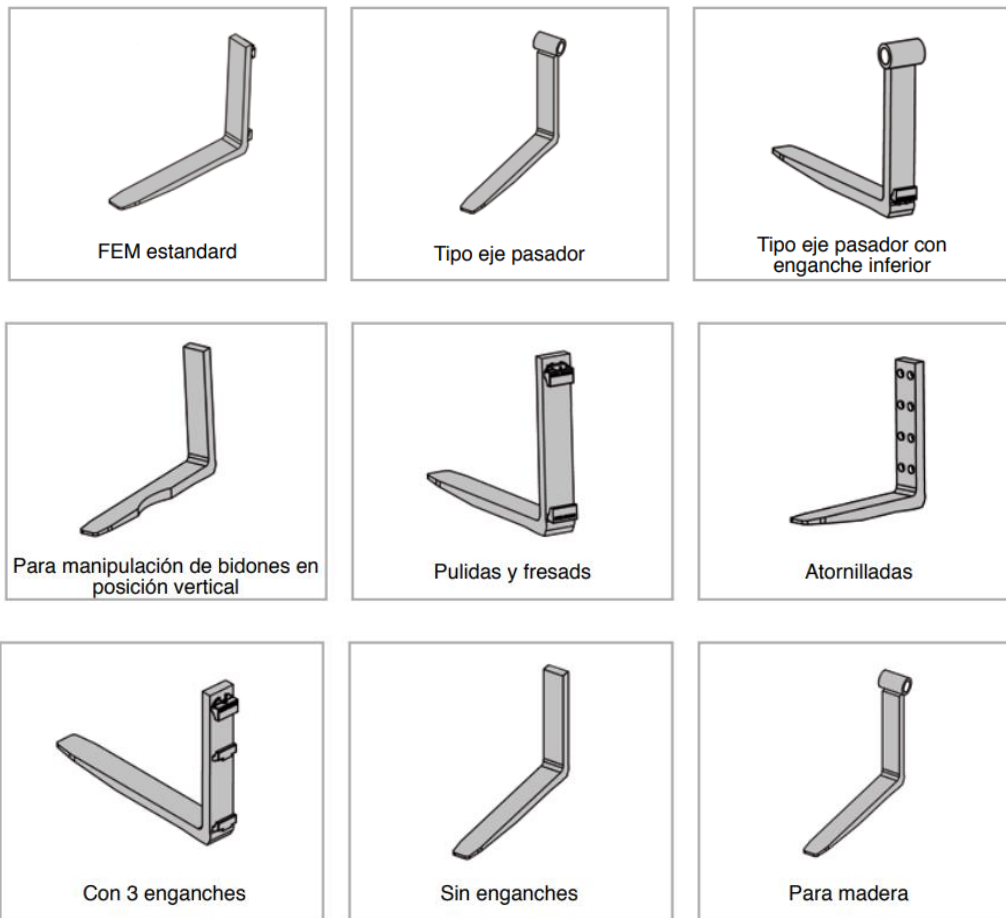
13 Horquillas plegables



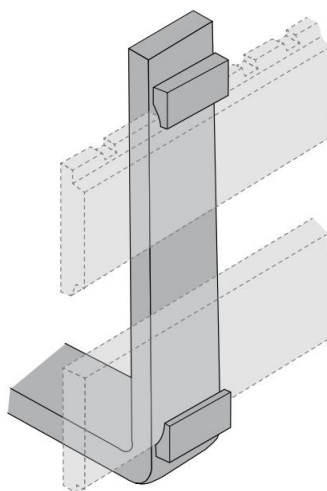
14 Extensión de horquillas

Al haber tanta riqueza en las diferentes situaciones que las carretillas y horquillas pueden verse expuestas, ya que no solo levantarán palets sino por ejemplo también bobinas industriales donde se necesitaran otro tipo de superficie en la horquilla. En este estudio se han clasificado principalmente por el tipo de montaje.

El tipo de montaje se refiere al acoplamiento de las horquillas con el portahorquillas. Este tipo de montajes varía principalmente según el tipo de carga y peso, entre otros factores, el tipo eje pasador por ejemplo son para las máquinas más pesadas:



Existen más tipos de agarre para otras aplicaciones. Este estudio se centrará en las horquillas con tipo de agarré FEM estándar. El anclaje tipo FEM son las más comunes en el mercado, homologadas para cargas hasta 11.000kg, se pueden acoplar a diferentes tableros o portahorquillas de diferentes fabricantes.



15 Imagen extraída de la norma UNE-ISO 2328 para anclajes tipo FEM

---

### 2.3.1 NORMATIVA VIGENTE

El estudio de centrará en las horquillas de agarre tipo FEM ya que es la única normalizada a nivel internacional entre fabricantes, tanto en Europa como en América, *ISO 2328:2020 Fork-lift trucks, Hook-on type fork arms and fork arm carriages, Mounting dimensions*. Esta norma que se mostrará con detalle más abajo, diferencia las horquillas entre clases según el peso y medidas relativas al enganche con el portahorquillas de la carretilla. (European Material Handling Federation, s.f.)

Por otro lado, de manera general existe otra norma en lo que se refiere el método de ensayos y pruebas de calidad tras la fabricación de la horquilla *ISO 2330:2002 Fork-lift trucks -- Fork arms - Technical characteristics and testing*). Las pruebas y ensayos son comunes para todos los tipos de agarres, no solo FEM. En referencia al estudio de esta norma, se destaca que tras ellas no puede haber desviación permanente ni fisuras.

### 2.3.2 PARTICULARIDADES DE LA HORQUILLA DE ANÁLISIS

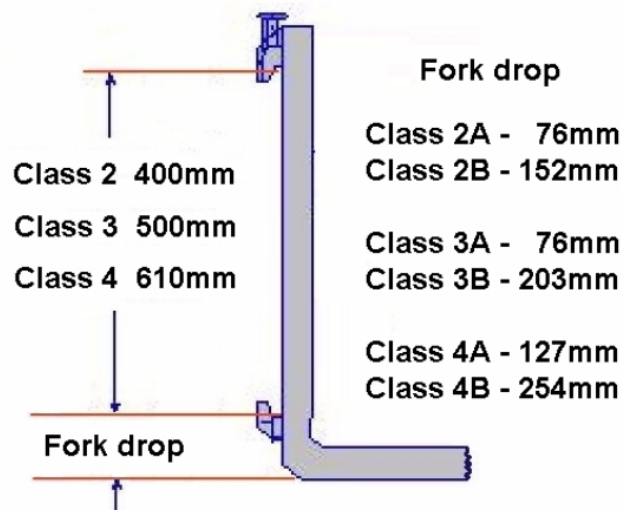
A partir de las normas antes mencionadas, se destacan los siguientes datos que se tendrán en cuenta en el estudio. La capacidad de carga para las horquillas normalizadas FEM están definidas según la norma *ISO 2328*.

| Capacidad nominal de la carretilla con el centro de carga a la distancia nominal |  | Tipo de brazo de horquilla | $a$<br>ref. | $c_1$<br>$+1,0$<br>$0$ | $h_1$<br>$\pm 3,0$ | $h_2$<br>tol. | $m_1$<br>máx. | $m_2$<br>máx. | $k_1$<br>mín. | Gancho inferior<br>$v$<br>máx. |     |
|--|--|----------------------------|-------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|-----|
| Clase  | kg/mm                                    |                            |             |                        |                    |               |               |               |               |                                |     |
| 1  | Hasta 999/<br>400 y 600 <sup>a</sup>     | A                          | 76          | 16,5                   | 394                | 306           | $+1,0$<br>$0$ | 28            | 26            | 14                             | 90  |
|  |  | B                          | 114         |                        | 432                |               |               |               |               |                                |     |
| 2  | 1 000 a 2 500/<br>500 y 600 <sup>b</sup> | A                          | 76          | 16,5                   | 470                | 382           | $+1,0$<br>$0$ | 31            | 29            | 14                             | 90  |
|  |  | B                          | 152         |                        | 546                |               |               |               |               |                                |     |
| 3  | 2 501 a 4 999/<br>500 y 600 <sup>b</sup> | A                          | 76          | 22                     | 568                | 477           | $+1,5$<br>$0$ | 40            | 38            | 17                             | 115 |
|  |  | B                          | 203         |                        | 695                |               |               |               |               |                                |     |
| 4  | 5 000 a 8 000/<br>600                    | A                          | 127         | 26                     | 743                | 598           | $+1,5$<br>$0$ | 47            | 45            | 20                             | 139 |
|  |  | B                          | 254         |                        | 870                |               |               |               |               |                                |     |
| 5  | 8 001 a 10 999/<br>600                   | A                          | 127         | 35                     | 830                | 680           | $+1,5$<br>$0$ | 65            | 63            | 26                             | 164 |
|  |  | B                          | 257         |                        | 960                |               |               |               |               |                                |     |

a En Estados Unidos se usan 600 mm.  
b En Estados Unidos, Asia y Australia se usan 600 mm.

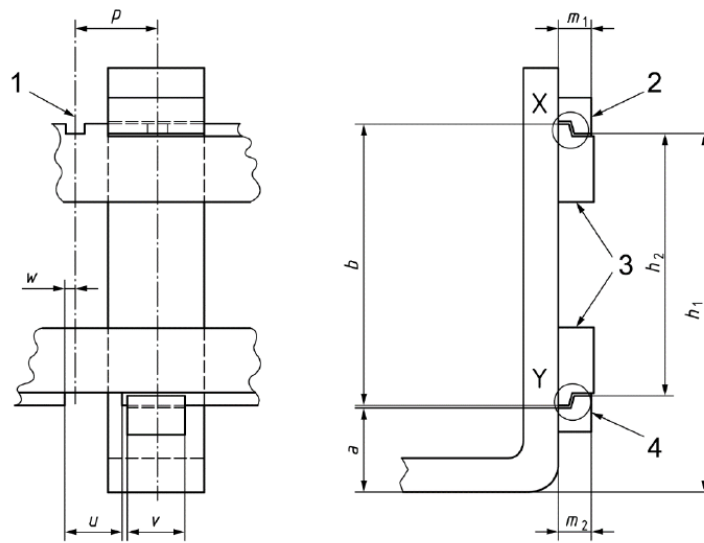
16 Tabla del dimensionado de las horquillas tipo FEM extraída de la norma UNE-ISO 2328

Las clases van determinadas por el peso y por la altura de la horquilla. El tipo A o B corresponde a la distancia entre el suelo y el gancho inferior (*Fork drop*). (TVH Parts Holding, s.f.)



17 Ilustración de los criterios para el tipo de clase de horquillas FEM

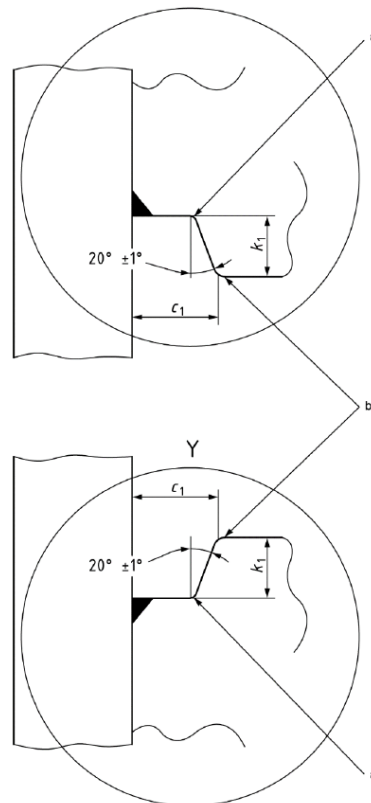
Para este proyecto se escogerá la clase de horquilla más adecuado requerido por el cliente. Las demás medidas de la tabla se muestran a continuación, pero para más detalles las dos normas antes mencionadas se encuentran en los anexos.



Leyenda

- 1 Línea de centro del tablero
- 2 Gancho superior
- 3 Tablero porta-horquillas
- 4 Gancho inferior

18 Plano extraído de la norma UNE-ISO 2328



19 Plano extraído de la norma UNE-ISO 2328



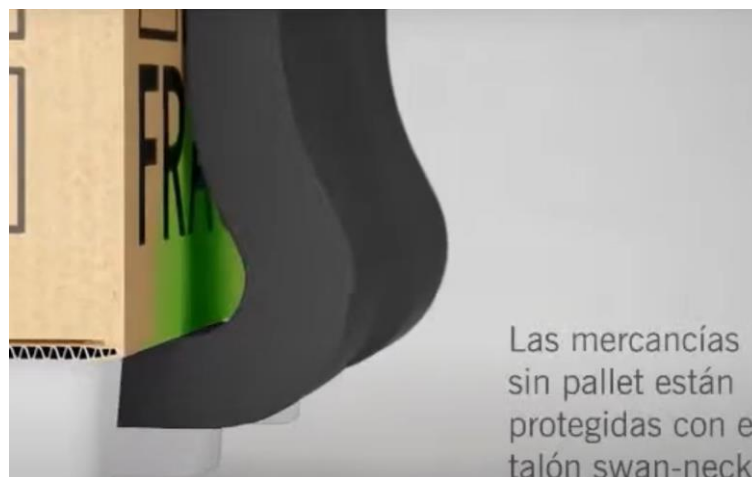
Como añadido, una característica extendida en el diseño de horquillas son los talones de cuello ahuecado (swan-neck). Estas no dañan la mercancía que pueda toparse con la esquina de la horquilla (Tymbia, s.f.):



20 Ilustración comparativa entre tipo de talones



21 Ilustración de carga dañada por talón clásico



22 Ilustración de carga sin afectación gracias al talón ahuecado

Esta tecnología, aunque no está normalizada, se incluirá al estudio en comparación con los talones comunes, ya que las tensiones internas debido al cambio geométrico pueden ser significativas.

### 2.3.2 FABRICACIÓN Y MATERIALES

El acero es el material por excelencia para este tipo de piezas ya que tiene propiedades mecánicas que ayudan a una maleabilidad y maquinabilidad a la hora de darle forma y proporciona la gran resistencia necesaria para todo tipo de esfuerzos externos.

El acero es una aleación férrica de base con un porcentaje determinado de carbono, este porcentaje hace variar sus capacidades estructurales, de este tema se hablará más adelante en el capítulo 4.

Por otro lado, el método de fabricación para piezas como horquillas es la forja. El forjado es el proceso de deformación plástica de un material mediante esfuerzos externos en condiciones de alta temperatura en la mayoría de los casos. (ULMA Advanced Forged Solutions, 2020)



23 Captura de proceso de forja



24 Imagen de forjado a niveles industriales para piezas de gran tamaño

La temperatura en la que se realiza este proceso es uno de los parámetros clave ya que, si es cercana a la temperatura de fundición del material, esta presenta mayor ductilidad y por lo tanto se requiere menos energía en cuanto a los esfuerzos aplicados. (Departament de Ciència i Enginyeria de Materials ESEIAAT)

Para el caso de las horquillas u otras piezas que necesiten soportar esfuerzos considerables estructuralmente, el método de conformado utilizado es el forjado en frío (ETMA Metal Parts, 2018). El forjado en frío (o en tibio porque nunca se hace a temperatura ambiente) permite acabados más limpios en el sentido de que luego no hay cambios geométricos por contracción

al enfriar (Soluciones Globales y Gestión de Compras S.L., s.f.) (Duatis, 2013). Por último y no menos importante, la forja en frío provoca que los cristales o microestructura del material estén orientado, añadiendo una resistencia extra. Junto con la acritud producida por el enfriamiento con proceso de conformado se logran obtener materiales muy resistentes con gran variedad dimensional.

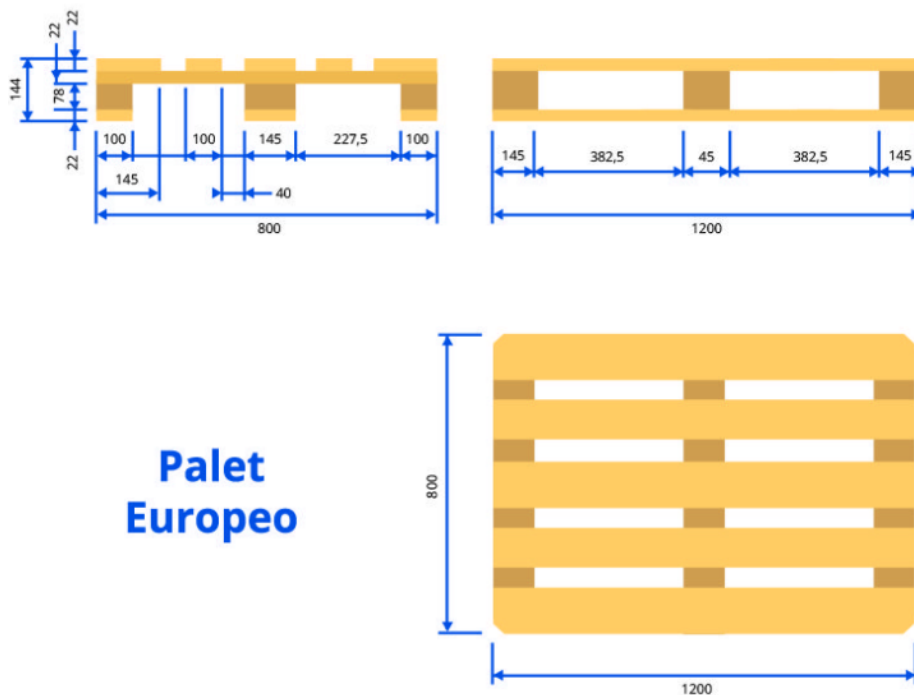
## CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL DISEÑO

### 3.1 PREDISEÑO

El prediseño se basará en las condiciones exigidas por el cliente (reflejadas en requerimientos).

La primera clausula por la cual vendrá dado las dimensiones generales de la horquilla, es que la horquilla deberá transportar palets europeos. En base al palet, la carga puede ascender hasta 5.000 kg, valor que sitúa en horquillas de clase 3 según la norma ISO 2328 (Nozal, 2018). El tipo A o B dependerá del tipo de portahorquillas, se decide que será el de tipo A, está elección no será a priori significativa ya que solo afectaría ligeramente a las dimensiones de los enganches.

Por otro lado, las medidas de los palets europeos vienen homologados por la norma *UNE-EN 13698-1:2003 Especificación para la producción de paletas* (ver en anexos).

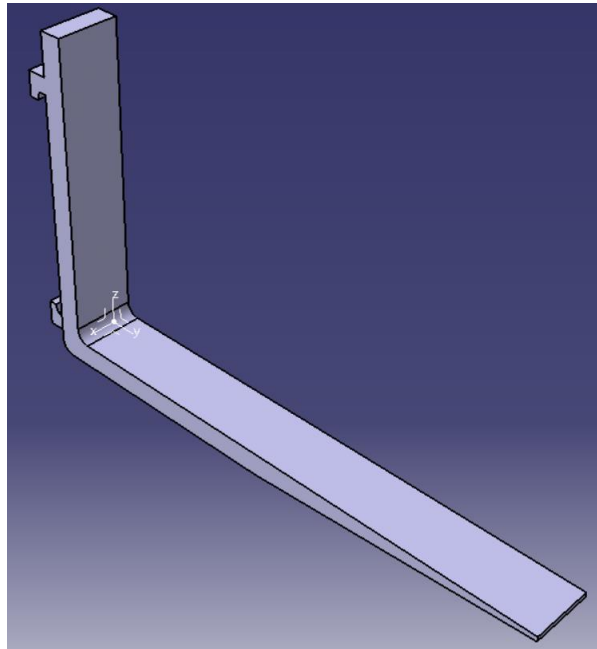


25 Dimensionado de palets europeos homologados

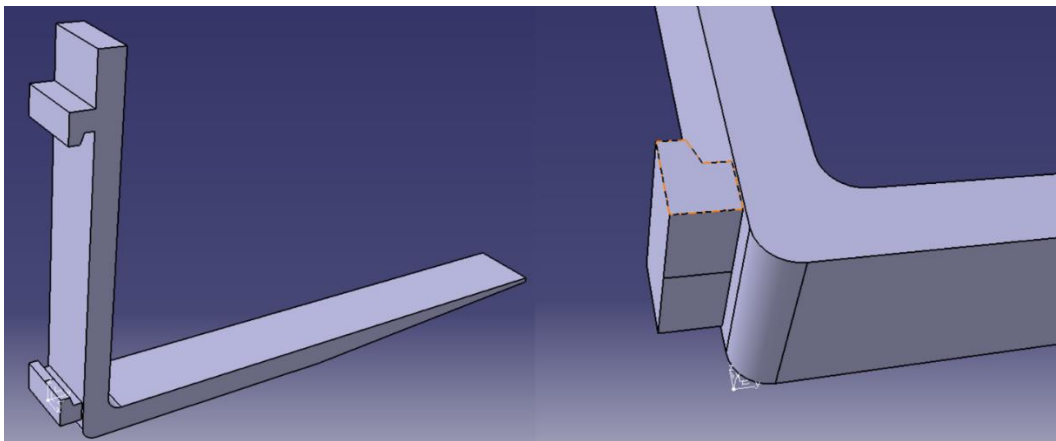
Dado que las horquillas tienen medidas normalizadas solo a lo que se refiere el enganche, en el mercado podemos encontrarlas dimensionadas de manera variada, por ejemplo, la longitud plana se haya desde 1000 mm de largo hasta 1800mm (Intella Parts Company, s.f.) (North Fork Ltd, s.f.). Por las características de palet, una longitud de de 1000mm ya sería conveniente, está se introduciría por el lado del palet de 1200mm, hasta sobrepasar el ancho del palet de 800mm.

También hay que tener en cuenta la sección de la horquilla ya que, si sobre los 78 mm de altura como se muestra en la imagen, el espacio que tiene el palet para introducirse, la horquilla no podrá entrar.

En resumen, el primer prediseño del palet tendrá unos valores geométricos medios según lo que se encuentra en el mercado para horquillas clase 3 tipo A, con unas restricciones en la altura de la sección como máximo de 78mm y una longitud horizontal de 1000mm, este último, un valor óptimo ya que más largo no sería necesario.



26 Captura de vista isométrica del prediseño por CATIA



27 Vistas extras del prediseño

Las imágenes anteriores son del primer diseño de la horquilla. Según los próximos cálculos y elementos que veamos necesarios modificar, se llegará al diseño final con las dimensiones definitivas.

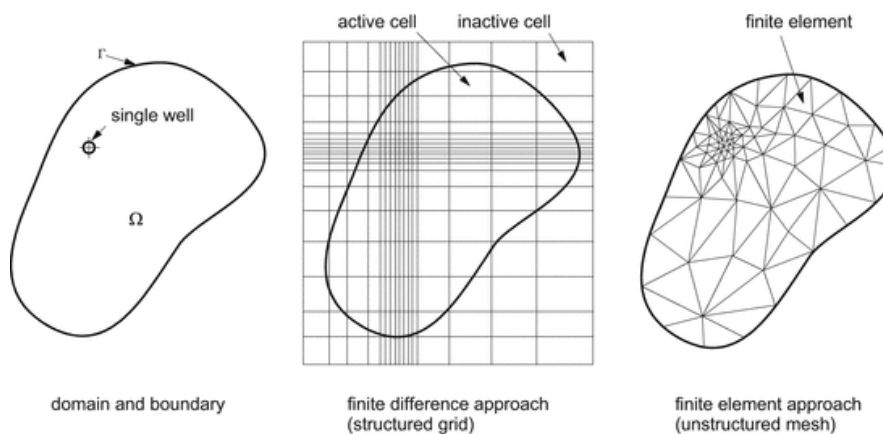
### 3.2 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Tras modelizar la pieza con CATIA, está se es exportado al programa ANSYS, un programa de elementos finitos que se explica a continuación.

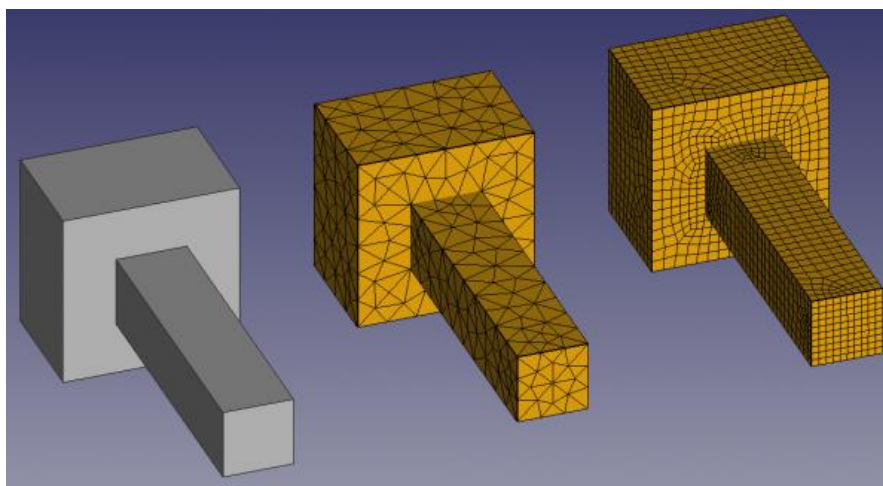
El método de los elementos finitos MEF o en inglés FEM, se trata de un sistema numérico ampliamente aplicado en diferentes campos de la ingeniería. El programa ANSYS hace uso de este método en un interfaz gráfico que permite resolver problemas físicos de solidos expuestos a condiciones en la vida real, casos de mecánica, fluidos, transferencia de calor y problemas electromagnéticos. En lo que este trabajo se refiere, nos enfocaremos en el análisis estático de las horquillas.

De manera general, el método se podría definir como la resolución de ecuaciones diferenciales aplicadas a pequeños elementos del cuerpo de análisis. Su utilidad es variada ya que según características del ejercicio se pueden customizar varios parámetros:

- Malla: división en pequeñas partes del sujeto a analizar.
- Elemento finito: integrante de cada parte de la malla, en la imagen anterior se puede observar cómo los elementos finitos de la malla derecha son más reducidos.
- Nodos: puntos de análisis (no necesariamente en el límite) entre los elementos finitos.

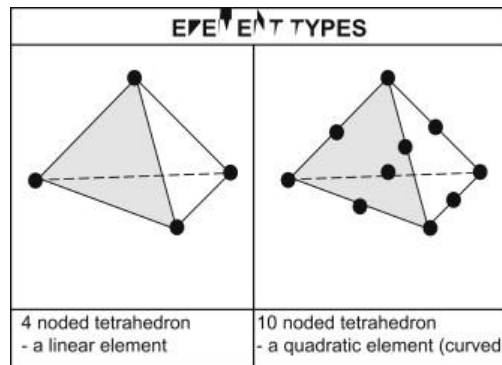


28 Ejemplos de composición de mallas en 2D



29 Ejemplos de composición de mallas en 3D

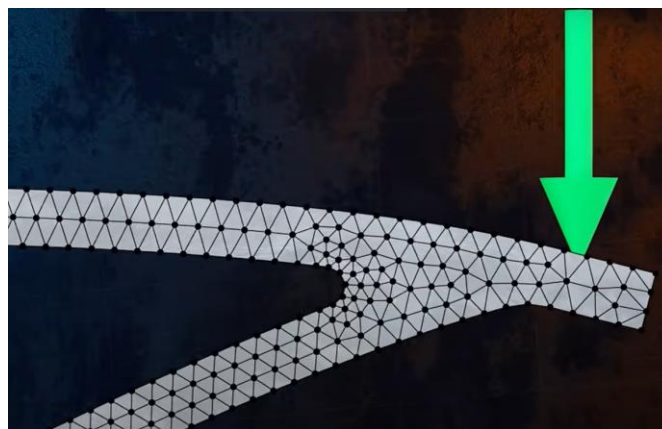
La siguiente figura ilustra estas partes, el elemento finito sería el tetraedro y los nodos, los puntos donde se aplican las ecuaciones.



30 Elemento finito en 3D con variación de nodos

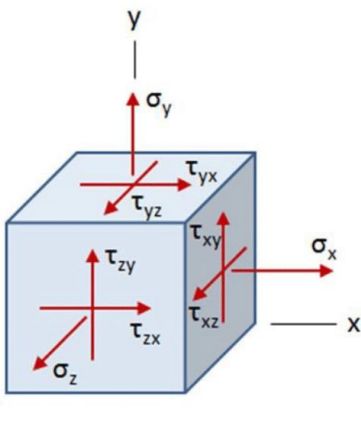
Según la complejidad geométrica las mallas se pueden adaptar, por ejemplo, en un elemento curvo, sería más adecuado seleccionar tetraedros que elementos cuadrados. También, la elección del tamaño del elemento finito puede diferir dependiendo de la calidad de los resultados que se quieran obtener. Este proceso de elección de mallas y nodos se le llama discretización. (Zhang, Jhuo, Liu, & Guo, 2020)

A partir de esto, más la incorporación de condiciones externas de cada caso, fuerzas, temperatura, etc. la complejidad y diversidad de cómo atacar un problema ingenieril es extensa.



31 Ejemplo de carga puntual sobre solido mallado

Por otro lado, en cada nodo se aplican las ecuaciones diferenciales correspondientes al caso, de la resolución de estas ecuaciones se encarga el programa. Por ejemplo, para calcular si un material puede soportar una carga sin romperse, se podría calcular las tensiones de Von Mises.

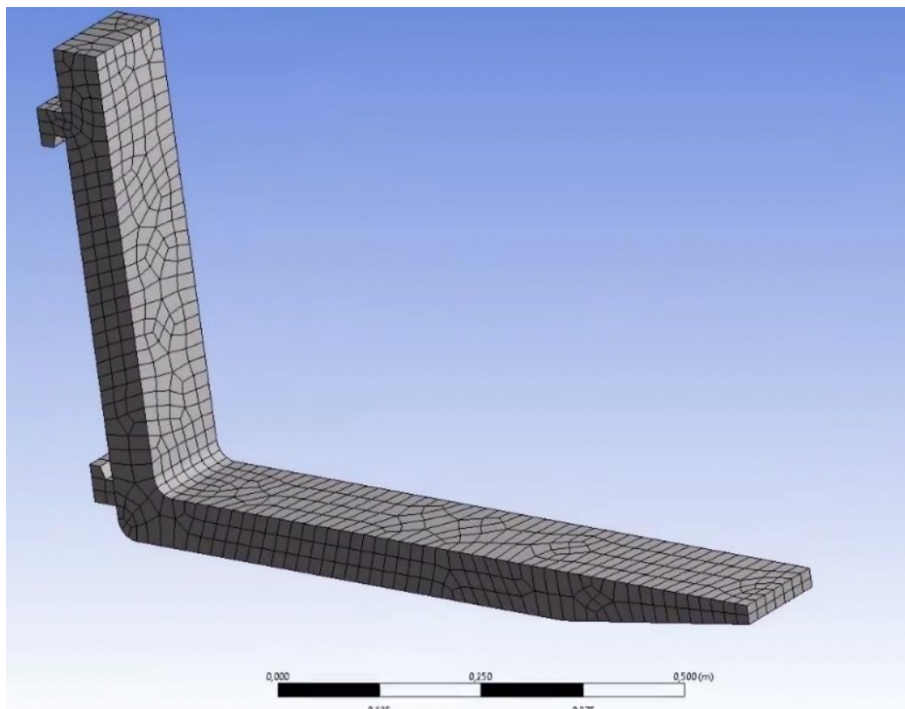


$$\sigma_{vm} = \sqrt{0.5 \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

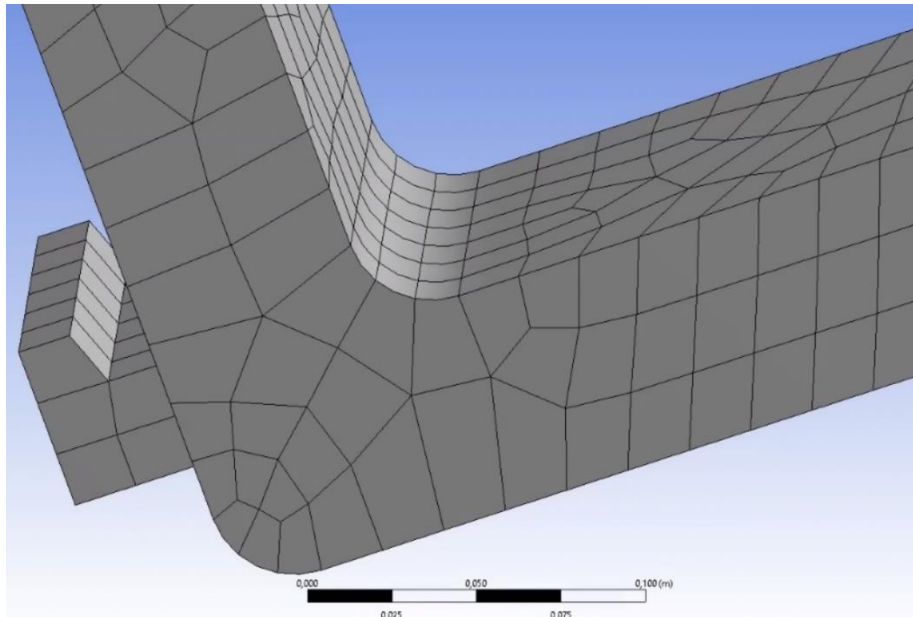
32 Ilustración de la tensión de Von Mises a un elemento diferencial

Los programas de elementos finitos como ANSYS realizan estos cálculos en cada punto definido por la malla.

En el caso de este estudio, no se profundizará en las variaciones que se puedan modificar en la malla o nodos. Por las características de forma de la horquilla, la malla más adecuada será la que incorpora elementos hexaedros, concretamente en ANSYS hexaedro dominante, donde el hexaedro puede dividirse si así es necesario por la forma del sólido.



33 Captura del mallado de horquilla en ANSYS



34 Mallado más concreto en donde se encuentra la curvatura de la horquilla

### 3.2 FUNCIONAMIENTO

A continuación, se explicará las condiciones a la que se expone las horquillas.

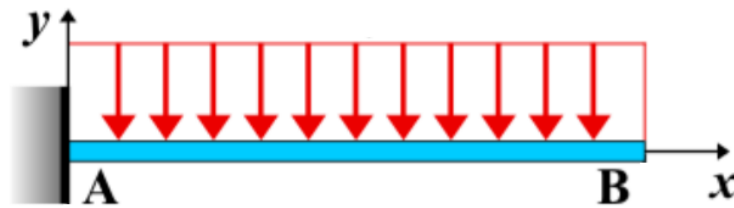
Las horquillas en la mayoría de los casos levantan palets, haciendo así que la carga se reparta en la superficie de apoyo de la horquilla como se muestra en la imagen.



35 Carretilla convencional en uso



Es por eso por lo que en este estudio la primera aproximación de cálculos se realizará será considerando la parte horizontal de la horquilla como una viga empotrada en voladizo, sujetando una carga repartida en toda su superficie:



Tras esta consideración y su estudio teórico y simulado (en el próximo capítulo), se trasladará al caso real con la horquilla al completo.

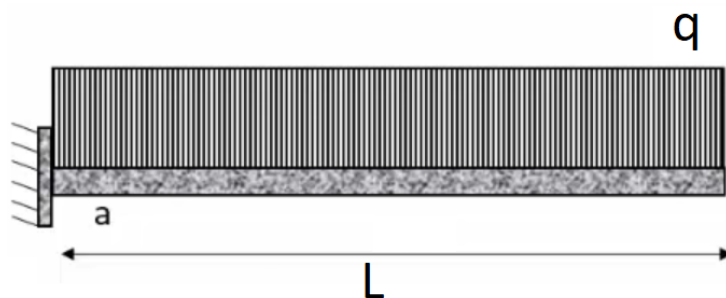
## CAPÍTULO 4. CÁLCULO Y SIMULACIONES

### 4.1 ANÁLISIS TEÓRICO ESTRUCTURAL

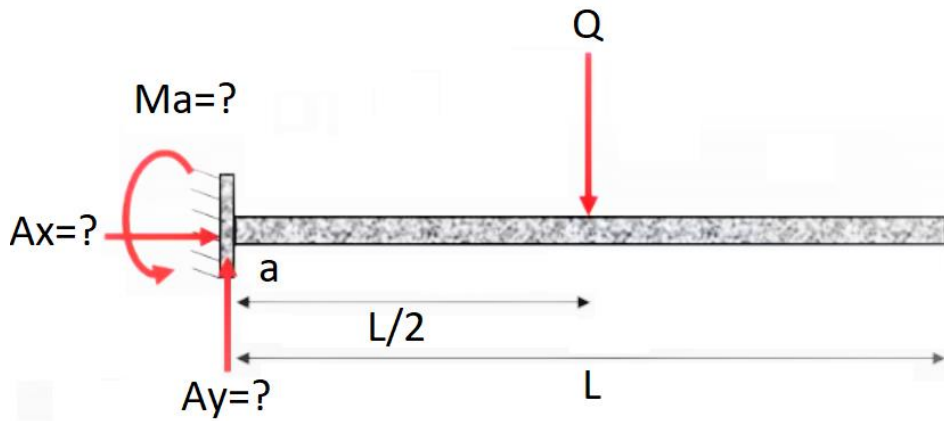
Para empezar, se tratará el problema analíticamente como una barra en voladizo donde en uno de sus extremos está empotrado. Aunque no sea así en la realidad de una horquilla, esto permitirá tener unos primeros valores como punto de partida.

#### 4.1.1 REACCIONES

Este ejercicio es un ejemplo básico de análisis de estructuras, primeramente, se encuentran reacciones en X, Y y momento en la parte empotrada de la viga ya que la viga se mantiene en equilibrio y estas reacciones compensan las demás externas a las que está expuesta la viga.



La carga repartida  $q$  será los kilos máximos impuestos que pueda soportar la horquilla, dividida por la longitud  $L$  de la horquilla.



La carga repartida se puede considerar, para encontrar las reacciones, como una carga puntual su centro de masas, en la imagen la carga  $Q$ .

$$Q = q \cdot L \cdot g$$

Finalmente, aplicamos las ecuaciones básicas de equilibrio y obtenemos las reacciones en el empotramiento:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x \cong 0$$

$$+ \curvearrowright \sum M_a = 0 \quad 0 = M_a - Q \cdot \frac{L}{2} \rightarrow \boxed{M_a = Q \cdot \frac{L}{2}}$$

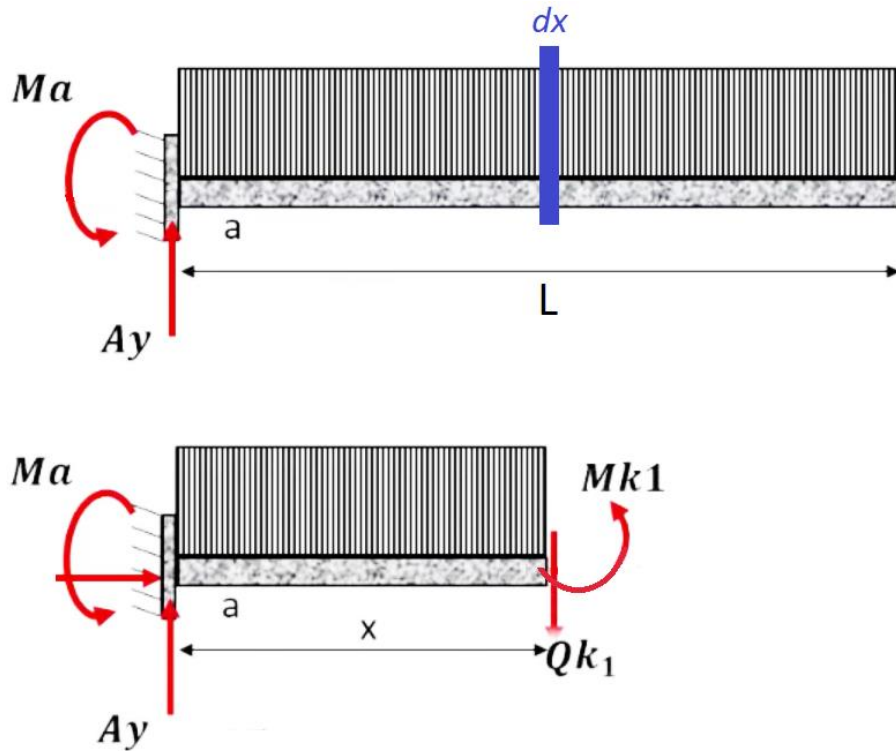
$$+ \uparrow \sum F_y = 0 \quad 0 = A_y - Q \rightarrow \boxed{A_y = Q}$$

Estas reacciones, como veremos a continuación, serán necesarias para encontrar las fuerzas internas y deformaciones de la viga.

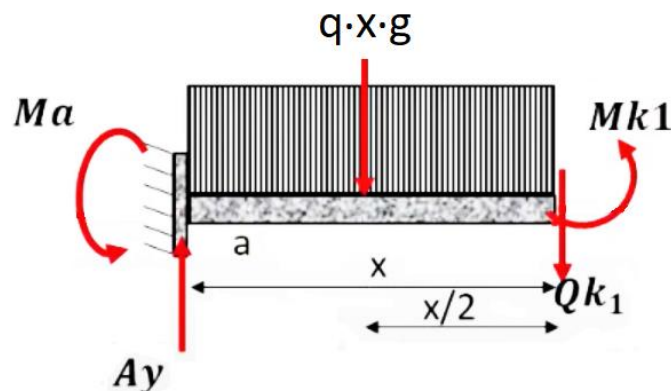
#### 4.1.2 FUERZAS INTERNAS

En el próximo análisis se estudiará los efectos internos en la viga. Para ello se utiliza el método de las secciones o cortes.

Se realiza un corte a una distancia  $x$  del punto  $a$  del empotramiento y se hace el estudio por un lado del sólido.



En esta parte de la viga, también se debe cumplir las ecuaciones de equilibrio, por lo tanto, por un lado, tendremos las fuerzas externas y reacciones y por el otro las fuerzas internas de la viga  $Q_{k1}$  y  $M_{k1}$ .



Se aplican las ecuaciones de equilibrio por el lado izquierdo del corte:

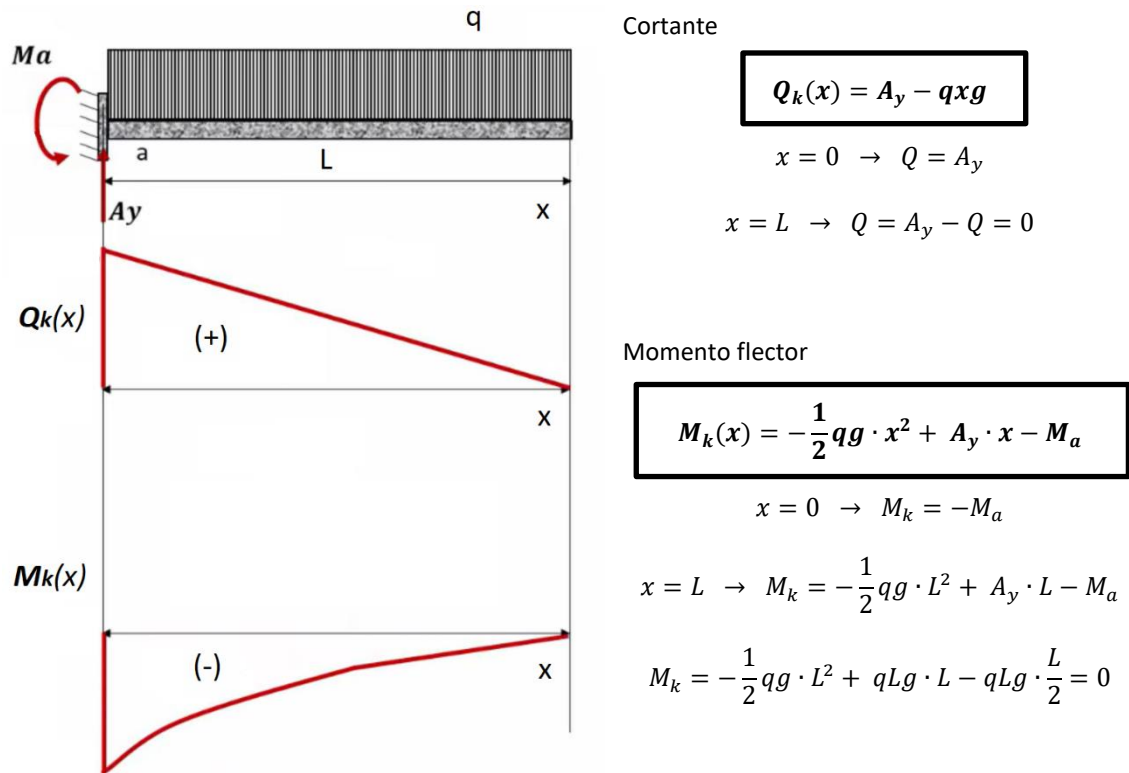
$$\sum F_y = 0 \quad 0 = A_y - q x g - Q_{k1} \quad \rightarrow \quad Q_{k1} = A_y - q x g$$

$$\sum M_k = 0 \quad 0 = M_a - A_y \cdot x + q x g \cdot \frac{x}{2} + M_{k1} \quad \rightarrow \quad M_{k1} = -\frac{1}{2} q g \cdot x^2 + A_y \cdot x - M_a$$

Sabiendo las reacciones encontradas anteriormente:

$$M_a = Q \cdot \frac{L}{2} ; A_y = Q = q \cdot L \cdot g$$

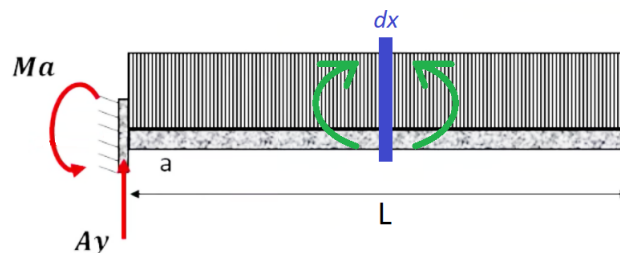
Encontramos las ecuaciones de las fuerzas internas a lo largo de la viga:



El signo positivo del cortante indica que a lo largo de la viga habrá una fuerza interna vertical hacia arriba, algo lógico en este caso para contrarrestar la carga externa.

Algo menos intuitivo es el signo negativo del momento flector, como el análisis se ha hecho por el lado izquierdo del corte, este indica un momento negativo, una tendencia a girar en sentido horario. Por equilibrio en el lado derecho para compensar el momento generado por la carga, el momento flector será positivo.

También es reseñable que la sección crítica de la viga se encuentra próxima al empotramiento ya que, al tener esa parte inmovilizada, las tensiones internas aumentan dada la imposibilidad de movimiento.



Para concluir, la sección crítica se identifica de manera clara en la parte empotrada donde se concentra los máximos en valor absoluto de las fuerzas cortantes y momento flector, echo que se deberá corroborar en las simulaciones.

#### 4.1.3 DEFORMACIONES

En este apartado se van a calcular las deformaciones mediante los teoremas de Mohr, hay que tener presente que las siguientes ecuaciones hacen referencia solo a las pequeñas deformaciones.

- Cálculo de giro  $\theta$ :



Al ser un segmento continuo se puede aplicar el primer Teorema de Mohr, donde se encuentra el giro en  $x$  a lo largo de la viga:

$$\theta' \equiv \frac{d\theta(x)}{dx} \approx \frac{M_z(x)}{E(x) I_z(x)}$$

$$\theta_{AB} = \theta_B - \theta_A = \int_{x_A}^{x_B} \frac{M_z(x)}{E(x) I_z(x)} dx$$

$E$ : módulo de Young     $I$ : inercia de la sección

Imponiendo que no hay giro en  $a$  ya que está empotrado  $\theta_A = 0$ :

$$\theta_{AB} = \theta_B = \int_0^L \frac{M_z(x)}{E \cdot I} dx$$

Integramos:

$$\theta_B = \int_0^L \frac{1}{EI} \cdot \left( -\frac{1}{2} qg \cdot x^2 + A_y \cdot x - M_a \right) dx$$

$$\theta_B = \frac{1}{EI} \left[ \int_0^L -\frac{1}{2} qg x^2 dx + \int_0^L A_y x dx - \int_0^L M_a dx \right]$$

$$\theta_B = \frac{1}{EI} \left[ \int_0^L -\frac{1}{2} qg x^2 + A_y x - M_a dx \right]$$

Resolvemos:

$$\theta_B = \frac{1}{EI} \left[ -\frac{qgL^3}{6} + \frac{A_y L^2}{2} - M_a L \right]$$

Sabiendo que:

$$M_a = Q \cdot \frac{L}{2} ; A_y = Q = q \cdot L \cdot g$$

Obtenemos la forma reducida:

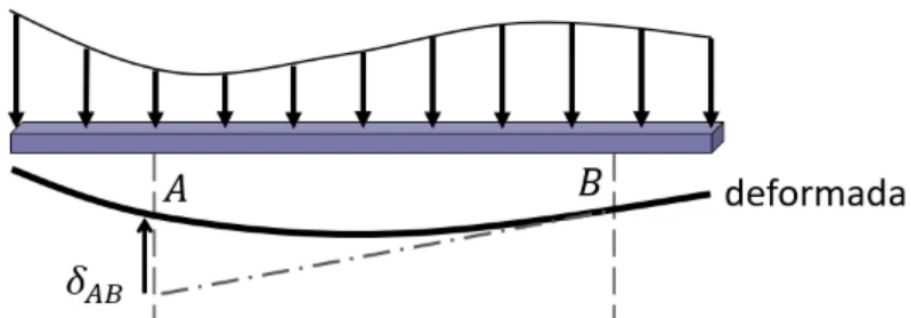
$$\theta_B = -\frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{qgL^3}{6} \right)$$

Resultado negativo ya que lógicamente el giro sería hacia abajo:



- Cálculo de desplazamientos  $\delta$ :

Para esta parte se empleará el segundo Teorema de Mohr. La próxima imagen ayuda a entender los términos del teorema, se identifica la distancia  $\delta$  entre 2 puntos A y B, como la tangente en el segundo punto B de la curva elástica de la viga, y desde donde cruza esta tangente con la vertical de A, el desplazamiento es la distancia vertical de la intersección con el punto A en la deformada. Valores relativos ya que están referenciados entre puntos de la deformada.



En el caso de la viga al tener un lado empotrado, la línea tangente coincidiría con la horizontal, por lo tanto, se obtiene el desplazamiento vertical del punto opuesto, un valor absoluto y no relativo al tener el punto de referencia fijo y conocido.

La forma analítica del teorema es:

$$\delta_{AB} = - \int_{x_A}^{x_B} (x - x_A) \frac{M_z(x)}{E(x) I_z(x)} dx$$

Aplicado a nuestro caso queda de la siguiente manera, donde la tangente es del punto A empotrado:

$$\begin{aligned}\delta_{BA} &= - \int_0^L (x-L) \frac{M_z(x)}{EI} dx \\ \delta_{BA} &= - \frac{1}{EI} \int_0^L (x-L) \cdot \left( -\frac{1}{2} qg \cdot x^2 + A_y \cdot x - M_a \right) dx = \\ &= - \frac{1}{EI} \int_0^L \left( -\frac{1}{2} qg \cdot x^3 + A_y \cdot x^2 - M_a \cdot x + \frac{1}{2} qgL \cdot x^2 - A_y L \cdot x + M_a L \right) dx = \\ &= - \frac{1}{EI} \left[ -\frac{1}{2} qg \cdot \frac{x^4}{4} + A_y \cdot \frac{x^3}{3} - M_a \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{1}{2} qgL \cdot \frac{x^3}{3} - A_y L \cdot \frac{x^2}{2} + M_a L \cdot x \right] =\end{aligned}$$

Evaluado de 0 a L y conociendo las reacciones:

$$\begin{aligned}M_a &= Q \cdot \frac{L}{2} ; A_y = Q = q \cdot L \cdot g \\ &= - \frac{1}{EI} \left[ -\frac{1}{2} qg \cdot \frac{L^4}{4} + qLg \cdot \frac{L^3}{3} - qLg \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{L^2}{2} + \frac{1}{2} qgL \cdot \frac{L^3}{3} - qLg \cdot L \cdot \frac{L^2}{2} + qLg \cdot \frac{L}{2} \cdot L \cdot L \right] = \\ &= - \frac{1}{EI} \left[ -\frac{1}{8} qg \cdot L^4 + \frac{1}{3} qg \cdot L^4 - \frac{1}{4} qg \cdot L^4 + \frac{1}{6} qg \cdot L^4 - \frac{1}{2} qg \cdot L^4 + \frac{1}{2} qg \cdot L^4 \right] = \\ &= - \frac{q g L^4}{EI} \left[ -\frac{1}{8} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] = - \frac{q g L^4}{EI} \left[ -\frac{1}{8} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} \right] =\end{aligned}$$

Ecuacion final del desplazamiento en B:

$$\delta_{BA} = - \frac{q g L^4}{EI} \left[ -\frac{1}{8} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} \right] = - \frac{q g L^4}{8 EI}$$

Finalmente las ecuaciones de la deformada son en B son:



$$\text{Giro: } \theta_B = - \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{qgL^3}{6} \right)$$

$$\text{Desplazamiento: } \delta_{BA} = - \frac{q g L^4}{8 EI}$$

## 4.2 MODELIZACIÓN

### 4.2.1 DIMENSIONADO

Tras los cálculos anteriores, se debe adaptar la pieza al caso en particular. Teniendo las reacciones y las ecuaciones de fuerzas internas a continuación se buscará la sección de la viga empotrada y por consiguiente la horquilla.

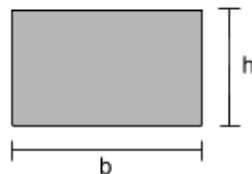
El desplazamiento vertical máximo de la punta de la horquilla debido a la carga máxima admisible no debe sobrepasar el 1% de la longitud horizontal. Por lo tanto, 1% de 1000mm, el desplazamiento máximo será 10mm.

Debido a que el estudio teórico no es fiel exactamente a la realidad, ya que la parte empotrada no existe en la horquilla y sí que habrá una rotación y desplazamiento. Se buscará una viga en voladizo lo suficientemente rígida para que al simular la horquilla entera con la misma sección, la deformación siga siendo admisible.

Así pues, se decide dimensionar la viga para que como máximo se desplace un 0,5% de L, 5mm. Esto es debido a que posteriormente aplicándolo a la horquilla, este desplazamiento será mayor.

Para el dimensionado de la sección de la viga y posteriormente de la horquilla, el estudio se basará en la ecuación de desplazamiento antes encontrado:

$$\text{Desplazamiento: } \delta = -\frac{q g L^4}{8 E I} ; I = \frac{1}{12} b h^3$$



Si se requiere un menor desplazamiento, en este caso un máximo de 5mm, la longitud L y altura de la sección h son los valores más significativos matemáticamente.

$$|\delta_{BA}| = 5 \text{ mm} = \frac{q g L^4}{8 E I} ; I = \frac{1}{12} b h^3$$

La longitud L de la viga ya se ha decidido que será 1000mm y la base b al no ser tan significativa como la h se escoge una medida estandar encontrada para esta clase de horquilla, 125mm, por lo tanto, se asila el último valor que queda por decidir, la h:

$$5 \text{ mm} = \frac{q g L^4}{8 E \cdot \frac{1}{12} b h^3} ; |h| = \sqrt[1/3]{\frac{12 \cdot q g L^4}{5 \cdot 8 E b}} = 66,51 \text{ mm} \approx 67 \text{ mm}$$

Se concluye que para empezar, la viga empotrada tendrá una sección de 125x67mm, posteriormente si se valida con las simulaciones, se procederá a implementarlo en toda la horquilla.



#### 4.2.2 SIMULACIONES

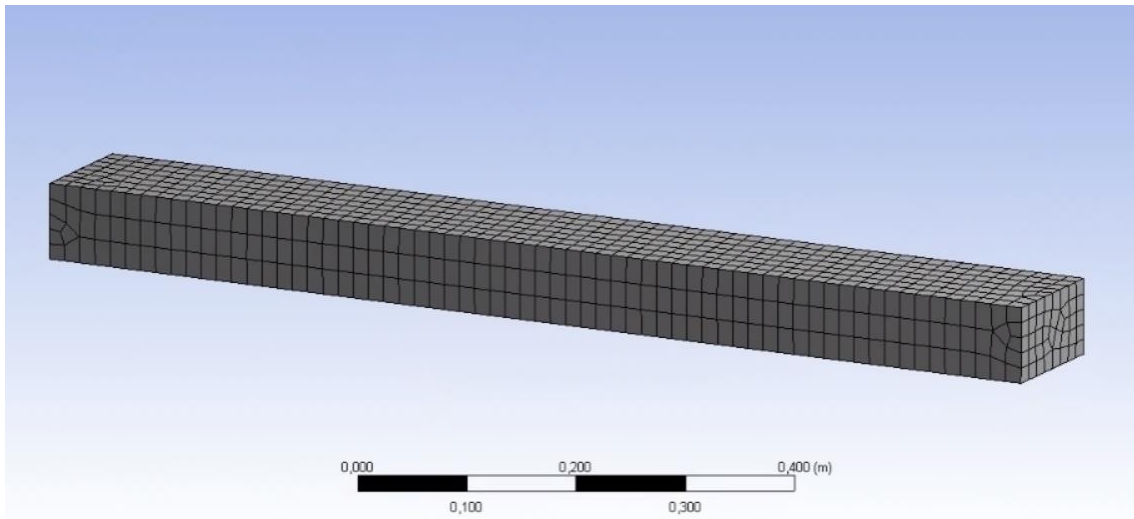
Primero se simula la viga empotrada con la sección antes encontrada además de los siguientes valores propios del material y de las condiciones impuestas en el estudio:

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| L [mm]                   | 1000    |
| E acero [MPa]            | 200 000 |
| Capacidad horquilla [kg] | 2499,5  |
| b [mm]                   | 125     |
| h [mm]                   | 67      |

La capacidad de la horquilla será la máxima que podrá soportar las clases de horquillas tipo 3A dividida entre dos ya que son dos horquillas las que sujetan el palet.

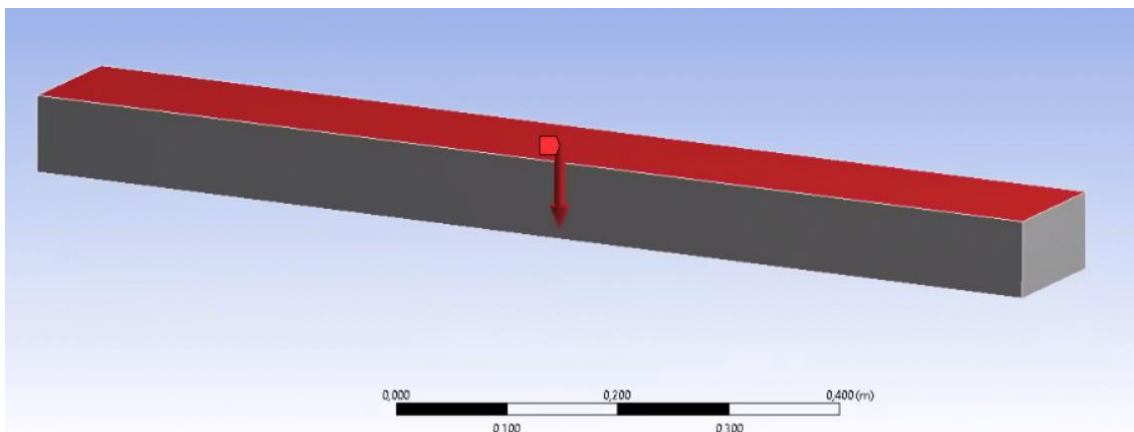
Así pues, se continúa se procede a simular aplicando los siguientes pasos:

Malla escogida hexaedro dominante:



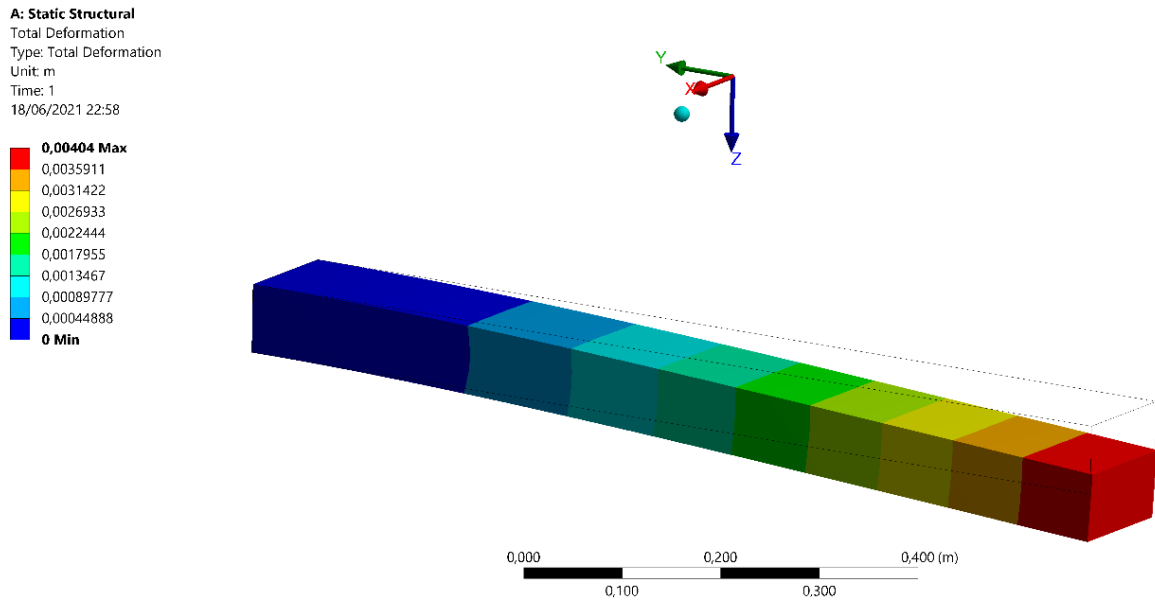
36 Mallado aplicado a la viga en voladizo en ANSYS

Carga externa distribuida:

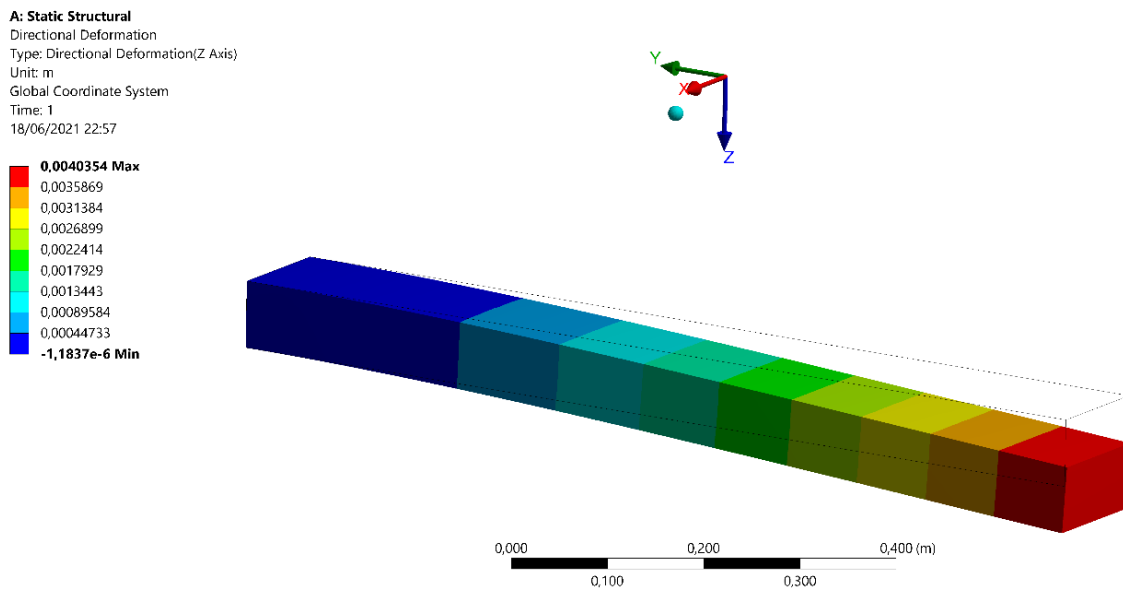


37 Captura de la condición de fuerza en superficie en ANSYS

Junto con la restricción de una cara lateral fija que hace la función de empotramiento, se obtienen los desplazamientos en toda la viga:



38 Resultados de la deformación total



39 Resultados de la deformación en el eje Z

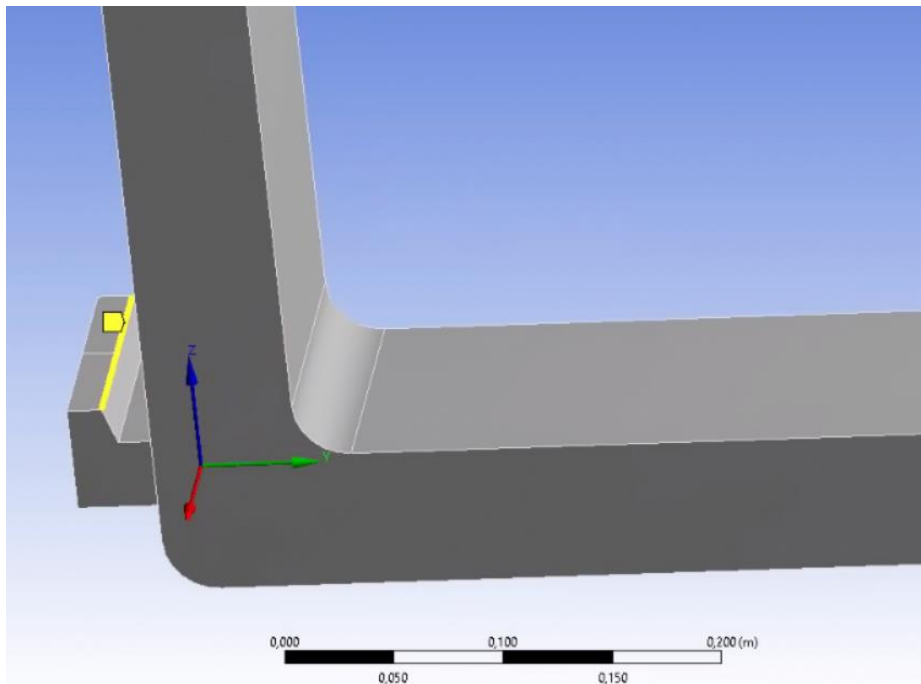
La deformación total y z corroboran dos aspectos, primero que el desplazamiento se focaliza en el eje vertical Z algo entendible ya que no hay esfuerzos significativos en los demás ejes Z e Y. Último aspecto y no menos importante, los valores obtenidos por ANSYS se aproximan a los valores teóricos:

Desplazamiento por simulación: 4,03mm

Desplazamiento teórico (Teoremas de Mohr): 5mm

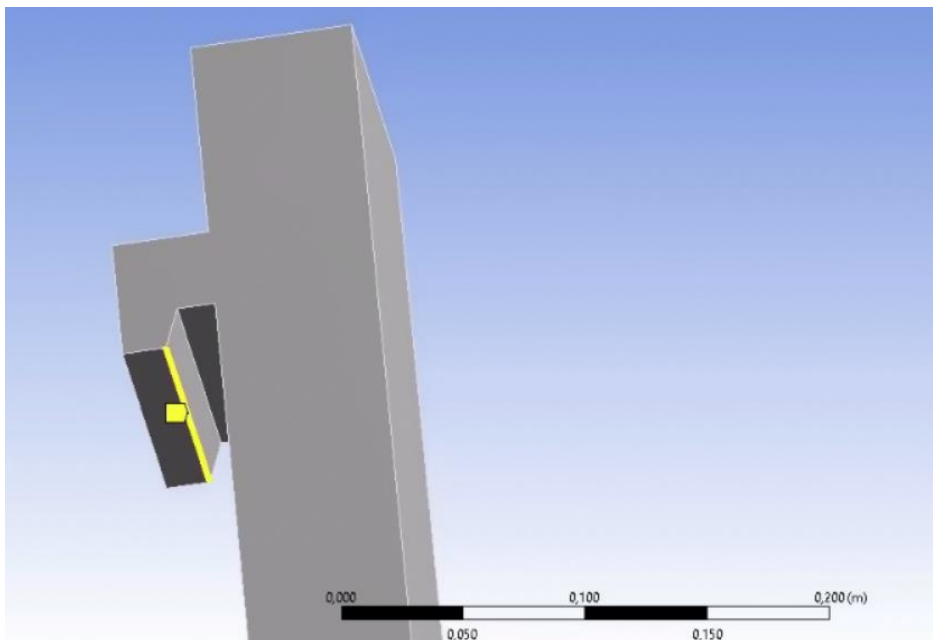
Valores en el mismo orden de magnitud que se dan por válidos.

Finalmente se procede a simular la horquilla al completo con la misma sección y carga externa. Cabe mencionar que al ser un anclaje FEM se ha decidido restringir los movimientos de la siguiente manera:



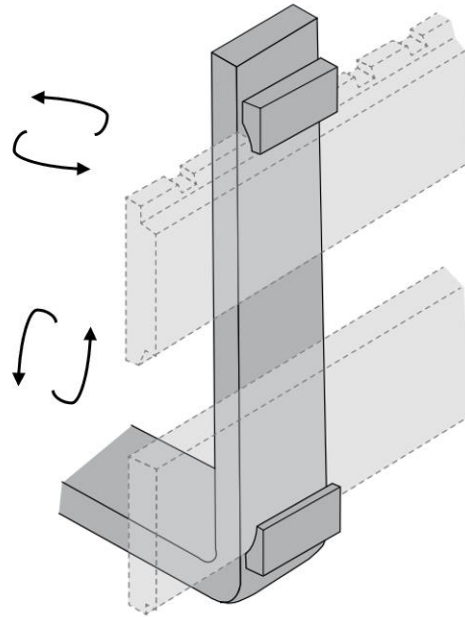
40 Captura de la restricción en el gancho inferior

Restricción en el gancho inferior, esquina marcada: solo se permite el movimiento en el eje Z.



41 Captura de la restricción en el gancho superior

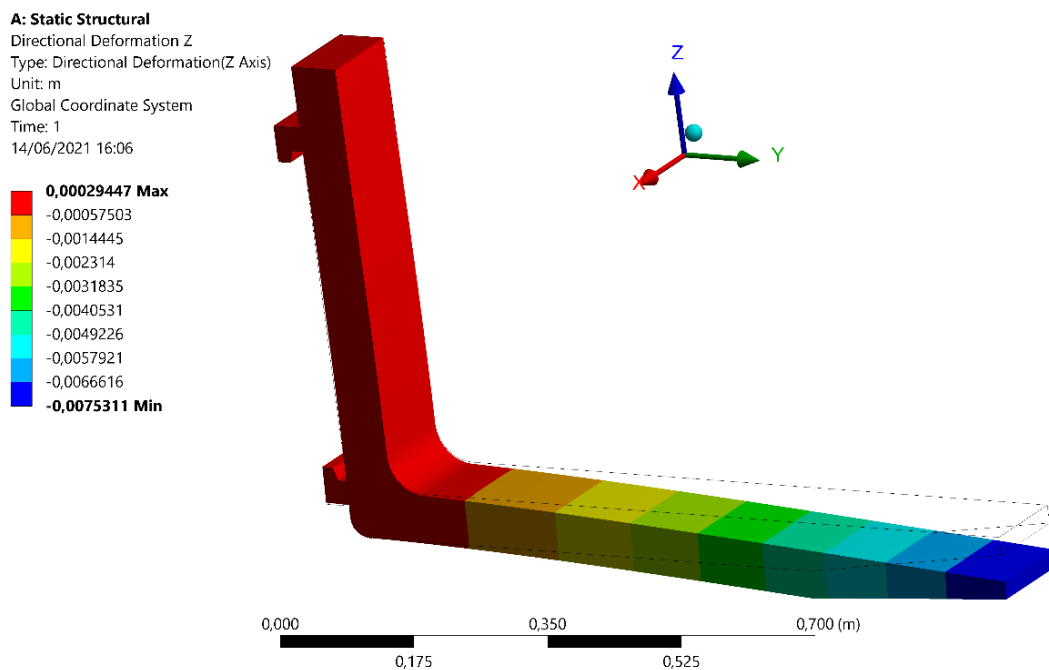
Restricción en el gancho superior: sin movimientos en x y z pero se permite el giro en torno al eje marcado.



42 Ilustración del movimiento que tendería la horquilla debido a la carga

Se consideran así las más adecuadas al caso de los enganches. Estas restricciones se podrían considerar de otra manera ya que puede afectar a los resultados de la simulación cercana a los ganchos.

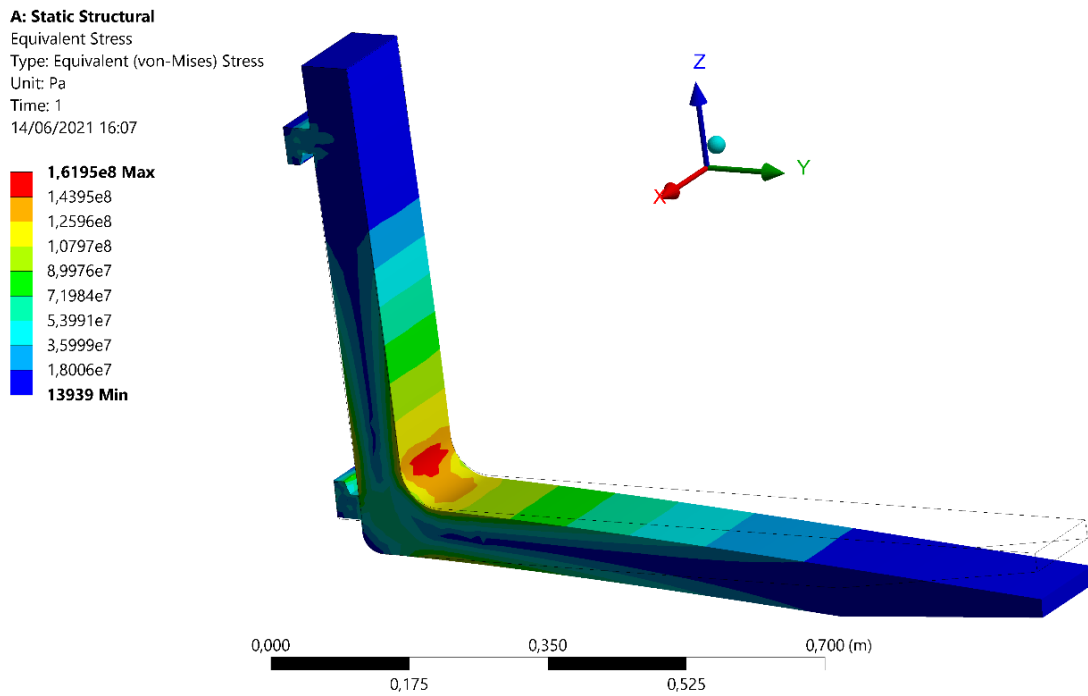
Seguidamente tras definir todas las condiciones externas, se obtienen los siguientes resultados de la simulación:



43 Resultados de la deformación en Z de la horquilla final

El desplazamiento máximo en la punta horizontal es de 7,5 mm valor que cumple los requerimientos para el estudio (<10mm).

Por otro lado, a diferencia de la viga hay que tener en cuenta las tensiones de Von Mises en toda la horquilla ya que esta magnitud nos dirá la tensión interna que sufre el material:

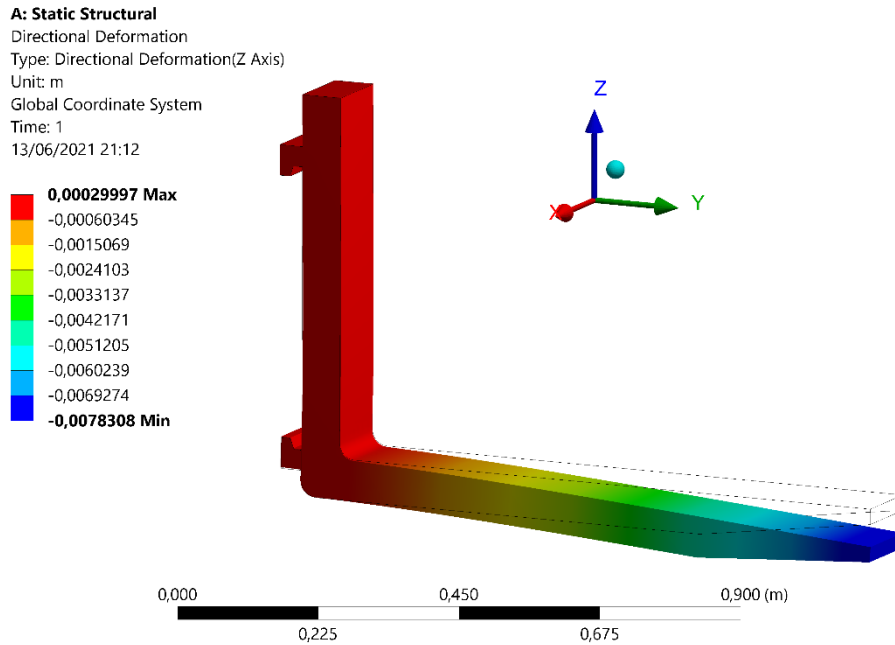


#### 44 Resultados de las tensiones de Von Mises de la horquilla final

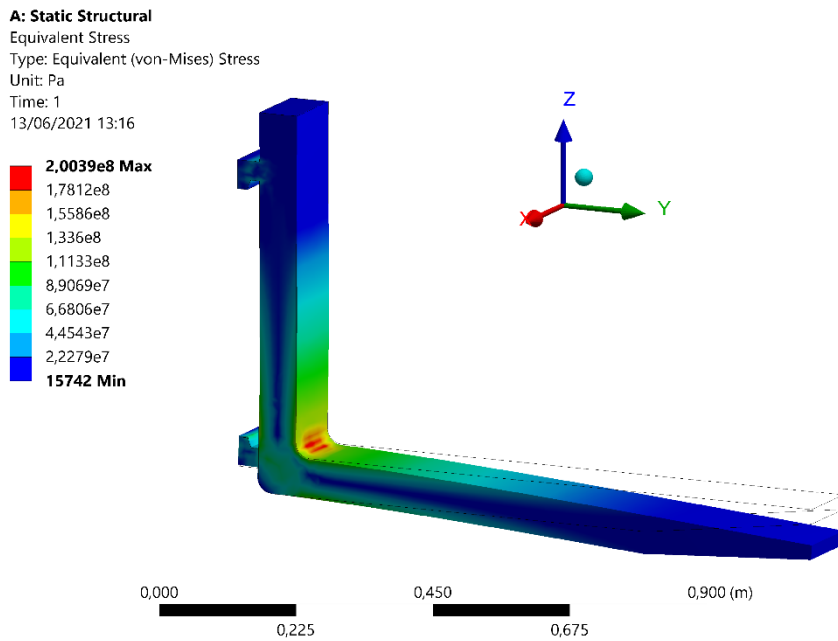
Se encuentra así las tensiones máximas localizadas en la parte curva:  $1,62 \times 10^8 = 162 \text{ MPa}$ . Echo que concuerda con el análisis de la viga porque la sección crítica quedaba próxima al empotramiento. El radio de curvatura también influye directamente con las tensiones de Von Mises generadas ya que a mayor complejidad geométrica mayor serán las tensiones internas.

Cabe mencionar que para llegar al valor del radio de esta curva se han hecho modificaciones hasta encontrar la definitiva de la imagen que cumple los requerimientos del estudio. A continuación, se exponen las simulaciones de horquillas descartadas que en los próximos apartados se dará el por qué.

- Horquilla con radio de curvatura menor:

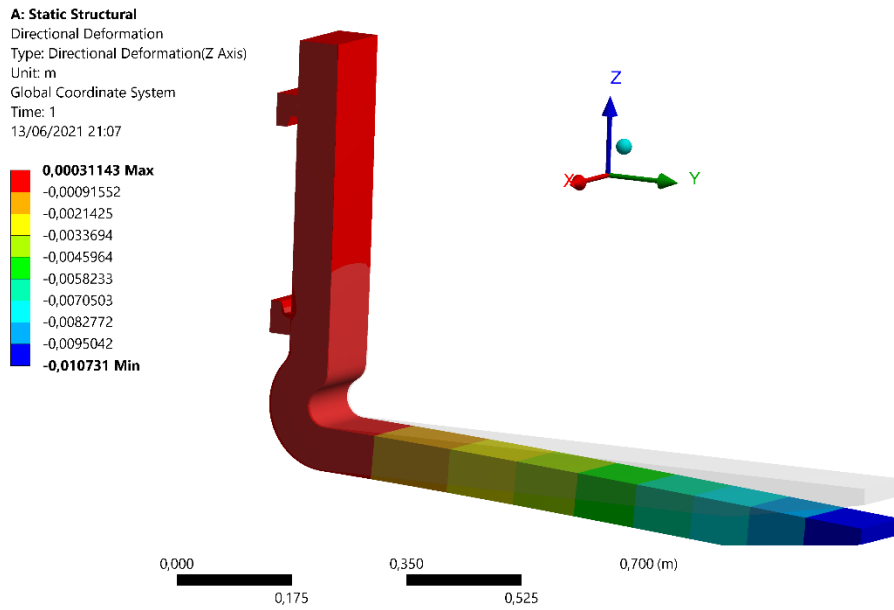


45 Deformación en Z de horquilla descartada 1

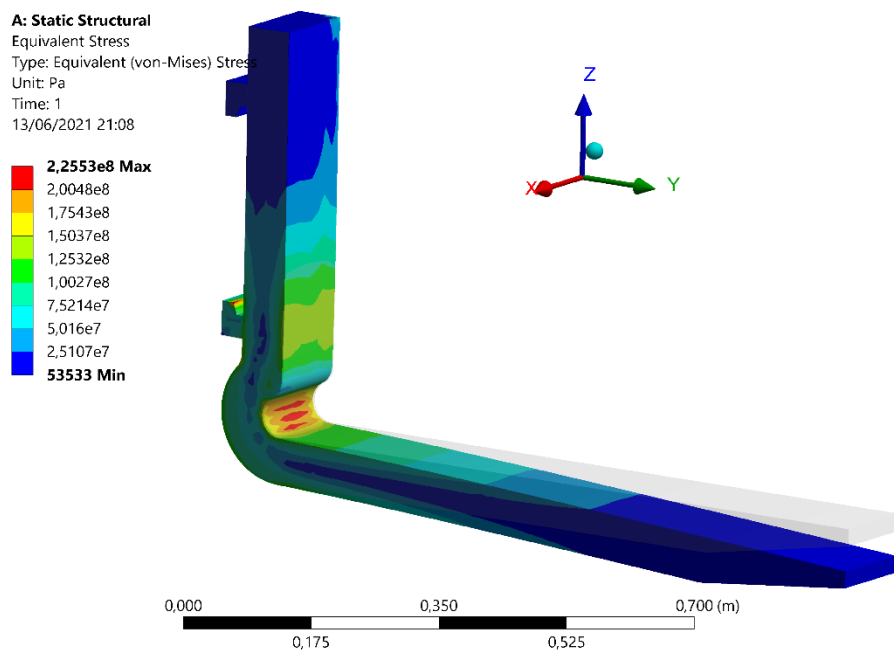


46 Tensiones de Von Mises de horquilla descartada 1

- Horquilla con talón ahuecado:



47 Deformación en Z de horquilla descartada 2



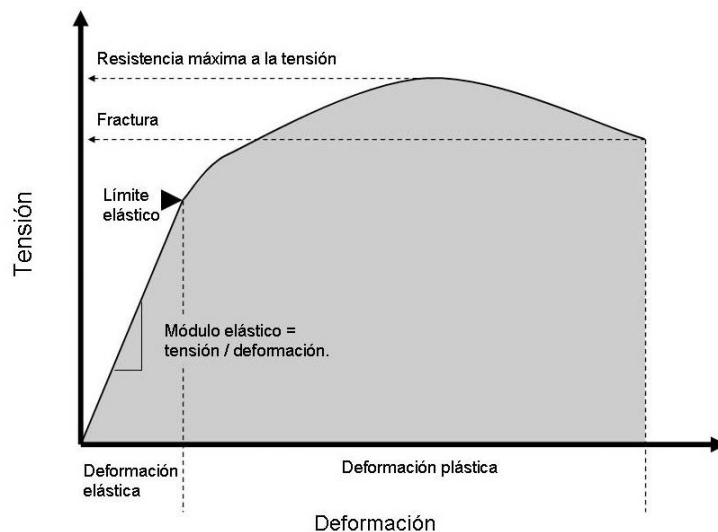
48 Tensiones de Von Mises de horquilla descartada 2

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADO

En el análisis de resultados se distinguen dos partes, por un lado, la afectación en las deformaciones y por otro las tensiones internas que sufre la pieza. De las deformaciones antes mostradas confirman que la deformación máxima satisface el requisito de que la horquilla en su máxima carga no puede desplazarse un 1% de su longitud vertical, los valores simulados indican que se desplazaría 7mm en el eje vertical, menos del 1% de la longitud de la horquilla de 1000mm.

Con el valor máximo de tensión de Von Mises hallado 162 MPa, se debe encontrar un material que soporte esta tensión en régimen elástico, donde no hay deformaciones permanentes y a su vez cumpla el coeficiente de seguridad impuesto en el proyecto 1,5. Coeficiente de seguridad decidido porque en vigas empotradas normalmente se trabaja entre 1,5 y 3, para horquillas en cambio no se ha podido obtener datos concretos.

$$162\text{MPa} \leq \frac{\text{Límite Elástico}}{\text{Coeficiente de seguridad} = 1,5} \rightarrow \text{Límite Elástico} \geq 243 \text{ MPa}$$



49 Gráfico tensión-deformación propio de un metal dúctil

El cumplir el coeficiente de seguridad implica que la carga necesaria para provocar una deformación permanente debe ser 1,5 veces mayor que la carga nominal que se ha impuesto en el estudio.

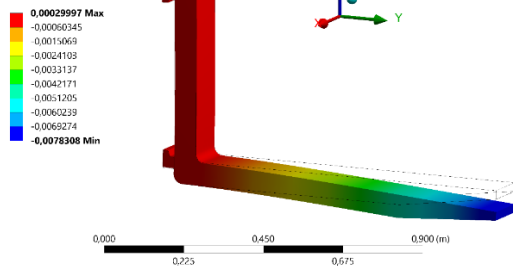
Por lo tanto, el acero que se escogerá deberá tener un límite elástico mayor que 243 MPa, valor que, si el material supera trabajaría en régimen plástico, echo que invalida las normas regulatorias de la horquilla donde se especifica que no puede haber deformaciones plásticas. El material estando en régimen plástico, tras aplicar la carga el material quedaría deformado permanentemente.

Por último, se van a presentar las evidencias de por qué otros diseños realizados en el estudio fueron descartados.

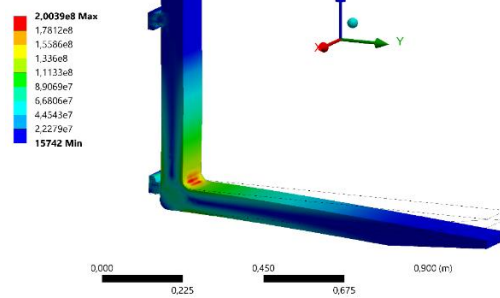
- Horquilla con radio de curvatura menor:



A: Static Structural  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(Z Axis)  
 Unit: m  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 13/06/2021 21:12



A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1  
 13/06/2021 13:16

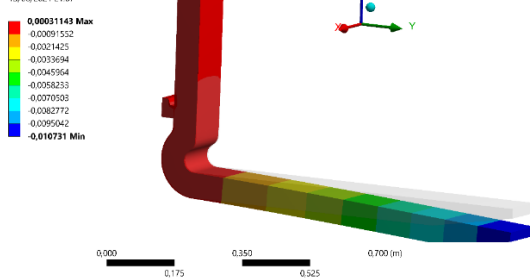


A pesar de que en el aspecto de deformaciones esta horquilla podría ser válida, las tensiones internas máximas, concretamente en la curvatura son más elevadas 200MPa comparado con la horquilla final 162MPa. Este incremento junto con el cumplimiento del coeficiente de seguridad haría requerir un material con un mayor límite elástico.

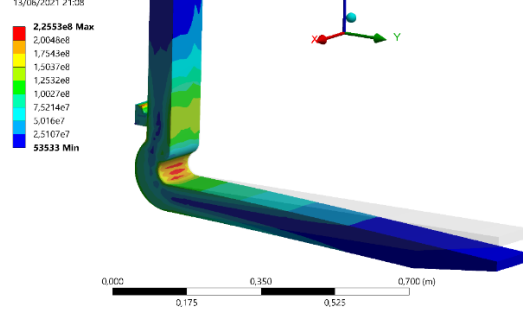
Al descartar este diseño se esta optimizando la pieza para que el material escogido tenga un menor límite elástico y así poder abaratar costes.

- Horquilla con talón ahuecado:

A: Static Structural  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(Z Axis)  
 Unit: m  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 13/06/2021 21:07



A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1  
 13/06/2021 21:08

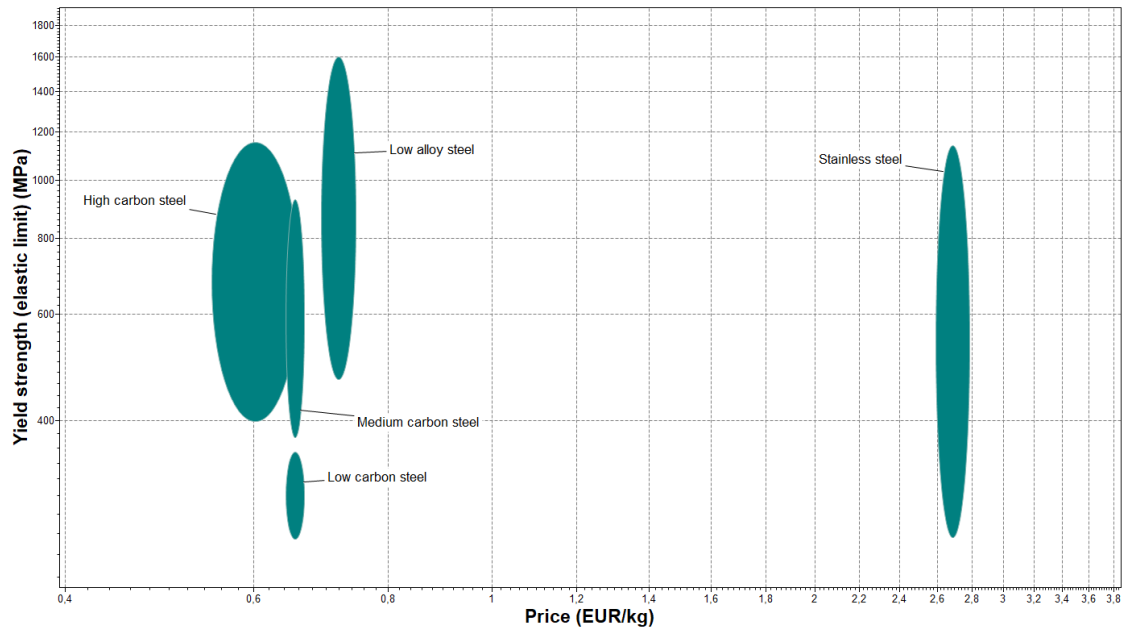


Este modelo ya de entrada no cumple el primer requerimiento del proyecto porque no está normalizado en lo que se refiere al montaje con el portahorquillas, la curvatura del talón hace desplazar el enganche superior. En lo que se refiere a los resultados de la simulación, el desplazamiento es mayor 10,7mm, además las tensiones internas son aún más elevadas que el anterior ejemplo, 225MPa. En definitiva, no sería óptimo ya que requeriría un acero con mayor límite elástico, sino también implica mayor complejidad en la fabricación por las curvaturas.

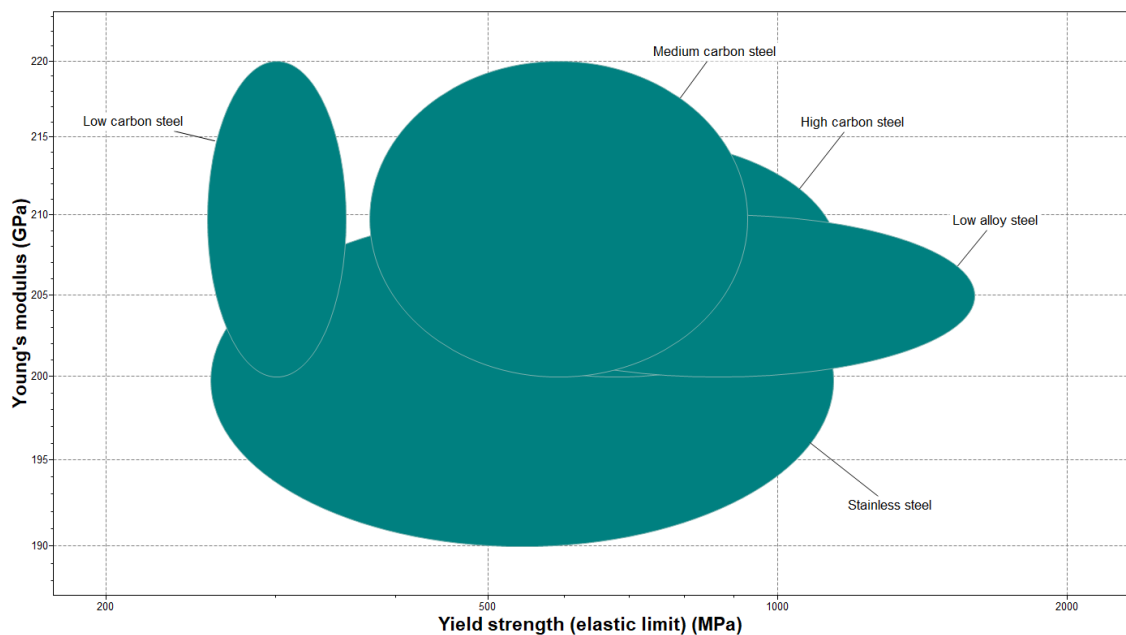
#### 4.4 SOFTWARE EDUPACK Y MATERIALES ADECUADOS

Para la elección del material más adecuado al estudio se empleará el software llamado Edupack, un programa que contiene una base de datos extensa de todo tipo de materiales. Mediante diferentes filtros se puede restringir el listado de materiales a un número limitado adecuados al caso.

Tras la concreción de estos filtros, acotando de límite elástico mayor que 243 MPa, módulo de Young alrededor de 200 000 MPa, valor utilizado en los cálculos teóricos, se encuentran los siguientes materiales:



50 Gráfica resultante de límite elástico-precio en Edupack



51 Gráfica resultante módulo de Young-límite elástico en Edupack

- Acero al carbono de alta aleación
- Acero al carbono de media aleación
- Acero al carbono de baja aleación
- Acero de baja aleación
- Acero inoxidable

La gráfica relacionando el límite elástico y el coste genérico del material por kilo confirma lo que se ha encontrado en diferentes casas de fabricante, el acero al carbono es el material por excelencia en la fabricación de horquillas.

Por otro lado, para delimitar más la lista, se ha analizado en qué se diferencian mecánicamente los aceros al carbono (Universidad Nacional de La Plata) (Departament de Ciència i Enginyeria de Materials ESEIAAT) (Rodríguez, 2015).

- Aceros de bajo carbono: es un material muy dúctil y maleable ideal para perfiles estructurales como chapas de automóvil, planchas, varillas etc. Es la clase de acero al carbono con menos resistencia de las tres presentadas. Como se puede ver en el segundo gráfico de Edupack, los tres aceros al carbono tienen un módulo de Young parecido pero el de baja concentración *Low Carbon Steel* tiene menor límite elástico, parámetro junto con otros como la tensión de rotura *Tensile strenght* son menores al resto de aceros.



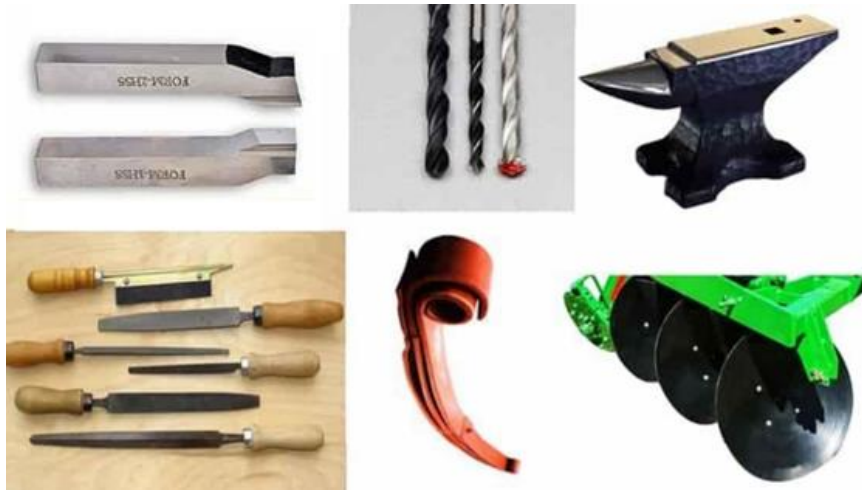
52 Piezas echas de acero de baja aleación en carbono

- Aceros de medio carbono: son más resistentes y duros que el acero de bajo carbono. Buena maquinabilidad, una propiedad que permite al material ser tratado con cierta facilidad en la fabricación de piezas tanto por cortes o deformaciones en forma por ejemplo en el forjado.



53 Piezas echas de acero de media aleación en carbono

- Aceros de alto carbono: es el acero al carbono con más resistencia y dureza por ello es utilizado para la fabricación de herramientas de corte, por ejemplo. La dureza de este material viene acompañada con una alta rigidez, en Edupack destacan sus valores de tensión de rotura similares al del límite elástico, evidenciando que una vez sobrepasando el régimen elástico de la pieza, la fractura de la pieza será inminente. También cabe destacar su baja soldabilidad por lo que no se suele soldar.



54 Piezas echas de acero de alta aleación en carbono

En definitiva, el material más adecuado para la fabricación de las horquillas es el acero al carbono de media aleación, no están rígido como la de alto carbono y más resistente que la de bajo, permitiendo así ser tratado para piezas de mediana o gran volumen como la del estudio.

Finalmente, sabiendo el tipo de acero para la pieza podemos encontrar aun más variedad de fabricantes en la web <http://www.matweb.com/>. Filtrando por aceros de carbono medio se encuentran aleaciones con características similares pero que influyen en el precio, este comentario se añadirá en el capítulo 7 de líneas futuras ya que posteriormente se podría contactar mediante esta web con los fabricantes que tengan estas aleaciones.

## CAPÍTULO 5. PRESUPUESTOS

El presupuesto final del estudio es sencillo, se diferencian dos partes claras: las horas dedicadas para llegar al diseño de la horquilla final y el precio medio por el cual se vende esta clase de horquillas.

Las horas dedicadas han sido cumplidas para las diferentes partes del proyecto tal y como se presentó en el *Project Charter*:

|  |   |
|--|---|
| 1. Estudio de diseño y optimización de una pieza mediante la modelización de su comportamiento estructural con un programa de elementos finitos. |   |
| 1.1. Historia y definición de las carretillas elevadoras   |   |
| 1.1.1. Definición  |   |
| A  | Búsqueda en profundidad del uso y ámbito de las carretillas                     |
| B  | Determinar partes principales y sus funciones                                   |
| 1.1.2. Historia y antecedentes   |   |
| C  | Identificación de primeros inventos predecesores                                |
| D  | Correspondencia entre la historia de las carretillas con la necesidad histórica |
| 1.1.3. Fabricantes y regulación actual de las carretillas  |   |
| E  | Analizar el mercado actual, así como las empresas líderes                       |
| F  | Investigar las normas regulatorias vigentes                                     |
| 1.1.4. Sujeto de análisis: horquillas  |   |
| G  | Búsqueda de tipos de horquillas, usos y homologaciones                          |
| H  | Métodos de fabricación y fabricantes  |
| I  | Elección de tipo de horquillas a modelizar                                      |
| 1.2. Diseño  |   |
| J  | Prediseño de horquilla mediante CATIA.  |
| K  | Función y aplicación de hipótesis escogidas                                     |
| 1.3. Cálculos y simulaciones   |   |
| 1.3.1. Software de modelización ANSYS  |   |
| L  | Modelizar la pieza en el programa y simular su comportamiento mecánico          |
| M  | Recogida y análisis de datos  |
| 1.3.2. Programa de base de datos de materiales EDUPACK   |   |
| N  | Búsqueda de materiales a partir de los datos obtenidos previamente              |
| 1.4. Presupuestos  |   |
| 1.5. Memoria   |   |
| O  | Conclusiones del estudio y líneas futuras de trabajo                            |
| P  | Acabar de documentar la memoria, índices, pulir detalles, ...                   |

El total de horas suma 312h, a 20€. El coste del estudio ingenieril básico es de: 6240€.

Por otro lado, el precio de horquillas tipo FEM clase 3A gira alrededor de 300€ por cada una. Por lo tanto, se invertirían 600€.

Presupuesto final:

$$6240 + 600 = 6840\text{€}$$

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La especialización del estudio en el uso de la horquilla ha permitido acotar el trabajo y centrarse en un tipo de pieza adaptándolo al caso, de lo contrario hubiera comportado más tiempo ya que la cantidad de usos tipos de horquillas y carretillas es muy extensa.

La primera decisión de centrarse en las horquillas tipo FEM fue dada por su reconocido uso extendido y por un mayor estudio regulado. No obstante, se podría haber escogido otro tipo de horquilla, pero no hay demasiada información al respecto, concretamente dimensional que era de lo que más se precisaba. Paralelamente para las FEM se llegó a pedir más datos a fabricantes vía mail sin éxito ya que por ejemplo en la mayoría de catálogos, la curvatura donde se acumula más tensiones no venía detallada el radio o diámetro.

Gracias a este desconocimiento inicial de la curvatura permitió dar juego al diseño y llegar a la conclusión que la variación de esta afecta considerablemente a la tensión máxima interna de la pieza, al contrario que la deformación que casi no varió tras modificar el radio.

Por otro lado, los cálculos teóricos iniciales tratando la horquilla como una viga en voladizo empotrada fueron suficientes para llegar a una deformación aceptable final. En esta parte del trabajo se notó la falta de conocimientos técnicos de resistencia de materiales. La hipótesis de la viga y su posterior constatación indican que el análisis estructural de toda la horquilla tal vez no es necesaria ya que los resultados comparativamente son del mismo orden de magnitud, ahorrando así la complejidad del problema que supondría analizar toda la horquilla. El tiempo empleado que hubiera comportado ese análisis podría haber faltado para las variaciones del diseño que se tuvieron que realizar y simular.

Para acabar, gracias al estudio y conocimientos adquiridos durante, se ha visto que los aceros que cumplían los filtros en Edupack, tras los valores teóricos calculados eran insuficientes para la determinación del material en particular. Hacía falta conocimientos básicos de tecnología de materiales, del cual se ha consultado con el departamento correspondiente de la universidad. Comparando el listado de materiales y corroborando información/apuntes se ha encontrado que, aunque hay parámetros que no difieren mucho entre tipos de acero, como el módulo de Young  $E$  o el coeficiente de Poisson, hay que tener en cuenta otros como la tensión máxima de rotura, cuyo valor si es cercano al límite significa que es demasiado rígido para el caso de este estudio.

Durante la realización del trabajo se han encontrado varios puntos más que interesantes para trabajar en ellos.

- El método de conformado ideal para la pieza se ha comentado que es el forjado, concretamente el forjado en frío o tibio, no obstante, es más que probable que a posteriori se implementen tratamientos térmicos superficiales para corregir posibles efectos no deseados tras la forja. Es por ello que haría falta un estudio adicional para examinar estos tratamientos superficiales.
- Dado los conocimientos limitados con respecto al campo de la resistencia de materiales, sería conveniente analizar toda la horquilla como elemento sólido equilibrado en vez de solo como una viga en voladizo. Este añadido podría verificar si realmente vale la pena realizar los cálculos de ese nuevo estudio conjunto.
- Otras variables posibles las encontramos en la malla utilizada en la simulación de ANSYS. Como se ha comentado, los diferentes parámetros que se pueden modificar en la malla pueden afectar en la calidad del resultado. Es por eso que otra línea futura sería realizar variaciones en estos.
- Por último, tras la delimitación del material principal acero de bajo carbono, adicionalmente se podría buscar en la web <http://www.matweb.com/> las múltiples aleaciones de acero de esta clase y verificar cual sería el más óptimo sobre todo en cuestión de precio. Esta parte no se ha podido realizar ya que es necesario ser usuario de pago en la web para comparar características y muchos materiales no tenían el listado de proveedores actualizados.



## CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

- CertifyME. (15 de Noviembre de 2020). *How a Forklift Hydraulic System Works*. Obtenido de CertifyME: <https://www.certifyme.net/osha-blog/forklift-hydraulic-system-works/>
- Cranes and Machinery. (s.f.). *Carretilla Elevadora*. Obtenido de Cranes and Machinery: <https://www.gruasyaparejos.com/montacargas/carretilla-elevadora/>
- Departament de Ciència i Enginyeria de Materials ESEIAAT. (s.f.). *Tema 4 Conformat de Metalls. Deformació plàstica*.
- Didascalía Educational Group. (s.f.). *Tipos de carretilla requisitos y duracion minima de la formacion segun norma UNE 58451*. Obtenido de Didascalía Educational Group: <https://didascalía.es/tipos-de-carretilla-requisitos-y-duracion-minima-de-la-formacion-segun-norma-une-58451/>
- Duatis, D. (2013). *Estudio del comportamiento de forjados mixtos con chapa colaborante de acero inoxidable ferrítico*. Escola de Camins. UPC BARCELONATECH.
- Escrapalia. (8 de Octubre de 2018). *Consejos para comprar una carretilla elevadora de segunda mano*. Obtenido de Escrapalia blog: <https://blog.escrapalia.com/consejos-para-comprar-una-carretilla-elevadora-de-segunda-mano/>
- ETMA Metal Parts. (29 de Octubre de 2018). *Proceso productivo destacado: Forja en frío*. Obtenido de ETMA Metal Parts: <https://etmametalparts.com/es/proceso-productivo-destacado-forja-en-frio/>
- European Material Handling Federation. (s.f.). *Materials handling, lifting and storage equipment*. Obtenido de European Material Handling Federation: <https://www.fem-eur.com/>
- Gonzalez, T. (27 de Julio de 2017). *Forklift Parts. Glossary and Buyers Guide*. Obtenido de Toyota Material Handling: <https://www.tmhnc.com/blog/toyota-forklift-parts-and-repair-bay-area-salinas-fresno-sacramento>
- Intella Parts Company. (s.f.). *Frequently asked questions*. Obtenido de Intella Parts Company: <https://store.intellaliftparts.com/FAQS.html>
- Llorsa carretillas. (s.f.). *Horquillas para carretillas elevadoras*. Obtenido de Llorsa carretillas: <https://www.llorsa.com/horquillas-carretillas-elevadoras/>
- Lucendo, J. (2020). *Centuries of Inventions: Encyclopedia and History of Inventions*.
- Maquinza. (11 de Diciembre de 2019). *¿Qué es una carretilla elevadora?* Obtenido de Maquinza: <https://maquinza.com/carretilla-elevadora-que-es/>
- North Fork Ltd. (s.f.). *Standard Forks*. Obtenido de North Fork Ltd : <https://www.north-fork.co.uk/standard-forks/>
- Nozal, A. (8 de Enero de 2018). *Medidas de palets: ¿cuáles son los estándares más extendidos?* Obtenido de MECALUX logismarket: <https://blog.logismarket.es/medidas-palets-estandares-extendidos/>

- Rodriguez, D. (2015). *Optimización de proceso en la producción de piezas mediante forja de precisión*. Barcelona: UB/UPC.
- Sanchez, O. (28 de Julio de 2013). *Tecnología del transporte: el penúltimo eslabón en la cadena de transporte, el "toro"*. Obtenido de Motorpasión: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/tecnologia-del-transporte-el-penultimo-eslabon-en-la-cadena-de-transporte-el-toro>
- Soluciones Globales y Gestión de Compras S.L. (s.f.). *Diseño, desarrollo y fabricación de piezas y partes mediante forja en frío*. Obtenido de Soluciones Globales y Gestión de Compras S.L.: <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/forja/forja-en-frio>
- The Lilly Company. (s.f.). *The history of the forklift*. Obtenido de The Lilly Company: <https://blog.lillyforklifts.com/the-history-of-the-forklift>
- Toyota. (s.f.). *Automatic Guided Vehicles (AGVs)*. Obtenido de Toyota Material Handling: <https://www.toyotamaterialhandling.com.au/products/automatic-guided-vehicles-agvs/>
- Trullàs, J. (2 de Septiembre de 2012). *Instrucciones para el manejo de carretillas elevadoras*. Obtenido de SlidesShare: <https://es.slideshare.net/javiertrullas/instrucciones-para-el-manejo-de-carretillas-elevadoras>
- TVH Parts Holding. (s.f.). *5 Puntos a tener en cuenta al escoger las horquillas para carretilla elevadora*. Obtenido de TVH Parts Holding: <https://www.tvh.com/es-es/blog/5-puntos-a-tener-en-cuenta-al-escoger-las-horquillas-para-la-carretilla-elevadora>
- Tymbia. (s.f.). *Horquillas con talón ahuecado que no daña mercancía*. Obtenido de Tymbia: <https://www.tymbia.com/es/producto/2238-horquillas-con-talon-ahuecado-que-no-dana-mercancia-horquillas-y-sus-accesorios-m103110018>
- ULMA Advanced Forged Solutions. (23 de enero de 2020). *Qué es el acero forjado y cuáles son sus principales características*. Obtenido de ULMA Advanced Forged Solutions: <https://www.ulmaforge.com/noticia/que-es-el-acero-forjado-y-cuales-son-sus-principales-caracteristicas/>
- Universidad Nacional de La Plata. (s.f.). *Tipos de acero según su composición de carbono*. La Plata.
- Zhang, E., Jhuo, J., Liu, J., & Guo, T. (2020). *Structural optimization of forklift fork based on numerical simulation and mathematical modeling of stress and fatigue*.

## ANEXOS

Los anexos están adjuntos a parte ya que son documentos independientes:

- Plano no normalizado de la horquilla definitiva.
- Norma UNE-ISO 2328: Carretillas de manutención. Brazos de horquilla con gancho y tableros porta-horquillas. Dimensiones de montaje.
- Norma UNE-EN 13698-1:2003 Especificación para la producción de paletas
- Norma UNE 58421/ISO 2330: Carretillas de manutención. Carretillas elevadoras de horquilla. Brazo de horquilla. Características técnicas y ensayos.