

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

***ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL
CUADRO DE UNA BICICLETA***

Alumno/Alumna: Borda, Zabala, Ana

Director/ Directora: Vallejo, Matilla, Javier

Curso: 2017/2018

DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

- *Alumno/Alumna:* Ana Borda Zabala
- *Director/Directora:* Javier Vallejo Matilla
- *Departamento:* Ingeniería Mecánica
- *Título:* Análisis por Elementos Finitos del cuadro de una bicicleta
- *Resumen:* El principal objetivo de este proyecto es la simulación del ensayo de un cuadro de bicicleta, concretamente del **Ensayo de choque (caída de una masa)** definida en la norma española **UNE-EN ISO 4210-6** que se describirá más adelante. Para ello será necesario crear el modelo del cuadro junto con la horquilla y la masa con la que se efectuará el choque. La simulación y el análisis se llevarán a cabo mediante un software de Elementos Finitos.
- *Palabras clave:* cuadro de bicicleta, ANSYS, Solidedge
- *Izenburua:* Bizikleta baten koadroaren analisisa Elementu Finituen bidez
- *Laburpena:* Proiektu honen helburu nagusia bizikleta baten koadroaren entsegu baten simulazioa da, hain zuzen ere, **UNE-EN ISO 4210-6** arau espainarrean definitutako **Talka entsegua (masa baten erorketa)**, aurrerago azladuko dena. Honetarako, beharrezkoa izango da koadroaren modelo eraikitzea urkila eta talka sortuko duen masarekin batera. Entseguren simulazioa eta analisisa Elementu Finituen software baten bitartez lortuko dira.
- *Hitz gakoak:* bizikleta koadroa, ANSYS, Solidedge
- *Title:* Analysis by Finite Element of a bicycle frame
- *Abstract:* The main objective of this project is the simulation of a bicycle frame test, precisely the **Crash test (fall of a mass)** described in the Spanish standard **UNE-EN ISO 4210-6**. To do so, the creation of the frame will be needed, along with the fork and the mass, which would carry out the crash. The simulation and the analysis will be developed by a Finite Element software.
- *Keywords:* Bicycle frame, ANSYS, Solidedge

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	6
2 CONTEXTO.....	7
3 OBJETIVOS Y ALCANCE	9
4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO.....	11
4.1 BENEFICIOS TÉCNICOS.....	11
4.2 BENEFICIOS ECONÓMICOS	11
4.3 BENEFICIOS PRÁCTICOS.....	12
5 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	13
6 METODOLOGÍA.....	16
6.1 INTRODUCCIÓN	16
6.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO A REALIZAR	16
6.3 PRESTACIONES Y HERRAMIENTAS.....	19
6.3.1 SOLID EDGE.....	19
6.3.2 ANSYS.....	21
6.4 ELECCIÓN DEL MATERIAL DEL CUADRO	28
6.4.1 MATERIALES DE LOS CUADROS EN LA ACTUALIDAD.....	28
6.4.2 ELECCIÓN DEL MATERIAL.....	29
6.5 DISEÑO DEL CONJUNTO.....	30
6.5.1 EL CUADRO.....	31
6.5.2 LA HORQUILLA CON EL RODILLO	36
6.5.3 EL PERCUTOR.....	38
6.5.4 CONJUNTO	39
6.6 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL ENSAYO.....	41
6.7 INTERPRETACIÓN DEL RESULTADO.....	50
7 DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA GANTT.....	54
8 PRESUPUESTO	57
9 CONCLUSIONES	59
10 BIBLIOGRAFÍA.....	61
11 ANEXOS	61

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución de la bicicleta	7
Ilustración 2. Elementos con mala y buena relación de aspecto respectivamente	13
Ilustración 3. Fuerza actuante en la horquilla.....	15
Ilustración 4. Esquema del montaje	18
Ilustración 5. Operaciones con modelos de sólidos.....	20
Ilustración 6. Operaciones con modelos se superficie	21
Ilustración 7. Error geométrico	23
Ilustración 8. Error de discretización	23
Ilustración 9. Ejemplo de discretización de un sistema continuo.....	24
Ilustración 10. Selección del tipo de análisis	25
Ilustración 11. Opciones de geometría.....	26
Ilustración 12. Propiedades de los elementos del conjunto	26
Ilustración 13. Opciones del mallado	27
Ilustración 14. Enumeración de los elementos	31
Ilustración 15. Geometría básica del cuadro de una bicicleta	31
Ilustración 16. Boceto del cuadro	32
Ilustración 17. Ejemplo de definición del tubo del sillín	33
Ilustración 18. Planos para los bocetos de las vainas	34
Ilustración 19. Boceto de vaina inferior.....	34
Ilustración 20. Boceto de vaina superior.....	34
Ilustración 21. Vainas superior e inferior con el comando “superficie por barrido”	34
Ilustración 22. Definición del enganche y unión con las vainas.....	35
Ilustración 23. Cuadro de bicicleta final	35
Ilustración 24. Tubo de horquilla	36
Ilustración 25. Superficie abierta de sección cuadrada	36
Ilustración 26. Boceto de la trayectoria.....	37
Ilustración 27. Sección cuadrada de la pata.....	37
Ilustración 28. Boceto para el rodillo.....	38
Ilustración 29. Diseño final de la horquilla.....	38
Ilustración 30. Percutor	39
Ilustración 31. Vista de planta del conjunto.....	39
Ilustración 32. Vista de alzado del conjunto	40
Ilustración 33. Simetría del conjunto	41

Ilustración 34. Tubo B, tubo A y superficie del tubo B delimitada por la línea de intersección	42
Ilustración 35. Superficie del tubo B eliminada	43
Ilustración 36. Diferencia de malla con superficie eliminada y no eliminada	43
Ilustración 37. Boceto definido en el percutor	44
Ilustración 38. Proyección del boceto y división de superficie	44
Ilustración 39. Contacto en un nodo.....	45
Ilustración 40. Contacto en una cara	45
Ilustración 41. Malla de mala calidad.....	47
Ilustración 42. Movimiento relativo entre horquilla y tubo de dirección	48
Ilustración 43. Conexión de malla de la horquilla y cuadro.....	49
Ilustración 44. Deformación total.....	51
Ilustración 45. Deformación permanente de la horquilla.....	51
Ilustración 46. Tensiones equivalentes de Von-Mises	52
Ilustración 47. Velocidad del percutor	53
Ilustración 48. Componentes de una bicicleta	62
Ilustración 49. Ejemplo de montaje del ensayo.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Alturas de caída del percutor.....	17
Tabla 2. Valoración del acero y el aluminio.....	30
Tabla 3. Propiedades del acero 4130	30
Tabla 4. Longitudes y ángulos según la talla del cuadro	32
Tabla 5. Horas internas.....	57
Tabla 6. Amortizaciones.....	57
Tabla 7. Presupuesto detallado.....	58

1 INTRODUCCIÓN

En este punto se introducirán los apartados que forman parte de este proyecto.

Lo primero será poner el proyecto en contexto para aclarar al lector cuál será el ámbito en el que se va a desarrollar el proyecto. Se plasmarán también los diferentes objetivos que se quieren cumplir mediante este trabajo, así como su alcance.

Para la justificación del proyecto también será necesario plasmar los beneficios que pueda aportar éste, clasificándolos en tres tipos de beneficios. En cuanto a la ejecución del proyecto, se comenzará por hacer un análisis de alternativas mediante diferentes criterios, justificando la elección final.

En el apartado de metodología se explicará todo el desarrollo del proyecto. Se analizarán las herramientas que han sido necesarias para el desarrollo, señalando también las prestaciones de éstas y la manera en que se ha trabajado en este caso. Este apartado se dará por terminado con la interpretación de los resultados obtenidos.

Por otro lado, también se mostrará la planificación que se ha seguido para la realización del trabajo, dividiendo el trabajo entero en varias tareas e hitos a completar con las duraciones de éstos, completándolo con un diagrama de Gantt.

Se ha calculado también el presupuesto detallado que consta principalmente de las horas internas empleadas por el ingeniero responsable del proyecto y las herramientas y licencias usadas, que se clasificarán como amortizaciones.

Finalmente, se redactarán las conclusiones generales sacadas del desarrollo de todo el proyecto y se facilitarán las direcciones URL de las que se ha sacado la información para completarlo. En el anexo se adjuntarán algunas imágenes aclaratorias e información que puede resultar de interés sobre el tema a tratar y que no se han mencionado en el cuerpo central del trabajo.

2 CONTEXTO

La bicicleta es un vehículo de transporte mundialmente conocido y uno de los más empleados ya sea como vehículo de transporte o de ocio. Aunque no se sabe a ciencia cierta quién fue su creador, la invención se le atribuye al inventor alemán Karl Drais. Esta primera bicicleta conocida como Draisiana y creada alrededor de 1817, constaba únicamente de dos ruedas de madera unidas mediante una estructura también de madera y un manillar. Para la propulsión era necesario empujarse con ambos pies alternativamente, no tenía frenos ni cadena de transmisión, pero sí que tenía sillín y manillar. Desde esta primera aparición, la bicicleta ha evolucionado a lo largo de más de un siglo hasta llegar a lo que hoy en día conocemos como bicicleta. A pesar de que la geometría y el mecanismo sean prácticamente estables, se siguen optimizando los diseños de éstas buscando siempre una relación óptima entre el peso, vida útil y el coste.

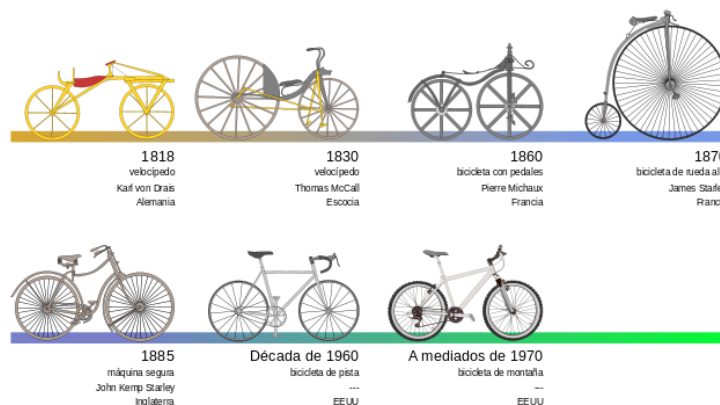


Ilustración 1. Evolución de la bicicleta

En este proyecto se tratará de hacer el diseño mecánico del cuadro de una bicicleta. Con diseño mecánico se entiende la verificación de un diseño por prueba y error aplicando a éste los estados de carga reales en los que va a trabajar y analizando su comportamiento. Para completar dicho análisis hay varios métodos, que son:

- Método tradicional: Se basa en las teorías clásicas como la Teoría de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Teoría de Vibraciones, etc. Parten de múltiples simplificaciones y se materializan en fórmulas, tablas y gráficos simples. Dado a su escasa exactitud en los cálculos, no es un método muy empleado hoy en día.

- Método numérico: Es un método implementado en un ordenador. Es capaz de desarrollar los análisis que el método tradicional no consigue, ya que no siempre se cumplen las hipótesis simplificadoras que se consideran. En lo que se refiere al análisis mecánico el método más conocido es el de Elementos Finitos (MEF).
- Método experimental: Se trata de ensayar un prototipo bajo las condiciones reales y ver su respuesta ante éste. Es un método que ofrece gran exactitud, pero supone un coste muy alto.

No puede definirse uno de los tres métodos como el mejor, ya que dependerá de cual ofrece más eficiencia en cada caso. Hoy en día el más usado es el de Elementos Finitos, ya que permite simular y analizar una pieza con mayor versatilidad y menor coste que los ensayos experimentales. Aun así, no siempre será posible reemplazar el ensayo experimental por el numérico. El Método de Elementos Finitos como concepto existe desde el siglo XIX, ya que se basa en el cálculo de celosías de la época, pero no fue hasta 1950 que se expandió su uso con la evolución de los ordenadores aprovechando así su capacidad de cálculo para realizar análisis complejos. Hoy en día los softwares de Elementos Finitos permiten hacer múltiples análisis como estático estructural, dinámico, térmico... de piezas complicadas, ofreciendo una mayor optimización de los diseños.

Este trabajo se desarrollará en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, concretamente en el departamento de Ingeniería Mecánica. Se dispondrá de un ordenador con los programas y licencias necesarias tanto para el diseño como para el análisis del cuadro de bicicleta.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar la respuesta de un cuadro de bicicleta ante un estado de carga concreto. Sin embargo, no nos podemos olvidar de otros objetivos que se irán cumpliendo a lo largo del proyecto como pueden ser:

- Diseño del cuadro de la bicicleta
- Profundización en el manejo de programas de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales
- Preparación del modelo en un software de Elementos Finitos para llevar a cabo la simulación
- Aplicación práctica de la teoría estudiada sobre el Método de Elementos Finitos ampliando así el conocimiento sobre este método, así como su aplicabilidad
- Interpretación de los resultados

Otro objetivo será terminar el proyecto en el plazo establecido de 8 meses. El proyecto se terminará con la entrega de la redacción completa de éste, con fecha límite de 28 de junio de 2018.

En lo que se refiere al alcance, como ya se ha dicho, este proyecto consistirá en analizar la respuesta de un cuadro de bicicleta, por lo que únicamente se diseñará esta parte de la bicicleta. El estado de carga que se va a representar viene definido en la norma **UNE-EN ISO 4210-6**, que es concretamente el ensayo de caída de una masa, por lo que si se quisiese simular otro estado de carga sería necesario repetir el análisis. Para poder simular dicho ensayo se deberán diseñar también una horquilla con un rodillo y un percutor, que es el que efectuará el golpe, pero estos diseños serán únicamente para el ensayo. Es decir, el diseño de la horquilla del conjunto no se hará pensando en el modelo real de la bicicleta, sino que se diseñará de manera que ejerza la misma función en cuanto a rigidez y transmisión de esfuerzos. Otro dato por considerar sobre el diseño del cuadro es que en este caso se tratará de un modelo de superficies y no de sólidos.

En cuanto a los programas y sus versiones que se han utilizado para el desarrollo del proyecto han sido Solid Edge con la versión ST10 para el diseño del modelo y la versión 18.2 con licencia de estudiante del programa ANSYS para la simulación y el análisis. Esto será importante a la hora de abrir los archivos desde otros dispositivos que no tengan las mismas versiones, ya que

en caso de que se disponga de una versión anterior a las mencionadas, no se podrán abrir los archivos.

Finalmente, lo que se espera conseguir es que la deformación no supere los valores establecidos por la norma, es decir, verificar que el diseño sea el adecuado.

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

En este apartado se mencionarán los beneficios que pueda aportar este proyecto clasificándolos según el aspecto técnico, económico y práctico. Los beneficios técnicos recogerán los avances de conocimiento que pueda aportar en el ámbito de la ingeniería, en los beneficios económicos se considerarán los ahorros que pueda suponer y finalmente los beneficios prácticos serán aquellos que justifiquen la utilidad en la práctica educativa y/o una mejora social.

4.1 BENEFICIOS TÉCNICOS

El Método de Elementos Finitos, coloquialmente conocido como MEF, es uno de los métodos más empleados a la hora de realizar un análisis de piezas o conjuntos destinado a la verificación del diseño mecánico. Aunque este método se explotó en 1950 con el avance de los ordenadores y haya desarrollado su capacidad, hoy en día sigue siendo un campo del que no se tiene el 100% de conocimiento ya que depende de muchos parámetros de funcionamiento y ofrece muchas alternativas de análisis.

Este método, como se verá más adelante, es un método numérico aproximado, pero sin duda ofrece muchas ventajas. En cuanto a exactitud de los resultados el método más fiable es el ensayo experimental, pero como ya se ha mencionado antes este método supone un coste muy alto. Con la ayuda del MEF, se obtiene una solución aproximada consiguiendo reducir el coste económico, ya que al poder corregirse varios errores mediante la simulación virtual serán menos los ensayos que haya que realizar para obtener la solución exacta. Por otro lado, también se reduce el tiempo y personal necesarios para el montaje del modelo en el ensayo experimental. Aunque será inevitable hacer algún ensayo experimental, en este Trabajo de Fin de Grado se analizará el esfuerzo requerido por el MEF y la fiabilidad de los resultados para ver si se podría evitar el ensayo.

4.2 BENEFICIOS ECONÓMICOS

Aunque no sea siempre posible reemplazar un ensayo experimental por una simulación de éste mediante un software de Elementos Finitos, esta práctica supone claramente un ahorro en los costes. Los resultados obtenidos de un ensayo experimental siempre serán más exactos que una simulación, pero también más caros, ya que las prácticas experimentales suponen la fabricación del modelo, un banco de ensayos, equipo de medición, más

personal, etc., y todo esto sin la garantía de que el diseño del modelo sea válido. La simulación mediante el MEF nos permite diseñar y validar dicho diseño sin tener que fabricarlo y pudiendo hacer los cambios que sean necesarios para la optimización de éste, evitando así todos los costes que supone la práctica experimental.

4.3 BENEFICIOS PRÁCTICOS

Como beneficio práctico se contempla la posibilidad del uso de este proyecto como herramienta destinada a la docencia, pudiendo ser un apoyo en la enseñanza relacionada con la ingeniería. Conocer la calidad de estas simulaciones también será de gran ayuda, ya que contrastando los resultados con los del ensayo experimental se puede comprobar hasta qué punto es factible sustituir el ensayo por la simulación, suponiendo una gran ventaja como ya se ha mencionado. No se descarta la posibilidad de que pueda ser de gran interés para cualquier persona que no esté sumergida en el mundo de la ingeniería, pudiendo ser un acceso a una herramienta para el diseño de cualquier pieza destinada al uso personal.

5 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

A lo largo del proyecto ha sido necesario tomar una serie de decisiones dadas las diferentes alternativas que se han presentado. A continuación, se presentan dichas alternativas en cuanto a diseño del cuadro, tipo de análisis y método de análisis. También se justificará la decisión final, siendo el coste económico y la precisión de los resultados dos factores de gran importancia.

DISEÑO DEL CUADRO

A la hora de diseñar el modelo geométrico del cuadro, nos encontramos con dos opciones: ¿modelado de sólidos o de superficies? Para tomar esta decisión es necesario conocer el Método de Elementos Finitos, ya que afectará directamente al modelo de dicho método. El algoritmo de mallado del MEF genera una malla de elementos sólidos o macizos en el caso de modelos sólidos y mallas de elementos cáscara en el caso de modelos de superficies.

En el Método de Elementos Finitos, a la hora de mallar modelos sólidos, se define el "Aspect Ratio", siendo la relación entre el lado más largo y más corto del elemento de mallado sólido. Este valor indicará la relación de aspecto de los sólidos, como tetraedros y hexaedros, siendo muy importante en lo que se refiere a la precisión del resultado. Lo que ocurre con los sólidos de mala relación de aspecto es que añaden al modelo una rigidez ficticia en algunas direcciones, por lo que las deformaciones que se obtengan serán más pequeñas que las reales.

Al tratarse el cuadro de bicicleta un conjunto de tubos de pequeños espesores, si tratásemos de mallarlo con elementos sólidos, serían necesarios elementos muy pequeños para poder lograr una buena relación de aspecto. Esto implica a su vez una cantidad muy alta de elementos, y nudos, elevando así el coste computacional de forma importante. Los grados de libertad que requiere una malla con sólidos también será mayor. Por ello, en este caso lo adecuado es diseñar el modelo geométrico del cuadro con un modelo de superficies, mallándolo con elementos cáscara en el software de Elementos Finitos.

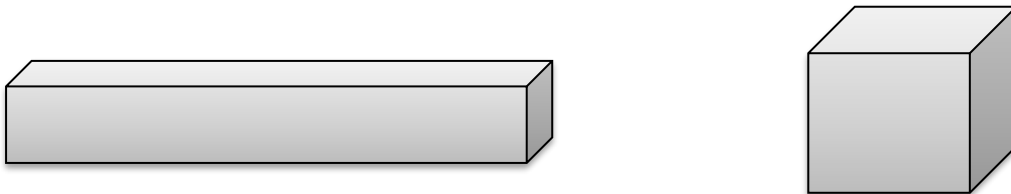


Ilustración2. Elementos con mala y buena relación de aspecto respectivamente

MÉTODO DE ANÁLISIS

Como ya se ha mencionado en el apartado del contexto, existen tres métodos para el diseño mecánico. Por un lado, tenemos el método tradicional, que resuelve el problema mediante fórmulas y diagramas a base de simplificaciones. Por otro lado, el método experimental desarrolla el análisis con un prototipo al que se le aplicarán las cargas del entorno real en el que va a trabajar. Por último, tenemos el Método de Elementos Finitos o MEF. El método tradicional es el más rápido y barato, pero también el menos preciso. Por el contrario, el método experimental ofrece unos resultados muy precisos, pero con un coste muy elevado. El MEF es capaz de resolver los problemas que el método tradicional no puede (cuando las hipótesis simplificativas no se cumplen) con una buena precisión, evitando el coste que supone la construcción del prototipo en el método experimental. Aunque no siempre sea así, en este caso el método más eficiente resulta ser el MEF.

TIPO DE ANÁLISIS

Al tratarse de una simulación de un impacto, el tipo de análisis que habrá que realizar será un análisis dinámico. Por un lado, tenemos la dinámica rígida, la que se ha descartado desde un principio, ya que no tiene sentido en una simulación en la que se esperan conseguir unas deformaciones que en la dinámica rígida no se contemplan. Por otro lado, están los análisis de dinámica explícita o implícita. En un problema cuasiestático o en el que las cargas varíen gradualmente, permitiendo intervalos de integración mayores, lo adecuado sería utilizar el método implícito, ya que supone hacer el cálculo en menos pasos, pero más intensos. Para problemas de impactos o choques, como es en este caso, se producen unas variaciones fuertes e inmediatas en las cargas, por lo que es más preciso emplear intervalos de integración menores, siendo necesario hacer el cálculo en más pasos, reduciendo el coste computacional de cada paso comparándolo con el método implícito. Por lo tanto, en este caso se resolverá el problema mediante dinámica explícita.

Se podría hacer también un análisis de las fuerzas involucradas en el impacto, obteniendo una fuerza estática equivalente para realizar un análisis estático con el MEF. Aunque se prevé un grado importante de imprecisión de los resultados, puede que sirva de ayuda para tener una mínima idea de

cómo se va a comportar el modelo, ya que un análisis estático es más rápido, por su simplicidad, que uno dinámico. Claro que, la fuerza equivalente que se aplicaría en el análisis estático tendría que ir mayorada por un coeficiente por tratarse de un impacto. Dicho coeficiente, en caso de que no estuviese tabulado, se podría calcular de la manera que se muestra en la siguiente ilustración, igualando la energía de la masa que cae a la energía de deformación de la horquilla.

La barra empotrada representa la horquilla. La fuerza F es la proyección perpendicular a la horquilla de la fuerza que la masa supondría por la caída ($m \cdot g$), cayendo desde una altura h . Con F' representaremos la fuerza mayorada a aplicar en el análisis estático, y δ será la flecha de la horquilla tras la deformación.

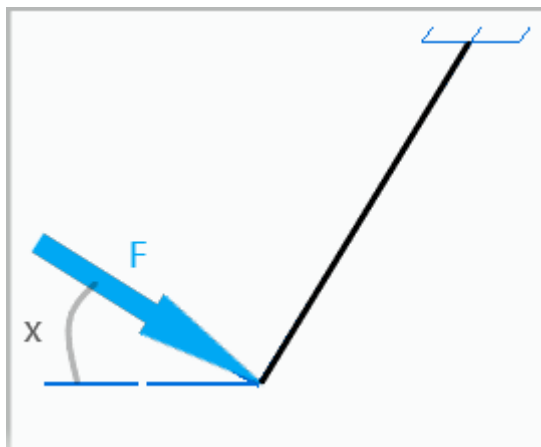


Ilustración 3. Fuerza actuante en la horquilla

Igualando la energía de caída de la masa con la energía de deformación de la horquilla:

$$F \cdot h \cdot \cos(x) = F' \cdot \delta$$

Despejando F' :

$$F' = F \cdot h \cdot \cos(x) / \delta$$

Siendo ésta la fuerza mayorada que se debería de aplicar en caso de hacer un análisis estático.

6 METODOLOGÍA

6.1 INTRODUCCIÓN

Siendo el objetivo analizar la respuesta de un cuadro de bicicleta ante un ensayo de choque, es necesario previamente definir el conjunto de cuadro, horquilla, rodillo y percutor. Una vez definido el conjunto se procederá a simular y analizar dicho ensayo mediante un software de Elementos Finitos.

Es importante asegurarse de que la definición de cada una de las partes del conjunto (cuadro, horquilla, rodillo y percutor) es la adecuada -como pueden ser medidas y relaciones geométricas-, ya que cualquier cambio en el diseño geométrico supondrá volver a definir todos los parámetros definidos hasta ese momento en el software de Elementos Finitos.

En este apartado se describirán las herramientas que han sido necesarias para llevar a cabo este proyecto, así como sus prestaciones. Seguidamente se explicará detalladamente la metodología que se ha seguido para el diseño y el análisis del conjunto, para finalmente interpretar los resultados obtenidos en dicho análisis.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO A REALIZAR

Como ya se ha dicho, el objetivo del proyecto es analizar la respuesta del cuadro de bicicleta ante un estado de carga definido en la norma española **UNE-EN ISO 4210-6, Requisitos de seguridad para bicicletas**. En esta norma se definen varios ensayos que deben realizarse a las bicicletas, concretamente al cuadro y la horquilla, para garantizar su buen funcionamiento. En este caso se aplicará el ensayo **4.1** de la norma, "**Cuadro. Ensayo de choque (caída de una masa)**" que se procederá a describir brevemente.

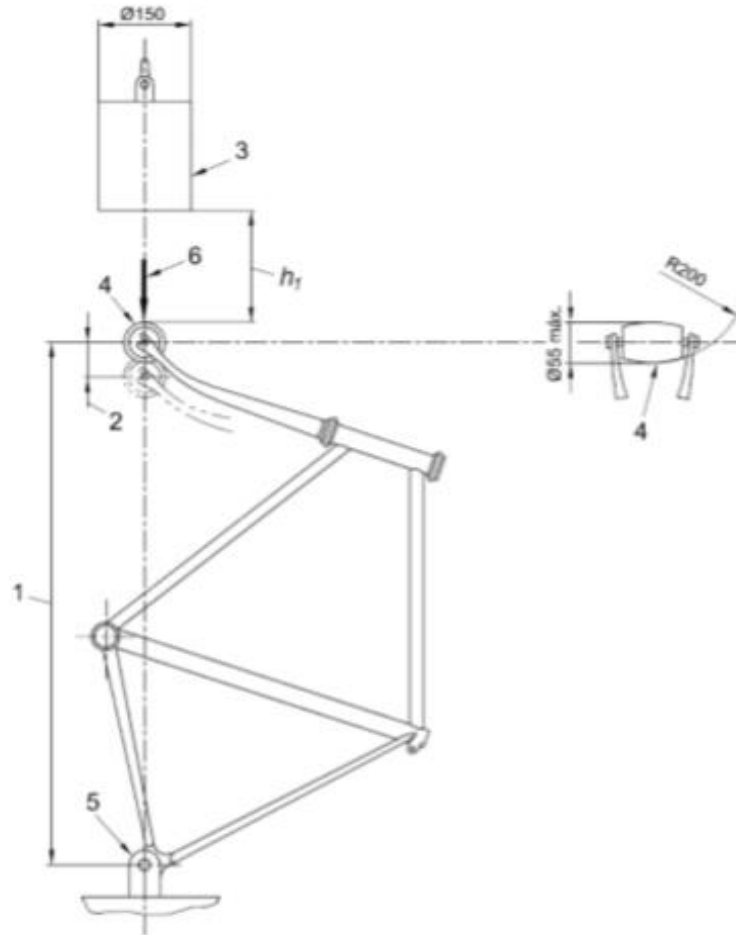
Los elementos que forman parte de este ensayo son: el cuadro, la horquilla, el rodillo y el percutor. La horquilla del ensayo podrá ser una falsa horquilla que se utilizará únicamente para el ensayo en vez de la que irá montada con el cuadro al final. Al ser una falsa horquilla sus extremos deberán ir redondeados de tal manera que tengan una forma parecida a la del rodillo. El rodillo se montará en el extremo de la horquilla, que es donde se efectuará el golpe. Éste no deberá superar 1 kg de peso y sus dimensiones deberán ser las que se muestran en la siguiente figura. En cuanto al percutor, tendrá un peso de 22,5 kg y un diámetro de 150mm.

Una vez montado el rodillo con la horquilla y el cuadro, se sujeta el conjunto verticalmente en un dispositivo de fijación rígido en el eje trasero del cuadro como se observa en la figura. Se medirá la distancia entre el eje delantero y el trasero estando apoyado el percutor sobre el rodillo, y se volverá a medir la misma distancia una vez que se deja caer el percutor desde una altura. Se muestran en la tabla los diferentes valores de la altura dependiendo del tipo de bicicleta, siendo en este caso de 180mm por tratarse de una bicicleta de paseo.

Tabla 1. Alturas de caída del percutor

Tipo de bicicleta	Medidas en milímetros			
	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Altura de caída, h_1	180	180	360	212

Medidas en milímetros



Leyenda

- h_1 : Altura de caída
- 1: Distancia entre ejes
- 2: Deformación permanente
- 3: Percutor de 22,5 kg
- 4: Rodillo de pequeña masa (1 kg máximo)
- 5: Fijación rígida en el punto de enganche del eje trasero
- 6: Sentido del choque trasero

Ilustración 4. Esquema del montaje

6.3 PRESTACIONES Y HERRAMIENTAS

Para la realización del trabajo se han necesitado dos herramientas principales que son los programas **Solid Edge**, para el diseño del conjunto, y **ANSYS** para la simulación y el análisis del ensayo. Se describirá a continuación de manera general la base del funcionamiento de ambos, así como la manera en la que se ha trabajado en este caso.

6.3.1 SOLID EDGE

Solid Edge es un programa desarrollado por Siemens de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales. Permite tanto el modelado de piezas como el doblado de chapas, soldaduras, ensamblaje de conjuntos y funciones de dibujos en 2D.

En este caso se ha trabajado con la versión más actualizada de Solid Edge que es el ST10, siendo por el momento el único programa de diseño 3D que permite trabajar de dos maneras diferentes: diseño por modelado tradicional y diseño con la tecnología síncrona. El modelado tradicional engloba a la vez dos modos de trabajo que son el modelado basado en historiales y el modelado explícito. Para entender las diferencias entre estos modos de trabajo veamos cuales son las características principales de cada uno.

- Modelado basado en historiales: Es un sistema que utiliza un árbol de operaciones secuencial, donde se van almacenando todas las operaciones realizadas. El diseño mediante este sistema requiere una planificación previa y es menos flexible a la hora de editar alguno de los pasos realizados. A parte de poca flexibilidad también supone un menor rendimiento, ya que cualquier cambio requiere que el programa calcule de nuevo todas las operaciones editadas del árbol de operaciones.
- Modelado explícito: A diferencia del modelado basado en historiales, permite una edición muy flexible debido a que proporciona una interacción directa con la geometría. Por el contrario, no proporciona el control y la posibilidad de establecer las normas de diseño para gestionar los cambios.

- Modelado con tecnología síncrona: Esta modalidad combina las ventajas de ambos métodos definidos anteriormente, es decir, la velocidad y flexibilidad del modelado explícito y el control y el diseño parametrizado del modelado basado en historiales. Por lo tanto, el modelado con tecnología síncrona permite trabajar con más libertad y eficiencia.

En este caso se ha realizado un ensamblaje de conjuntos definiendo por separado el cuadro, el percutor y la horquilla con el rodillo. En cuanto al modo de trabajo se ha trabajado con el modo ordenado, es decir con el modelado basado en historiales previamente descrito. La razón por la que se ha escogido el modo ordenado es que se le ha dado preferencia a la ventaja de tener el árbol de operaciones secuenciales frente a la libertad de modificación de la geometría, ya que se trata de una geometría conocida y sin gran complejidad.

Una vez definido el modo en el que se va a trabajar (ordenado o síncrono), en la parte superior de la ventana de trabajo nos encontramos con un menú con varias pestañas en el que se muestran distintas operaciones. A la hora de diseñar, tenemos dos opciones: trabajar con sólidos o con modelos de superficies. En ambos casos lo primero que hay que hacer es escoger el plano en el que se va a generar un boceto, y partiendo de ese boceto realizaremos las operaciones para crear nuestro modelo. En las siguientes imágenes se muestran las operaciones disponibles en caso de sólidos y modelos de superficie respectivamente.



Ilustración 5. Operaciones con modelos de sólidos



Ilustración 6. Operaciones con modelos se superficie

Como se puede observar hay multitud de comandos tanto para sólidos como para superficies. El objetivo de este trabajo no es comprender a fondo todas estas operaciones, por lo que no nos detendremos en la definición de cada una de ellas. En el apartado 7.4 se describirán detalladamente todas las operaciones realizadas en este caso en concreto para el diseño del conjunto.

6.3.2 ANSYS

ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 por John Swanson. Se trata de un software de simulación ingenieril que permite predecir cómo se comportará cualquier producto ante una situación real sin tener que llevar a cabo ensayos experimentales. ANSYS ofrece múltiples análisis como pueden ser: análisis estructural, dinámico, modal, fluido, harmónico...

Este programa trabaja con un software de Elementos Finitos, por lo que para comprender mejor los comandos del programa se explicará brevemente la base del Método de Elementos Finitos o MEF.

6.3.2.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El MEF como concepto existe desde el siglo XIX, ya que comparte la misma base que el cálculo de estructuras de celosías. Como en cualquier cálculo estático, el cálculo de celosías trata de resolver la ecuación $F = K \cdot \delta$ (1), donde:

F: fuerzas aplicadas a la celosía y las reacciones de los apoyos

K: rigidez de la celosía

δ : deformación resultante de la celosía

El objetivo es obtener la deformación total en función de las cargas que se apliquen, pero para ello es necesario conocer la rigidez. La rigidez de la estructura completa es desconocida, pero una celosía no es nada más que un conjunto de barras de las cuales la rigidez es conocida y viene dada por la siguiente ecuación: $E=A/L$, siendo E el límite elástico del material, A la sección de la barra y L su longitud. Combinando la rigidez de todas las barras que forman la celosía se consigue la rigidez total, K , de la estructura y se resuelve la ecuación (1) obteniendo así los desplazamientos de los nodos (intersecciones entre los elementos discretos). Por lo tanto, se trata de sustituir un campo físico de rigidez desconocida (celosía) por elementos finitos (barras) de rigidez conocida.

Cuando se trata de un sistema continuo, la solución exacta puede calcularse mediante las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento de sólidos deformables, pero este proceso puede ser muy complicado. El MEF nos permite obtener una solución aproximada aplicando el mismo criterio que en el cálculo de celosías, es decir, dividiendo el sistema continuo en elementos discretos siendo sus propiedades conocidas (por ej.: triángulos y cuadriláteros). Una vez calculada la rigidez total compuesta por la rigidez de cada uno de los elementos (no se verá el cálculo de dicha rigidez) se resuelve el sistema algebraico de ecuaciones $\{F\} = [K] \cdot \{\delta\}$ y se obtiene los desplazamientos de cada nodo δ^i . El cálculo del desplazamiento de cualquier punto del sistema que no sea un nodo se conseguirá mediante interpolación.

Para un análisis dinámico, siendo éste nuestro caso, la ecuación de equilibrio es más compleja, ya que depende también del tiempo y de la primera y segunda derivada de la deformación respecto del tiempo. Se trata entonces de una ecuación diferencial, claramente más compleja de resolver: $[M] \cdot \{\delta''(t)\} + [C] \cdot \{\delta'(t)\} + [K] \cdot \{\delta(t)\} = \{F\}$, siendo $[M]$ la matriz de masas, $[C]$ la matriz de amortiguación, $[K]$ la rigidez y $\{F\}$ el vector de fuerzas aplicadas. Para resolver dicha ecuación se puede optar por la dinámica explícita o la implícita. El método de la dinámica implícita requiere calcular el desplazamiento de una posición según en desplazamiento de la posición anterior, lo que se conoce como esquema de integración del tiempo de Euler. Este esquema permite dar grandes saltos en el tiempo sin perjudicar la estabilidad de la convergencia, por lo que también se conoce como esquema de estabilidad incondicional. La gran desventaja de este planteamiento es que en cada paso es necesario calcular la inversa de la matriz de rigidez $[K]$, siendo una operación que consume mucho tiempo, sobre todo cuando

existen no linealidades. En el caso de la dinámica explícita, en vez de calcular los desplazamientos, $\{\delta(t)\}$, se calculan las aceleraciones, $\{\delta''(t)\}$. Por ello, en este caso se calcula en cada paso la inversa de la matriz de masas, y no la de la rigidez, siendo una tarea menos costosa por ser $[M]$ una matriz concentrada o diagonal, pudiéndose calcular el inverso de los términos de la diagonal principal en un solo paso. En este caso no se sigue el esquema de integración del tiempo de Euler, sino que a partir de las aceleraciones se calculan las velocidades del siguiente paso, y de estas velocidades los desplazamientos del siguiente, de modo que se van acumulando las imperfecciones. Es por eso por lo que el método explícito requiere incrementos de tiempo más pequeños entre un paso y otro.

Como ya se ha dicho, la solución será una aproximación a la solución exacta, siendo estos los errores que supone el uso del MEF:

- Error geométrico: Ocurre cuando los lados de los elementos discretos no se ajustan bien a la geometría del sistema continuo. Se podría minimizar este error subiendo el número de elementos o utilizando elementos curvos.

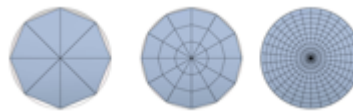


Ilustración 7. Error geométrico

- Error por discretización: Es debido a que cuando se discretiza en elementos finitos el sistema continuo, se modeliza su comportamiento mediante funciones de interpolación de forma aproximada.

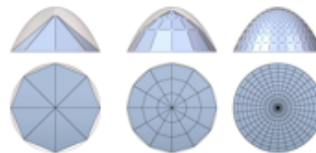


Ilustración 8. Error de discretización

Como es lógico, cuanto más pequeños sean los elementos discretos, más se acercará a la solución exacta, pero cuantos más elementos haya mayor será el sistema de ecuaciones a resolver y por lo tanto mayor también el coste computacional. Así pues, se trata de conseguir un compromiso entre el coste

y la precisión, discretizando con elementos más pequeños sólo aquellas zonas donde se exija mayor precisión.

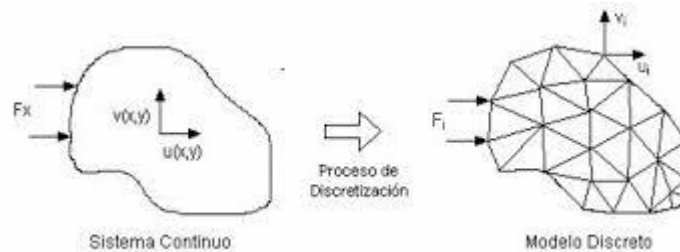


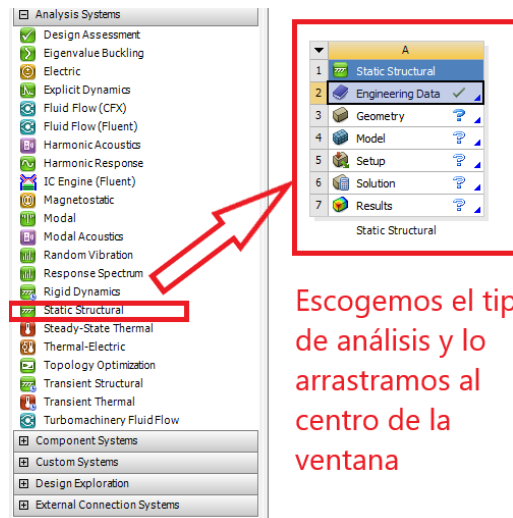
Ilustración 9. Ejemplo de discretización de un sistema continuo

Como todo software consta de 3 partes: preprocesador, procesador y postprocesador.

- Preprocesador: Es el módulo donde se define el análisis a realizar, es decir: la geometría, el material, cargas aplicadas, condiciones de contorno, tipo de análisis... En este apartado también se lleva a cabo el mallado de las piezas (discretización).
- Procesador: Partiendo del modelo definido en el preprocesador el programa resuelve la ecuación (1).
- Postprocesador: El analista visualiza e interpreta los resultados obtenidos por el programa.

6.3.2.2 OPCIONES DE ANÁLISIS CON ANSYS

Para la realización del análisis de este proyecto se ha utilizado la versión de estudiante 18.2 de ANSYS WorkBench. Al abrir el programa la primera ventana con la que nos vamos a encontrar es la que se muestra en la siguiente figura, donde se tendrá que escoger el tipo de análisis que se quiere realizar. Una vez escogido aparecerá un cuadrado pequeño con los diferentes módulos del análisis escogido.



Escogemos el tipo de análisis y lo arrastramos al centro de la ventana

Ilustración 10. Selección del tipo de análisis

En la sección de “Engineering Data” que vemos en el recuadro rojo nos encontramos con una biblioteca de materiales con sus propiedades, para después poder aplicar dichos materiales a los elementos que se van a analizar. A partir de ahí, los pasos que se deben seguir son:

1. Definir la geometría.

Para crear la geometría hay dos opciones. Puede definirse en el propio programa de ANSYS, en el “SpaceClaim” o bien importar la geometría de otro programa CAD, en este caso Solid Edge. Incluso se puede importar la geometría y editarla en ANSYS.

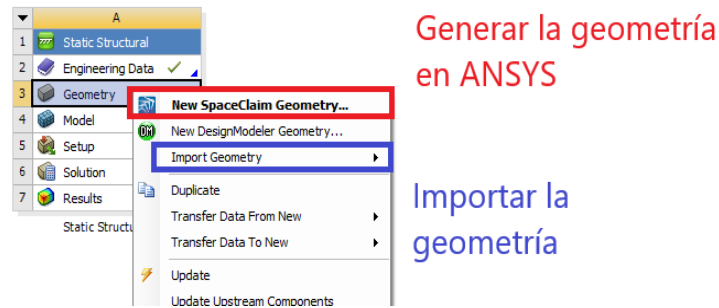


Ilustración 11. Opciones de geometría

Una vez que la geometría esta lista la editaremos en el “DesignModeler”, donde se podrán realizar operaciones como volteado de las superficies, aplicar simetrías, dividir las superficies... y más operaciones que ayudarán a optimizar el modelo y del mismo modo reducir los costes del análisis.

2. *Preparar el modelo.*

Para ello hay que entrar en la sección “Model” que nos conducirá al módulo “Mechanical”. Se definirán por una parte las características de cada elemento del conjunto, así como el material, espesor, si son flexibles o rígidos etc. Con esos datos el programa calculará automáticamente su masa, volumen, momento de inercia...

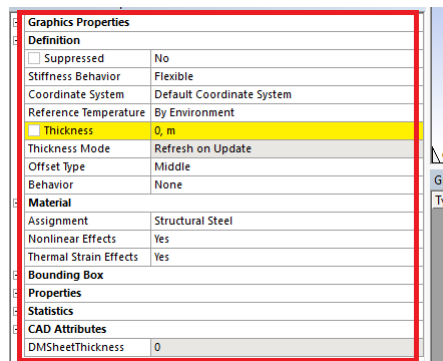


Ilustración 12. Propiedades de los elementos del conjunto

El siguiente paso es generar la malla del conjunto. El programa lo generará de modo automático, pero habrá que realizar todas las operaciones necesarias para que ese mallado sea el óptimo. Para ello, dentro de “Mesh” nos da la opción de editar la malla de varias maneras como pueden ser: tamaño de los elementos, número de

elementos en una arista, conexión de las mallas en las intersecciones, refinado, etc.

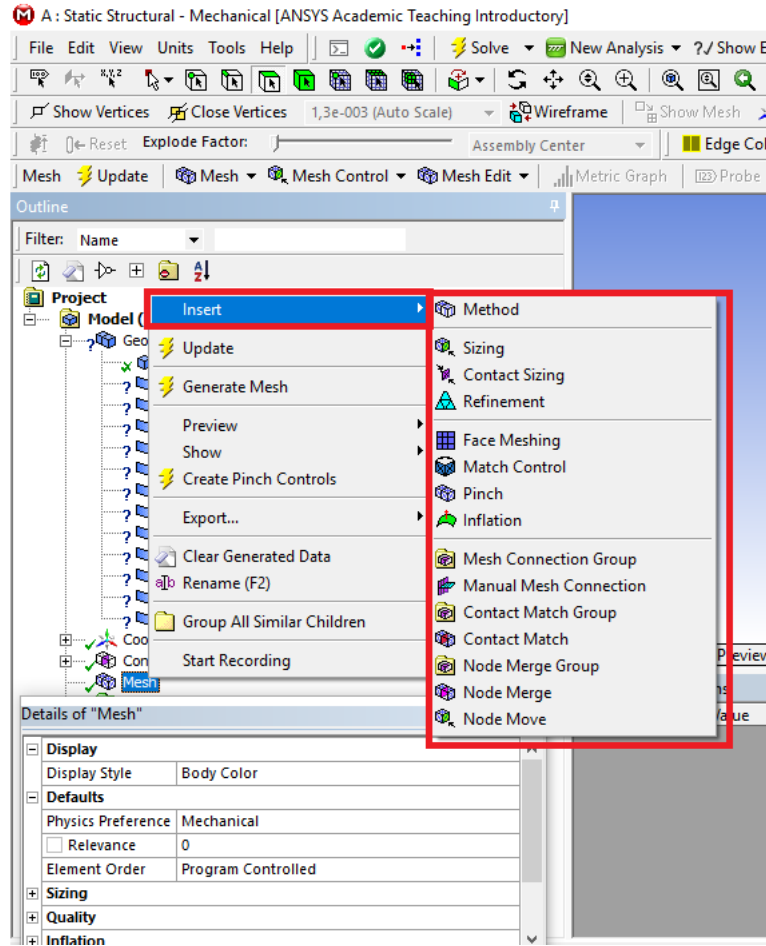


Ilustración 13. Opciones del mallado

3. Solución

Para finalizar, antes de que el programa pueda obtener la solución se deben definir tanto el estado de carga como las condiciones de contorno. Cuando ya esté todo definido, el último paso será decirle al programa que lo resuelva, dando al botón de "Solve". Cuando éste termine solo quedará interpretar el resultado.

En este apartado se ha descrito de una forma muy general cómo se trabaja con el programa Elementos finitos ANSYS, ya que en el punto 7.6 se explicará detalladamente todas las operaciones realizadas para la simulación y el análisis de este proyecto.

6.4 ELECCIÓN DEL MATERIAL DEL CUADRO

La elección del material del cuadro es una parte muy importante, ya que definirá mediante sus propiedades mecánicas el comportamiento del cuadro ante el choque. En este apartado se hará un breve resumen de los materiales más empleados hoy en día y seguidamente se justificará la elección de éste mediante la valoración de algunos factores.

6.4.1 MATERIALES DE LOS CUADROS EN LA ACTUALIDAD

Son 4 los materiales que más se utilizan en la fabricación de cuadros de bicicleta: Titanio, Carbono (composite), Aluminio y Acero.

TITANIO

El titanio se caracteriza por su baja densidad, alta resistencia a la fatiga y la inmunidad ante la corrosión, siendo unas características muy valoradas a la hora de comprar una bicicleta. Aun así, no es de los materiales que más se usa, ya que suelen ser necesarios mayores diámetros y espesores de tubo para mantener una mínima rigidez, subiendo así su peso final. Otro de los grandes enemigos del Titanio es su elevado precio, ya que su gran dureza hace que sea muy difícil de mecanizar y de soldar.

CARBONO

Los composites de fibra de carbono son los más usados hoy en día en la industria del ciclismo, al menos en las bicis de gama alta. Su gran ventaja es la relación rigidez/peso, ya que ofrece una mayor rigidez para un peso mucho menor comparando con otros materiales. Su resistencia ante la corrosión y la capacidad de amortiguación son también propiedades características de este material.

En cuanto a la fabricación se adapta prácticamente a cualquier geometría. Por otro lado, tiene tres claras desventajas: el precio, ya que puede ser hasta 10 veces más caro que el acero, su facilidad para fracturarse ante un golpe o una caída y la peor reciclabilidad.

ALUMINIO

El aluminio puro es un material muy blando, por lo que suelen emplearse aleaciones de aluminio para la fabricación de tubos. Las aleaciones más utilizadas para cuadros de bicicleta son las series 5000, 6000 y 7000. También se pueden añadir otros componentes, como puede ser el cobre, para

garantizar una mayor resistencia a la rotura y a la fatiga. La mayor ventaja del aluminio es su baja densidad, pero debido a su baja resistencia a la fatiga, rotura y deformación se aconseja la fabricación de tubos de mayor diámetro, lo que hace que suba el peso final (sin superar el del acero). Entre las bicis de gama media es el material más usado en los cuadros.

ACERO

El acero es una aleación de hierro y carbono. Cuanto más alto sea el porcentaje del carbono será más duro y resistente, pero al mismo tiempo más frágil. Por lo tanto, para equilibrar sus propiedades suelen añadirse también otros elementos como: Cobalto, Níquel, Cromo, Molibdeno, Silicio...

El acero más usado en la fabricación de cuadros de bicicleta es el 25-CrMo-4 o el 34-CrMo-4, más conocido como Cromoly (acero al cromo molibdeno) o como acero 4130.

Debido a su gran resistencia a la rotura pueden fabricarse tubos de hasta 0,4 mm de espesor, aunque esto supondría un gran riesgo a la hora de soldarlos. Para evitar esto, suelen engrosarse dichos tubos por las extremidades.

Es un material muy fácil de conseguir y manipular, por lo que una de las grandes ventajas de los cuadros de acero es su bajo coste comparando con el resto de los materiales. Además, este material soporta muchas deformaciones antes de degradarse por fatiga. Como desventajas tiene el peso y la poca resistencia ante la corrosión.

6.4.2 ELECCIÓN DEL MATERIAL

En este caso se trata de una bici de paseo, de gama media-baja, en el que el precio, la vida útil y la resistencia serán muy importantes a la hora de escoger el material.

Los cuadros de titanio y de composite de carbono son más empleados en bicis de gama alta y/o de competición siendo el precio de éstos muy elevado. Por lo tanto, quedarán descartados en este caso estos materiales para el cuadro.

La elección entonces será entre el aluminio y el acero. Para ello se ponderarán del 1 al 5 varias propiedades, siendo el 5 el valor que muestra mayor importancia. Se valorarán dichos materiales según el nivel de cumplimiento respecto a los requisitos definidos también del 1 al 5. Se muestra el resultado en la siguiente tabla:

Tabla 2. Valoración del acero y el aluminio

	Precio (4)	Vida útil (5)	Fácil reparación (3)	Absorción de vibraciones (3)	Peso (2)
Aluminio	3	3	4	3	5
Acero	5	4	5	4	3

La valoración total para cada material:

Aluminio -> $3 \times 4 + 3 \times 5 + 4 \times 3 + 3 \times 3 + 5 \times 2 = 58$

Acero -> $5 \times 4 + 4 \times 5 + 5 \times 3 + 4 \times 3 + 3 \times 2 = 73$

Se concluye que el acero es más adecuado que el aluminio en este caso por las condiciones establecidas, por lo que el cuadro que se analizará será de acero.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el acero más común en lo que se refiere a cuadros de bici es el acero 4130, siendo sus propiedades las siguientes:

Tabla 3. Propiedades del acero 4130

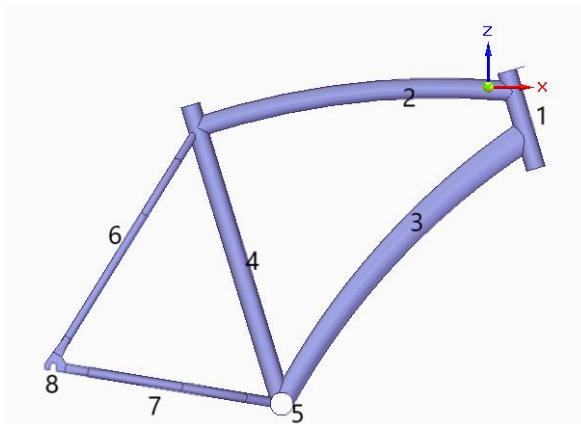
Resistencia a tracción: 590-760 MPa
Límite elástico: 480-590 MPa
Elongación: 23-30%
Dureza Rockwell: 90-96
Densidad: 7833 kg/m ³

Por último, para la horquilla y el rodillo también se han escogido el acero 4130 y para el percutor se ha decidido usar el acero estructural.

6.5 DISEÑO DEL CONJUNTO

En este apartado se explicará cómo se ha diseñado cada elemento para después crear el conjunto. Se recuerda que los elementos que forman el conjunto son: el cuadro, la horquilla con el rodillo y el percutor.

En la siguiente imagen se facilitan los nombres que se han empleado para referirse a cada tubo del cuadro.



- 1: Tubo de dirección
- 2: Tubo superior
- 3: Tubo inferior
- 4: Tubo del sillín
- 5: Pedalier
- 6: Vaina superior
- 7: Vaina inferior
- 8: Enganche posterior

Ilustración 14. Enumeración de los elementos

6.5.1 EL CUADRO

Antes de empezar a diseñar el cuadro de una bicicleta, es esencial conocer su geometría. En la siguiente imagen se observa la forma básica de un cuadro y se definen también las medidas y relaciones geométricas que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñarlo.

- A: Punto más alto del tubo del sillín – Centro del pedalier
- B: Ángulo del tubo del sillín
- C: Ángulo del tubo de dirección
- D: Longitud efectiva del tubo superior
- E: Longitud de la vaina inferior
- G: Altura del pedalier
- F: Distancia entre ejes
- H: Longitud del tubo de dirección

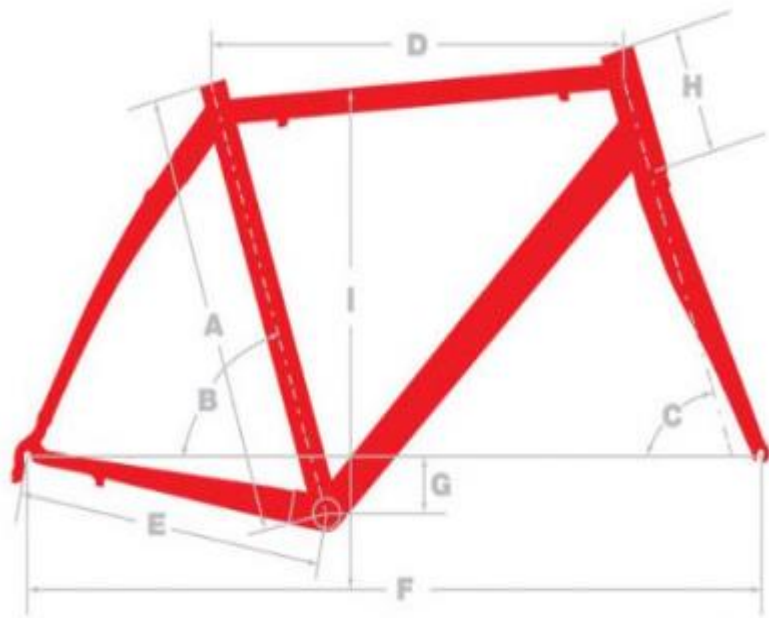


Ilustración 15. Geometría básica del cuadro de una bicicleta

Estas medidas serán distintas para cada tamaño de cuadro. En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores para cada talla donde las longitudes están en milímetros y los ángulos en grados. En este caso se ha escogido un cuadro de talla M.

Tabla 4. Longitudes y ángulos según la talla del cuadro

SIZE	A	B	C	D	E	F	G	H
XXS	450	75	71,5	500	405	969	66	110
XS	480	74	72	510	405	974	66	130
S	510	73,5	73	530	405	977	66	145
M	540	73	73,5	550	405	990	66	175
L	757	72,5	73,5	570	408	1003	63	205
XL	600	72,5	74	585	408	1012	63	230

Con esta información se puede comenzar a diseñar en Solid Edge el cuadro de la bicicleta. Para ello, lo primero será crear un boceto con la geometría que acabamos de ver y con las medidas establecidas para la talla M.

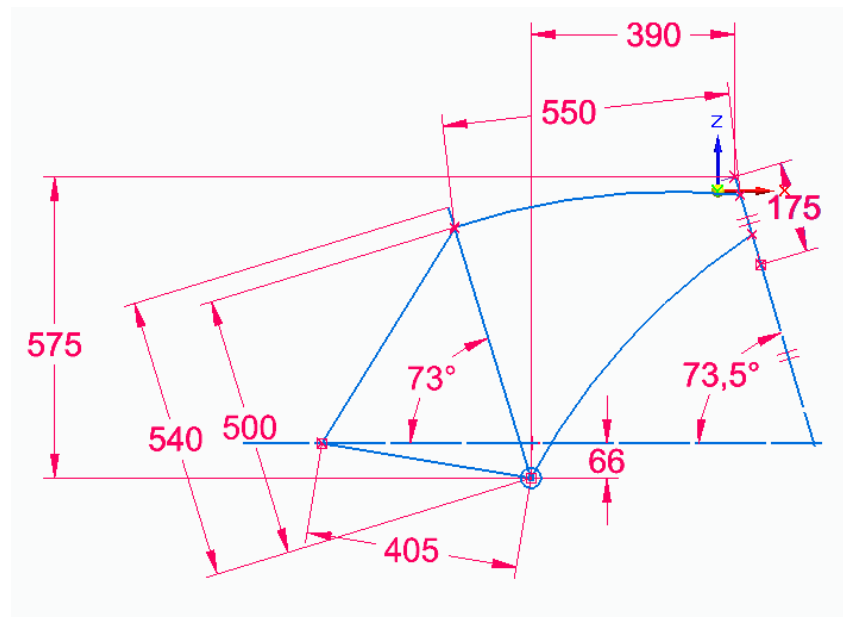


Ilustración 16. Boceto del cuadro

El siguiente paso será crear los tubos. Para ello, uno de los comandos que más se ha usado ha sido “superficie por barrido”. Este comando te permite generar superficies a lo largo de una trayectoria con una o varias secciones que se definan. En caso del tubo de dirección, el tubo del sillín y el pedalier, las trayectorias son rectas y las secciones constantes a lo largo de toda la trayectoria, por lo que para estos tubos hubiese sido más simple hacer uso de una extrusión. En cuanto a los tubos inferior y superior, las trayectorias son curvas, y además para el tubo inferior la sección varía desde una elipse a otra elipse más pequeña. Cabe señalar que no ambas elipses tienen la misma orientación, ya que la que conecta con el tubo de dirección tiene el eje mayor vertical y la que conecta con el pedalier horizontal. De cara a la flexión es más conveniente que el eje mayor siempre sea vertical, por lo que el diseño obedece a criterios estéticos en caso del tubo inferior. Los pasos que se han seguido para crear el tubo de dirección, tubo del sillín, pedalier y tubo superior e inferior han sido: crear en un plano perpendicular a cada trayectoria la sección de cada tubo y utilizar el comando por barrido.

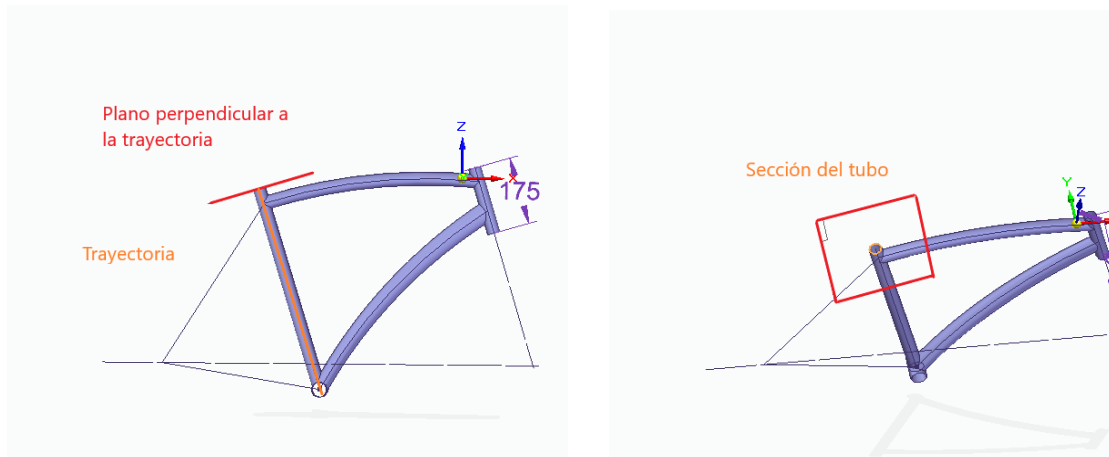


Ilustración 17. Ejemplo de definición del tubo del sillín

Para las vainas superior e inferior, el procedimiento que se ha seguido ha sido parecido. Lo primero es definir los planos en los que se van a dibujar las trayectorias de las vainas tal y como se ve en las imágenes. Para dibujar la sección que queremos que recorra esa trayectoria tendremos que definir de nuevo un plano perpendicular a dicha trayectoria y dibujar la sección correspondiente para después generar la superficie con el barrido, de la misma manera que se ha hecho para los demás tubos.

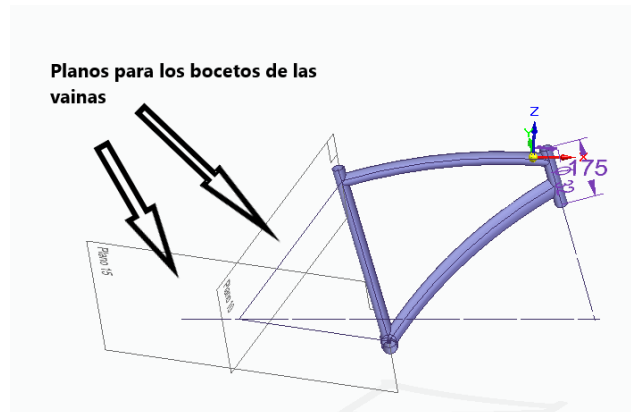


Ilustración 18. Planos para los bocetos de las vainas

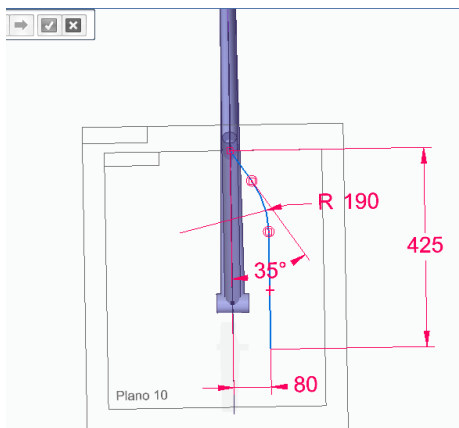


Ilustración 20. Boceto de vaina superior

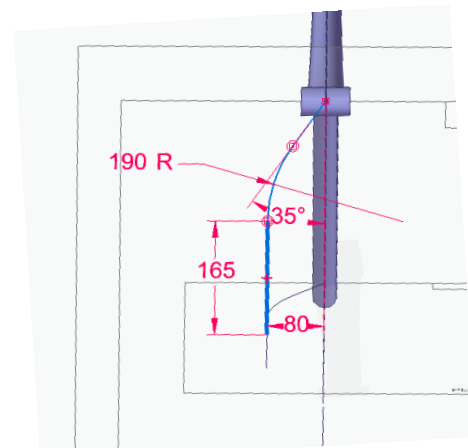


Ilustración 19. Boceto de vaina inferior

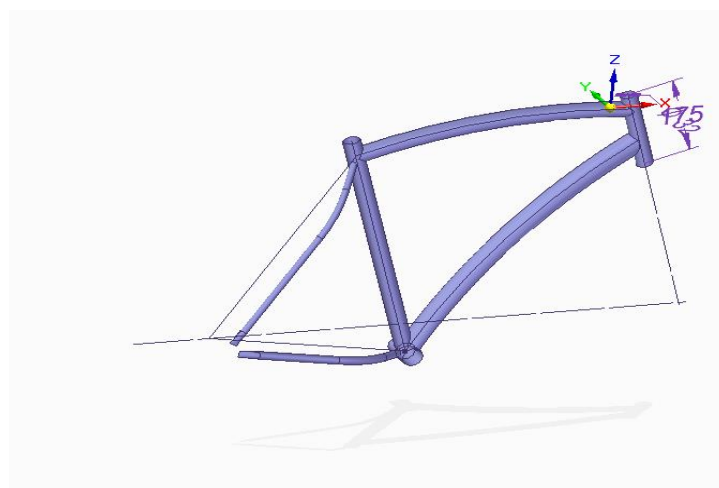


Ilustración 21. Vainas superior e inferior con el comando "superficie por barrido"

Para modelar el enganche posterior, donde se encaja el eje de la rueda trasera, se ha utilizado el comando “superficie limitada”. Este comando permite generar una superficie habiendo definido una curva cerrada. Después se ha unido el enganche con las vainas mediante el comando “BlueSurf”, generando una superficie también entre dos curvas, pero en este caso abiertas. Para ello ha sido necesario dividir la sección circular de las vainas en dos semicírculos. Para el par de vainas del lado opuesto simplemente se ha hecho uso del comando de simetría.

Finalmente se han realizado los cortes entre todos los tubos con el comando “intersecar”.

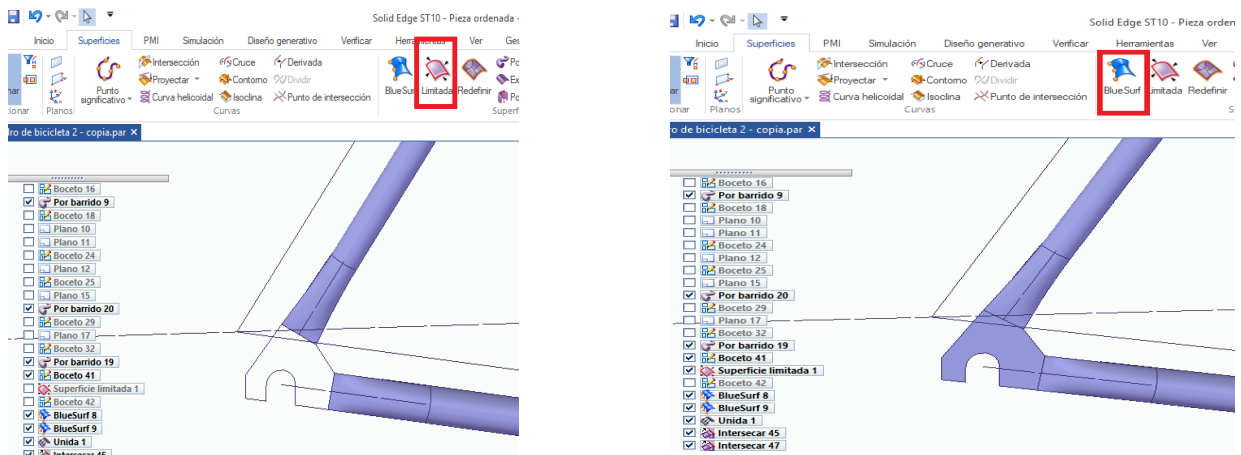


Ilustración 22. Definición del enganche y unión con las vainas

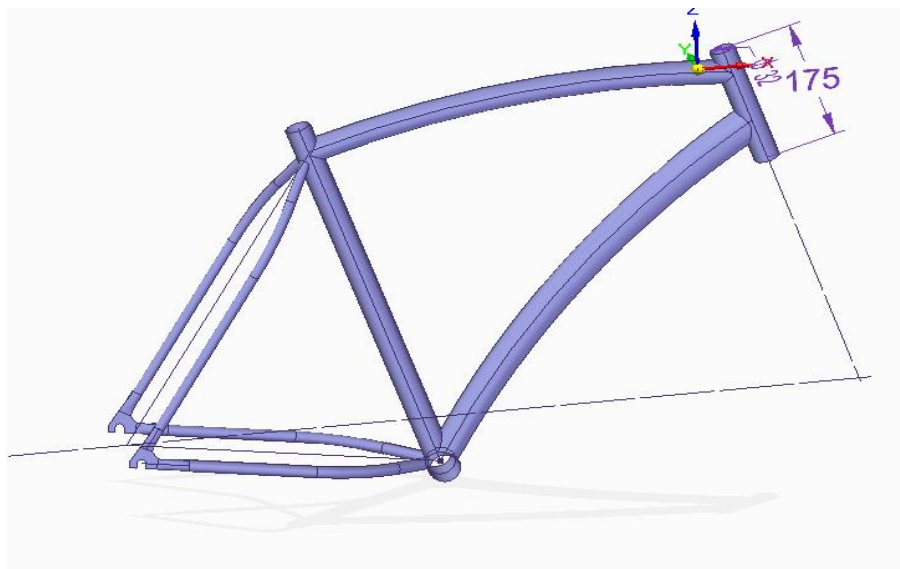


Ilustración 23. Cuadro de bicicleta final

6.5.2 LA HORQUILLA CON EL RODILLO

La horquilla y el rodillo también serán modelos de superficie. Por un lado, se ha creado el tubo que irá junto con el tubo de dirección, simplemente extruyendo una sección circular como se indica en la figura.

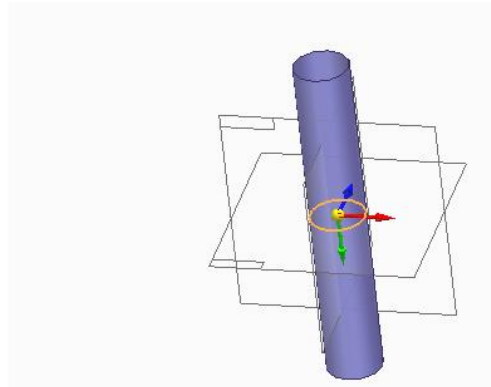


Ilustración 24. Tubo de horquilla

Para la parte central de la horquilla, la que unirá el tubo con las dos patas, se ha realizado otra extrusión con la sección cuadrada de la imagen. El lado superior de esta sección se ha definido como línea de construcción. Esto es debido a que no tiene sentido que el prisma de sección cuadrada tenga la tapa superior, ya que de cualquier manera hará falta otra superficie para unirlo con el tubo como se explicará más adelante.

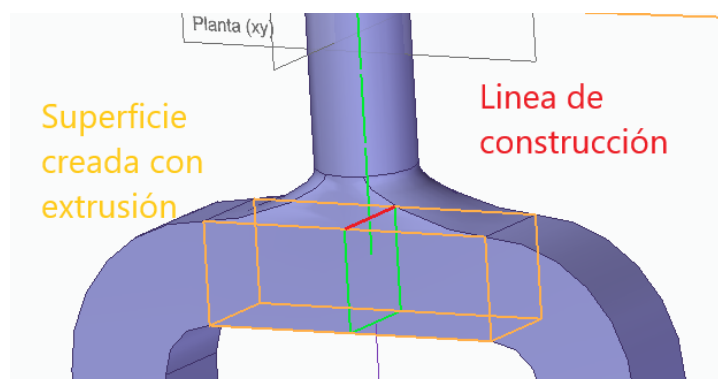


Ilustración 25. Superficie abierta de sección cuadrada

En cuanto a las patas de la horquilla el procedimiento ha sido el mismo, sin embargo, en este caso se ha usado el comando por barrido en vez de una extrusión, ya que la trayectoria que deberá seguir su sección es una curva. Aunque ya tenemos una sección cuadrada perpendicular a la trayectoria -la correspondiente a la superficie de sección cuadrada creada anteriormente-, esta sección es una sección abierta tal y como se ha explicado, por lo que no nos servirá. Por ello se ha tenido que definir de nuevo dicha sección, esta vez cerrada.

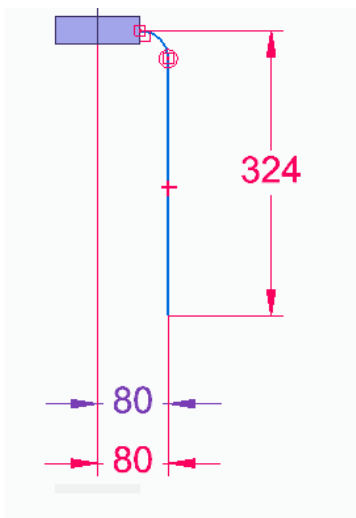


Ilustración 26. Boceto de la trayectoria

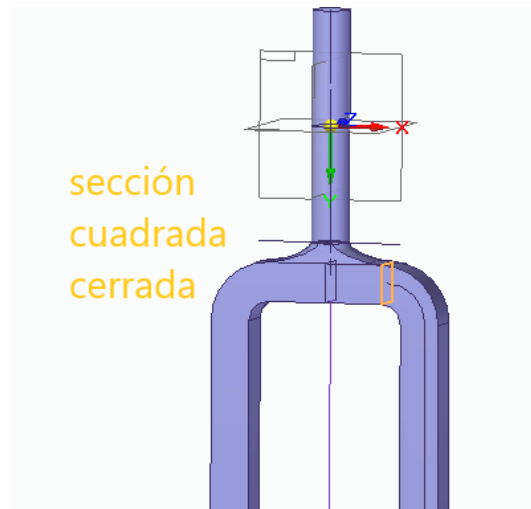


Ilustración 27. Sección cuadrada de la pata

A la hora de unir el tubo con el cuerpo de la horquilla se ha utilizado el comando BlueSurf, habiendo dividido previamente la sección circular del tubo en 4 partes simétricas.

Finalmente, el rodillo se ha creado con el comando "Revolución" a partir de un boceto, respetando las medidas que establece la norma: diámetro máximo de 50mm y curvatura de 200mm. El último paso será redondear las patas de la horquilla tal y como indica la norma por tratarse de una falsa horquilla.

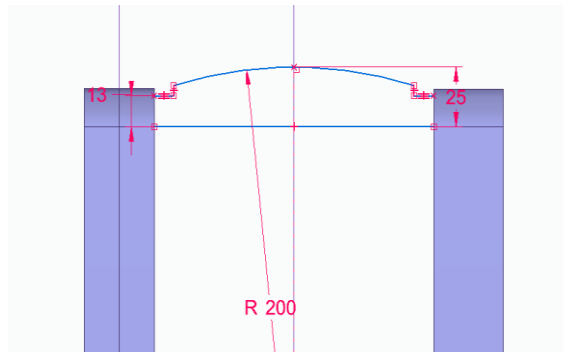


Ilustración 28. Boceto para el rodillo

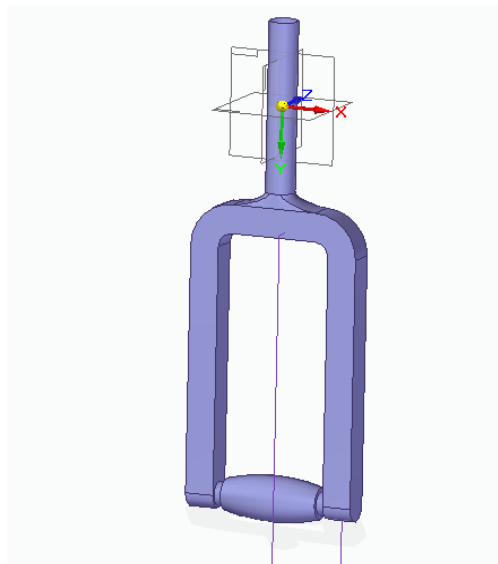


Ilustración 29. Diseño final de la horquilla

6.5.3 EL PERCUTOR

El percutor, a diferencia de los demás cuerpos, se define como un sólido. Su diseño, que será cilíndrico, es tan simple como generar en un plano cualquiera un boceto circular y extruirlo hasta la longitud que se quiera.

Recordemos que en la norma se establecen dos condiciones para el percutor, que son un peso de 22,5 kg y un diámetro de 150mm. Por lo tanto, dependiendo del material su altura será diferente. En este caso será de acero estructural. Partiendo de su densidad y las condiciones establecidas se calcula la longitud o altura extruida:

$$\rho_{\text{acero}} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{acero}} \times \text{Volumen} = 22,5 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen} = 2.87 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = \pi \times R^2 \times \text{Altura}$$

$$R = 75 \text{ mm}$$

$$\underline{\text{Altura} = 162 \text{ mm}}$$

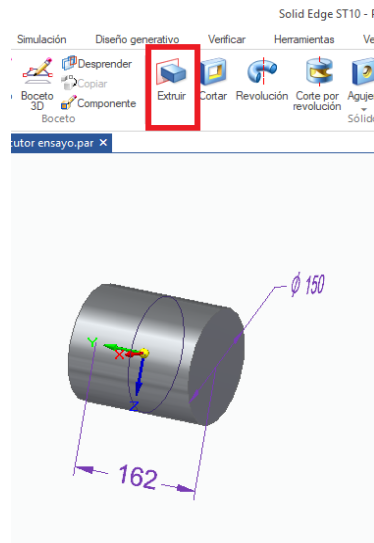


Ilustración 30. Percutor

6.5.4 CONJUNTO

Una vez diseñados todos los cuerpos que formarán el conjunto, solo queda montar el conjunto estableciendo una serie de relaciones entre ellos tal y como se muestra en las siguientes imágenes.

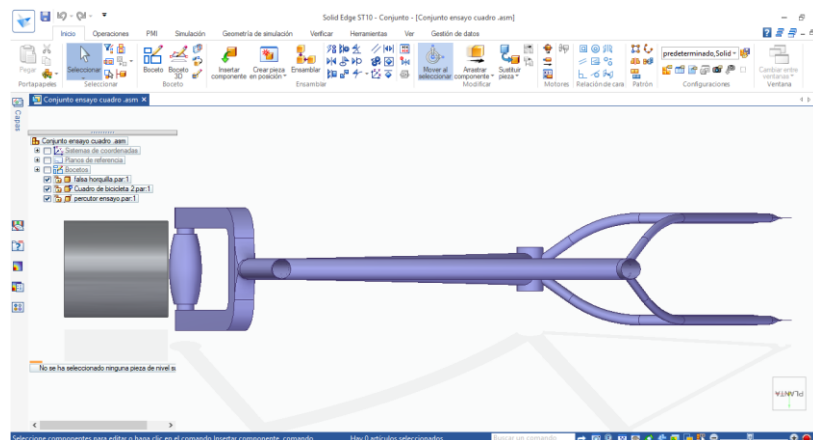


Ilustración 31. Vista de planta del conjunto

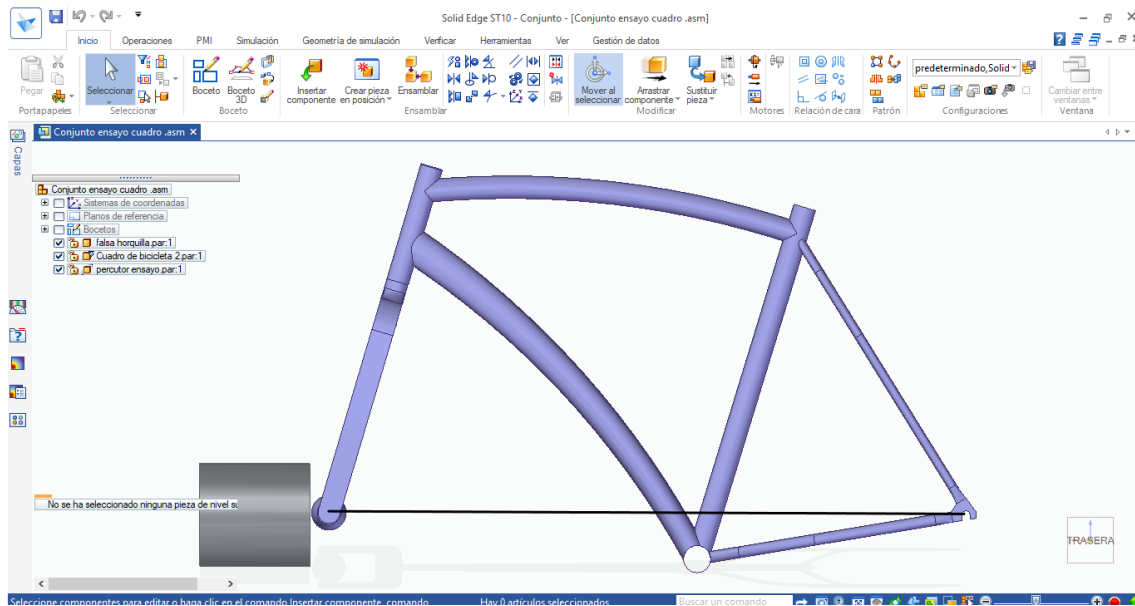


Ilustración 32. Vista de alzado del conjunto

Las relaciones que se han establecido han sido:

Cuadro

Posición fija

Horquilla

Rotación bloqueada

Alineación coaxial con el tubo de dirección

Alineación plana de la superficie lateral con el plano de simetría del cuadro

Posicionamiento del punto medio del rodillo a la altura del punto medio del enganche de atrás

Percutor

Rotación desbloqueada

Posicionamiento simétrico según el plano de simetría del cuadro

Posicionamiento a una cierta distancia del rodillo (sin que se toquen)

***NOTA:** Una condición muy importante a la hora de guiar el proceso ha sido que el eje posterior, el del rodillo y el del percutor estuviesen en la misma horizontal.

6.6 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL ENSAYO

En este apartado se explica cómo se ha preparado el modelo en el software de Elementos Finitos, ANSYS Workbench, para realizar la simulación del ensayo previamente definido y completar el análisis. La licencia de estudiante de ANSYS obliga a leer la geometría importada en un formato neutro, por lo que ha sido necesario guardar el archivo de Solid Edge que contenía la geometría en formato iges. Cabe mencionar que el propio programa divide la geometría importada en diferentes cuerpos que llama “Bodies”, lo que tendrá consecuencias de cara a obtener una única malla como se comentará más adelante.

El primer paso al abrir el programa será escoger el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo, que en este caso será el “Explicit Dynamics”. Seguidamente, se importará la geometría definida en Solid Edge. Estos dos pasos se pueden ver en las ilustraciones 10 y 11 en el punto 6.3.2.

MODELADO GEOMÉTRICO

Una vez importada la geometría la abriremos en el Design Modeler, donde podremos editar dicha geometría para que el análisis se ejecute de manera óptima. Para ello, primero se aplicará la simetría en plano xz como se puede observar en la imagen, reduciendo así el coste computacional y el tiempo del análisis.

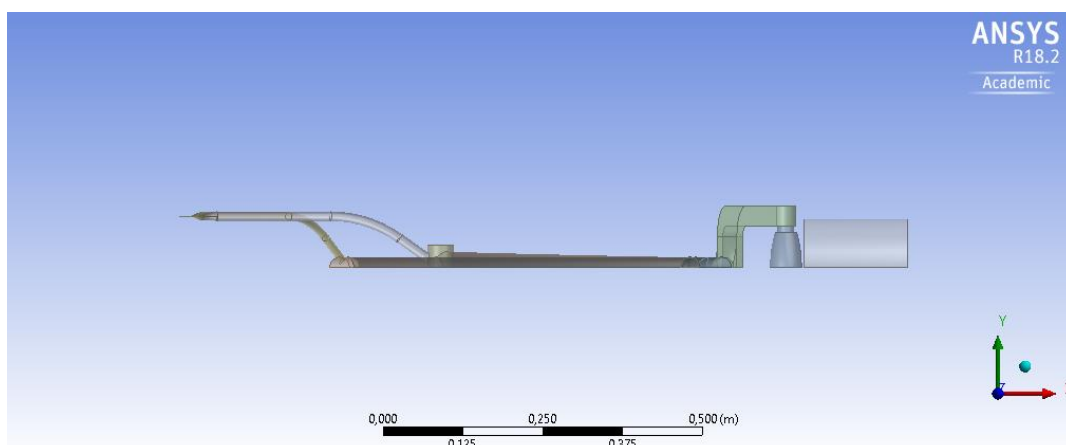


Ilustración 33. Simetría del conjunto

El siguiente comando del que se hará uso es el “Face Split”. Este comando, como su propio nombre indica, sirve para dividir una cara en fragmentos definidos por curvas que estén sobre la superficie y que delimiten su contorno. Esta operación es imprescindible para modelar las soldaduras entre los tubos con las mallas de elementos finitos. Para soldar un tubo A sobre la superficie de otro B, se recorta la forma del extremo del tubo A con la línea de intersección común, a lo largo de la cual se añade el cordón de soldadura.

Para materializar esta unión en el modelo de Elementos Finitos hay que unir las mallas de ambos tubos a través de los nudos que se encuentran en la línea de intersección. Esto requiere que ambas mallas tengan nudos en dicha intersección, lo que no es un problema para el tubo A dado que forma parte de su contorno, pero sí lo es para el tubo B. Para que la línea de intersección sea parte del contorno del tubo B ésta se divide con el comando “Face Split” empleando la línea de intersección como contorno.

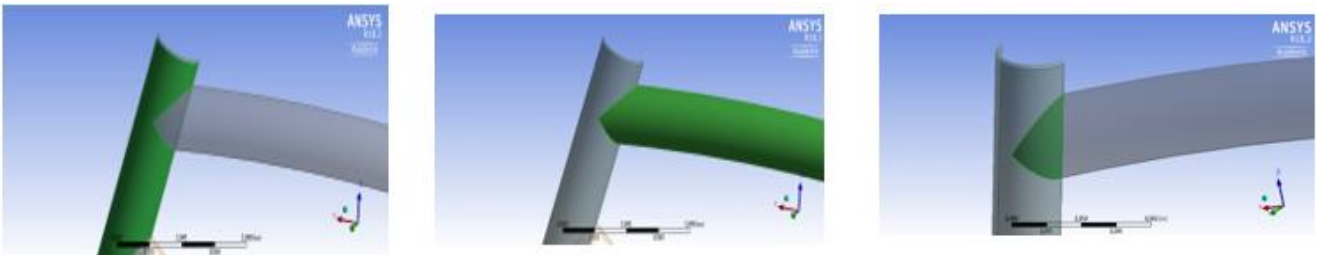


Ilustración 34. Tubo B, tubo A y superficie del tubo B delimitada por la línea de intersección

En esta operación se podría pensar que se podría eliminar la parte del tubo B que queda contenida por la línea de intersección, pero no sería lo correcto, ya que el tubo B quedaría debilitado por una rigidez menor a la que le corresponde en una zona importante desde el punto de vista resistente, que es el de las uniones entre los tubos. En la siguiente imagen podemos ver la diferencia entre eliminar dicha superficie del tubo B (intersección superior) y no eliminarla (intersección inferior). Se observa cómo al eliminar la superficie las mallas se conectan por sí solas en la intersección donde iría el cordón de soldadura, en cambio en la intersección inferior habría que conectarlas con los comandos que el programa ofrece.

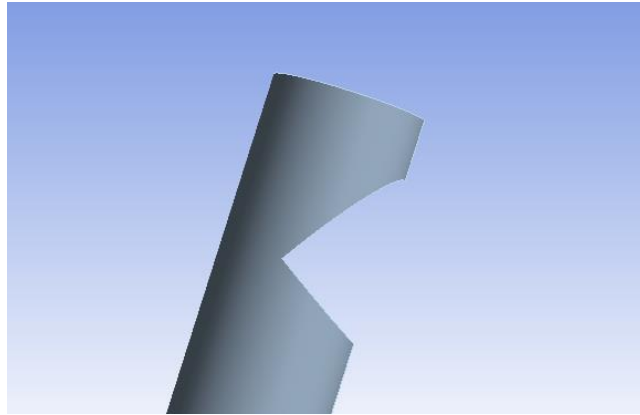


Ilustración 35. Superficie del tubo B eliminada

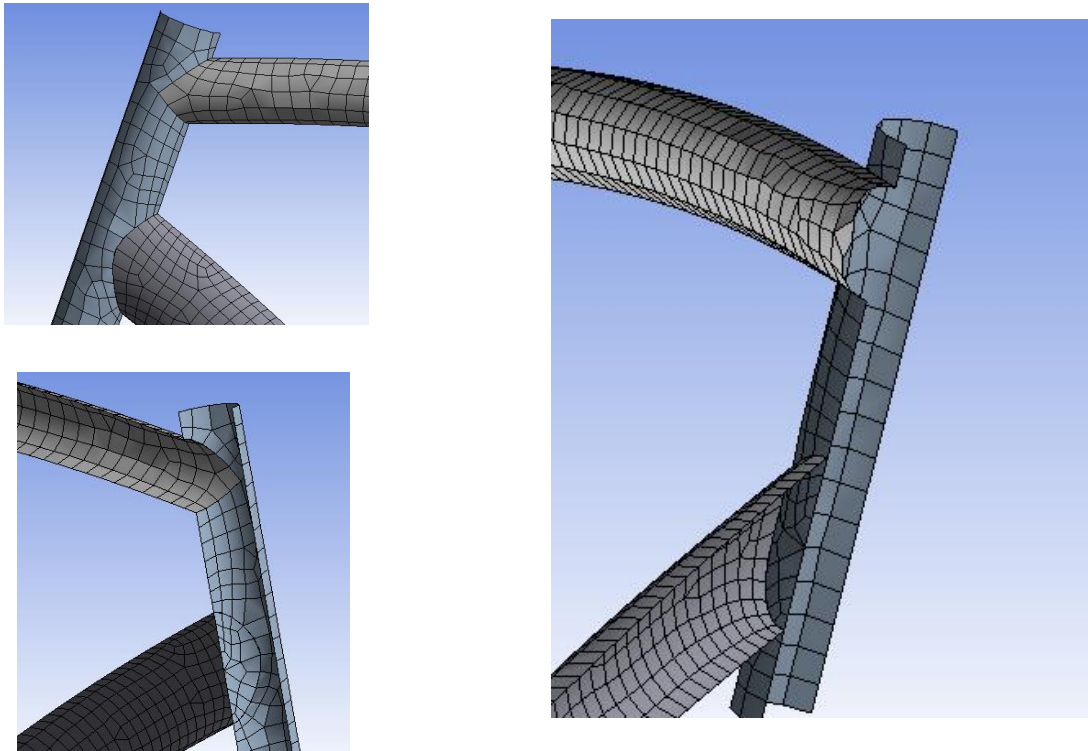


Ilustración 36. Diferencia de malla con superficie eliminada y no eliminada

En este primer paso se realizarán las divisiones en los tubos con el “Face Split” para que cada cara tenga los contornos que se necesitan durante la etapa del mallado. Las mallas de los tubos se unirán a través de los nudos generados sobre las líneas de intersección que corresponden a las uniones soldadas.

Como última operación en el Design Modeler, se modificará la superficie del rodillo para alinear una fila de elementos del rodillo en lugar de una línea de nudos con la cara del percutor, lo que mejorará los cálculos de la interacción entre el rodillo y el percutor. Para ello, se definirá sobre un plano coincidente con la cara del percutor que contactará con el rodillo, un boceto que constará de dos líneas centradas respecto del eje del rodillo (ilustración 37) ya que es ahí donde se efectuará el golpe. Una vez definido el boceto, se proyectará sobre el rodillo y con el comando "Face Split" descrito anteriormente se dividirá el rodillo en dos caras (representadas en la ilustración 38) que se mallarán de forma independiente. Las ilustraciones 39 y 40 muestran cómo afecta esta operación a la forma de la malla.

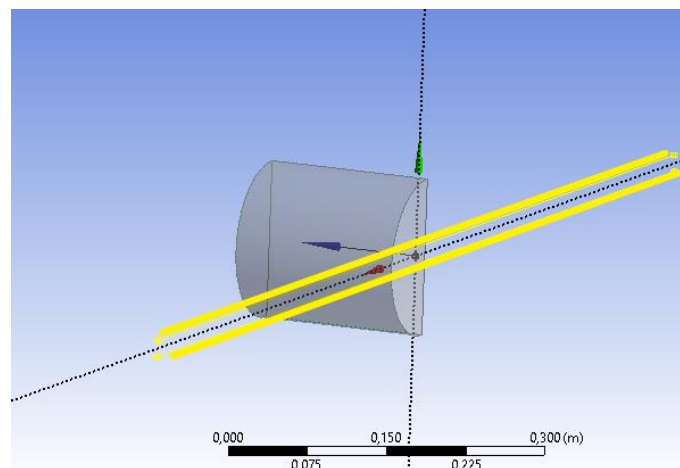


Ilustración 37. Boceto definido en el percutor

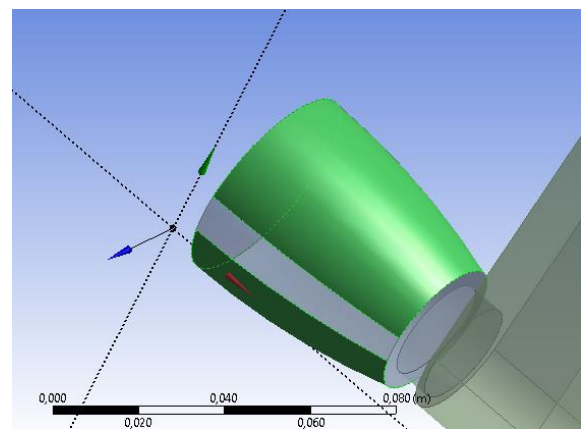
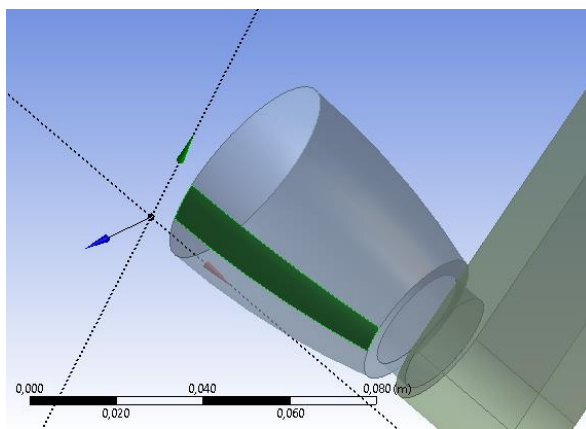


Ilustración 38. Proyección del boceto y división de superficie

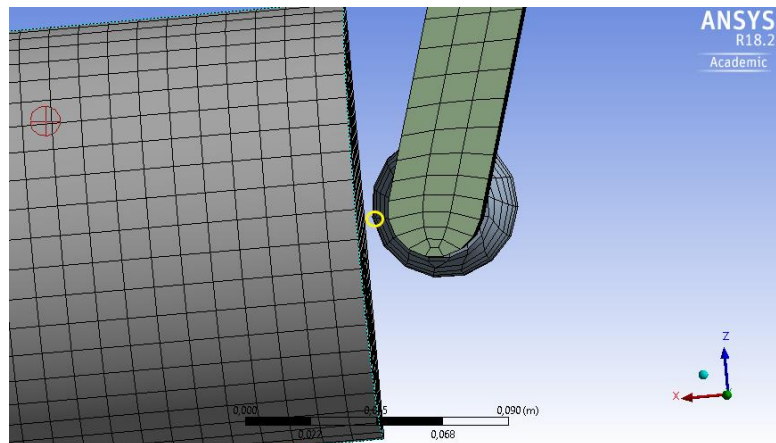


Ilustración 39. Contacto en un nodo

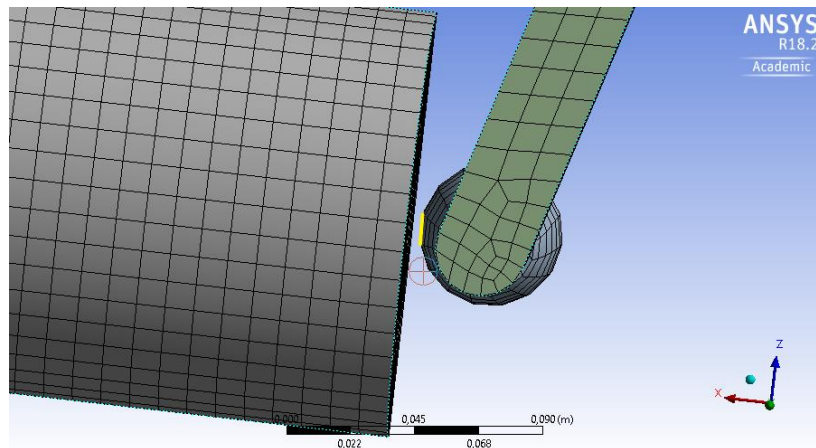


Ilustración 40. Contacto en una cara

PUESTA A PUNTO DEL ANÁLISIS

Una vez preparada la geometría, se termina de preparar el modelo de Elementos Finitos en el módulo “Mechanical”. Lo primero que se hará será definir el material y el espesor de cada uno de los elementos. En el caso del cuadro y de la horquilla con el rodillo se ha escogido al acero Cromoly o acero 4130. En la biblioteca de ANSYS este material no está disponible, por lo que se ha hecho uso de otro acero con propiedades mecánicas muy parecidas, que es el acero 4340. Los espesores escogidos para los tubos se han ido ajustando en función de los resultados que se obtuvieron en los primeros análisis realizados. En un principio todos los tubos del cuadro eran del mismo espesor, pero ha sido necesario reforzar algunas zonas que sufrían mayores tensiones.

Es necesario también definir qué tipo de relación habrá entre los distintos cuerpos a lo largo de la simulación. Esto se hará mediante el “Body interaction”, que sirve para tener en cuenta la interacción física entre los cuerpos independientes.

A continuación, se dividirá el resto del apartado en dos secciones. Por un lado, se describirá el proceso de mallado y los problemas que ha supuesto y por el otro se mencionarán los parámetros del análisis que se han establecido.

1. Generación de la malla

Los elementos con el que se va a mallar el modelo son elementos tipo cáscara. Se mallará con elementos cáscara de 4 nudos, ya que el módulo de “Explicit dynamics” utiliza elementos preferentemente de 4 nudos por rapidez de cálculo. Se han mallado algunas zonas como el pedalier y los tubos inferior y superior con el comando Method y la opción Multizone, mallando preferentemente con elementos cuadriláteros, aunque en algunas zonas ha sido inevitable que se creasen elementos triangulares.

Para obtener una malla adecuada ha sido necesario ajustar los parámetros de mallado en varias zonas, ya que la malla que creaba automáticamente ANSYS no era de muy buena calidad.

Los principales problemas tratados han sido:

- Corrección de los errores generados en los conoides entre las vainas posteriores y la cara del enganche con la rueda trasera.
- Unión entre las mallas independientes que ANSYS generaba.
- Unión entre la malla de la horquilla y el cuadro.

La zona más conflictiva ha sido la del enganche trasero, es decir, la zona donde las dos vainas se juntan con la placa de enganche con la rueda trasera. El problema parece surgir del hecho de que las mallas de cada uno de estos elementos son independientes y al unir los nodos del contorno que comparten, en una zona donde la geometría pasa de la superficie tubular de las vainas a una cara plana (el gancho) a través del conoide, ANSYS generaba unos elementos invisibles (ver la ilustración 41). A pesar de que pareciese que esos elementos no los generaban, al pinchar sobre ellos sí que se seleccionaban, lo que hacía que fuese todavía más extraño. El efecto parecía estar relacionado con la orientación de los vectores normales de esos elementos, lo que afectaba a su visualización por ANSYS. Pero la definición de

las normales de los elementos es importante para el algoritmo de cálculo, por lo que era necesario corregir ese defecto.

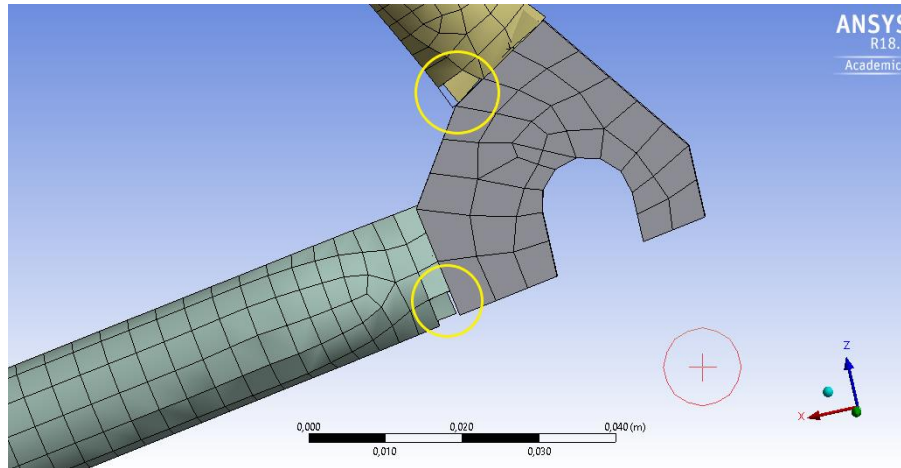


Ilustración 41. Malla de mala calidad

Para ello ha sido necesario retocar la malla unas cuantas veces. Se han utilizado los comandos de “Face meshing” y “Body sizing” para cambiar el tamaño de los elementos en las vainas, así como “Edge sizing” para definir el número de elementos en las aristas que las vainas comparten con la cara plana del enganche. Este último comando ha facilitado la conexión de las mallas en las intersecciones de los tubos. A lo largo de las curvas de intersección entre los tubos, ANSYS se encuentra con 3 caras a mallar, lo que hace que genere una malla independiente para cada tubo. La solución pasa por controlar las mallas- por ejemplo, con el comando “Edge sizing” que se acaba de mencionar- para conseguir la proximidad de los nudos de los elementos colindantes que están sobre la línea de intersección y seguidamente unir las mallas colapsando los nudos diferentes. Para dicha conexión se han utilizado los comandos de “Node merge” y “Mesh connection”. Ambos comandos tienen la misma función de unir las mallas en las intersecciones, pero su uso resulta más adecuado según las características de la zona en que se aplica. El orden en el que se han realizado las operaciones también ha tenido mucho que ver a la hora de corregir los elementos invisibles que se han mencionado, haciendo el trabajo más costoso.

Con relación a las interacciones entre cuerpos que se han mencionado justo antes de la sección “Generación de malla”, entre el percutor y el rodillo, donde ocurrirá el impacto, se ha definido un “Body interaction” del tipo “Frictionless”. En cuanto a la relación que se ha establecido entre la horquilla y el tubo de dirección ha sido algo más conflictiva. Estos dos cuerpos están definidos en Bodies diferentes, cada uno con su malla independiente, pero al igual que en la práctica el tubo de la horquilla irá unido al tubo de dirección. En un inicio se conectaron dichos tubos mediante una relación de contacto de tipo “Bonded”, pero en los resultados de los análisis se observó que no funcionaba, ya que el tubo de la horquilla deslizaba a lo largo del tubo de dirección (ver la ilustración 42).

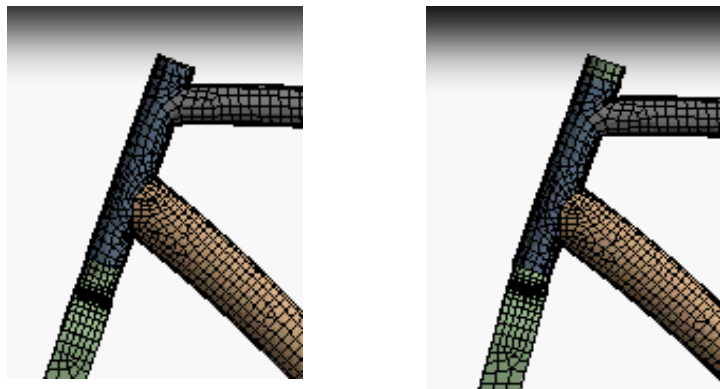


Ilustración 42. Movimiento relativo entre horquilla y tubo de dirección

Para solucionar este problema ha sido necesario juntar las mallas de ambas superficies por la arista inferior del tubo del manillar. Para ello se ha proyectado dicha arista en el tubo de la horquilla y después de hacer un “Edge sizing” en ambas aristas se han conectado las mallas con el comando “Manual mesh connection”. Cabe señalar que esta solución empleada se aleja un poco de la realidad, ya que se les ha restringido todos los grados de libertad a los elementos cáscara en la horquilla, tanto de desplazamientos como de giros, no siendo del todo correcto, aunque sí aceptable para las condiciones de este ensayo.

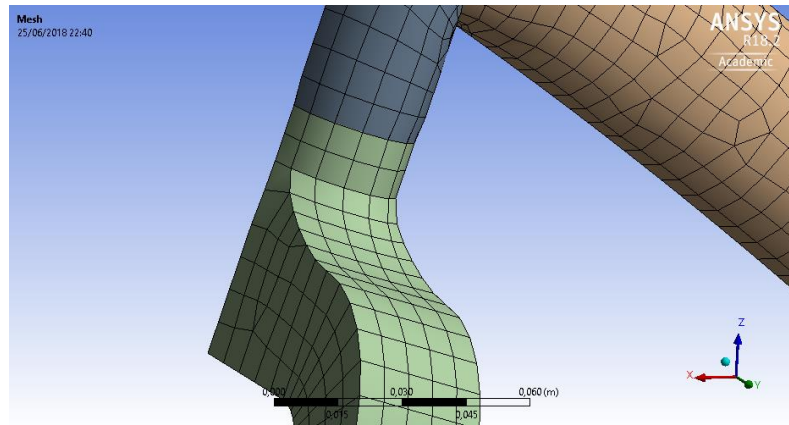


Ilustración 43. Conexión de malla de la horquilla y cuadro

2. Parámetros del análisis

Las características del análisis requieren introducir las siguientes condiciones. La condición inicial será una caída de 180 mm para el percutor de acuerdo con lo que indica la norma. Siguiendo el mismo esquema de amarre definido en la norma de ensayo se ha empotrado el enganche de atrás con la opción de “Fixed support” y se le ha restringido al percutor el movimiento en cualquier otra dirección que no sea la de caída, ya que en el ensayo real irá dirigido por unas guías. Se introdujo una opción para que ANSYS tuviera en cuenta los efectos de la gravedad.

Para terminar, era preciso definir en la sección “Analysis settings” el tiempo de simulación que se quería analizar y los controles que regulan el proceso de cálculo. Para ello se tuvieron en cuenta las características físicas del ensayo real, observándose en varios vídeos del ensayo que el percutor rebota varias veces después de golpear sobre el rodillo de la horquilla. Lo ideal hubiese sido alargar el análisis hasta que el percutor llegase a pararse después de todos los rebotes, pero ese análisis requería un tiempo muy grande de procesado, teniendo en cuenta los limitados recursos de los que se disponía. Por eso el tiempo escogido para la simulación fue de 5 centésimas de segundo, suficiente para analizar el primer rebote del percutor, hasta el instante en que éste pierde el contacto con el rodillo que, liberado de su peso, adopta la posición que corresponde a la deformación residual del cuadro.

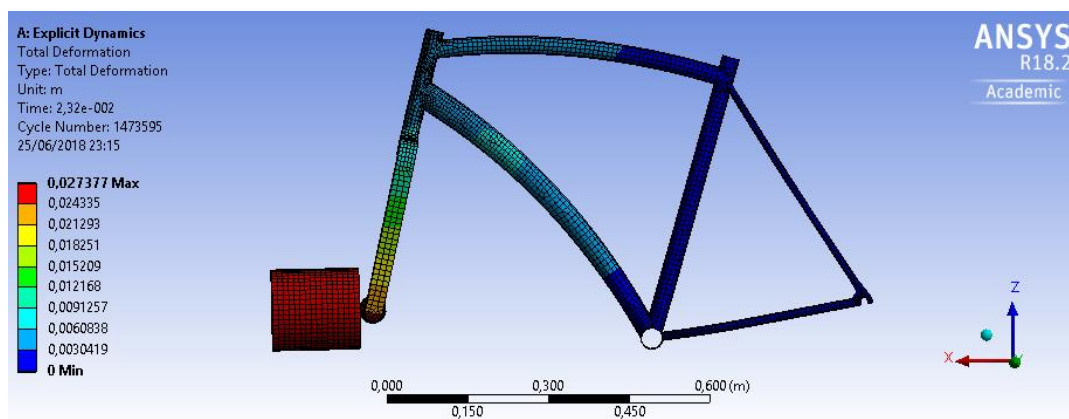
Una vez listo el modelo, se espera a que el programa lo resuelva, siendo en este caso el tiempo estimado de 14 horas aproximadamente. En el siguiente apartado se estudiarán e interpretarán los resultados obtenidos.

6.7 INTERPRETACIÓN DEL RESULTADO

Lo primero que se observa en la simulación del ensayo es que el tiempo representado ha sido suficiente para ver el primer rebote del percutor y la pérdida de contacto de éste con el rodillo, que como ya se ha dicho antes ha sido desde un principio el objetivo.

Lo primero que analizaremos serán las deformaciones. En las siguientes imágenes se observa una deformación total máxima de aproximadamente 2,7 cm, dándose esta máxima en el rodillo, como cabía esperar. En el gráfico se puede observar que el valor máximo se alcanza sobre las dos centésimas de segundo. Es interesante comentar también las vibraciones que se observan al final de la gráfica, que son las vibraciones que pertenecen a la horquilla y el rodillo una vez perdido el contacto con el percutor.

El modo en que vibra la horquilla depende del amortiguamiento del sistema. Este amortiguamiento afecta a la forma en que el rodillo chocará con el percutor en los rebotes sucesivos. Aunque las no linealidades del material introducen un factor de amortiguamiento, a veces no es suficiente para simular correctamente el comportamiento de algunos sistemas, por lo que ANSYS dispone de varios parámetros de amortiguamiento que hubiese sido interesante estudiar con más profundidad. Pero teniendo en cuenta que ajustar estos parámetros requería disponer de resultados experimentales y que su efecto sólo influye sobre los rebotes sucesivos, se descartó esta posibilidad.



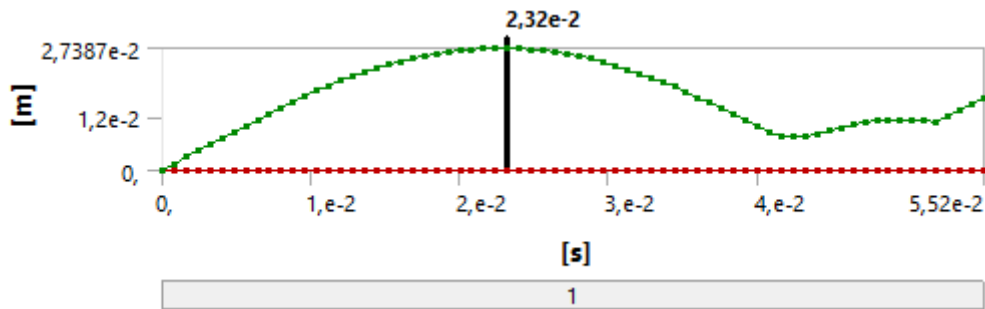


Ilustración 44. Deformación total

En cuanto a la deformación permanente del rodillo en la dirección del choque, que es la que realmente hay que controlar en este ensayo, esta entre 12,1 y 9,1mm. Siendo 15mm la deformación máxima que establece la norma, se concluye que dicha deformación respeta el límite, por lo que sería válido.

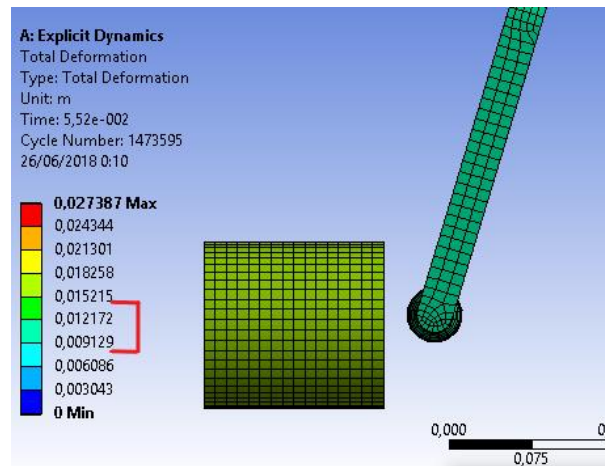


Ilustración 45. Deformación permanente de la horquilla

En cuanto a las tensiones equivalentes de Von-Mises, el valor máximo se da alrededor de la segunda centésima de segundo y su valor es de 897 MPa, siendo esta tensión mayor que 792 MPa, la tensión de fluencia del acero 4340. Al superar el límite elástico del material, las zonas que alcancen dicha tensión sufrirán una pequeña plastificación, pero a diferencia de los materiales frágiles, cuando se trata de un material dúctil la plastificación no siempre supone su eliminación, siempre y cuando dicha plastificación sea localizada.

En este caso, como se verá en las siguientes imágenes, al ser las zonas de alta tensión localizadas será una deformación aceptable, además siendo el tiempo durante el que sufre dicha tensión menor que una centésima de segundo. La zona que más sufre es la unión de la horquilla con el tubo del manillar, ya que es ahí a donde transmite la horquilla gran parte del esfuerzo debido al impacto. La tensión se transmitirá por todo el cuadro hasta llegar al enganche fijado de atrás.

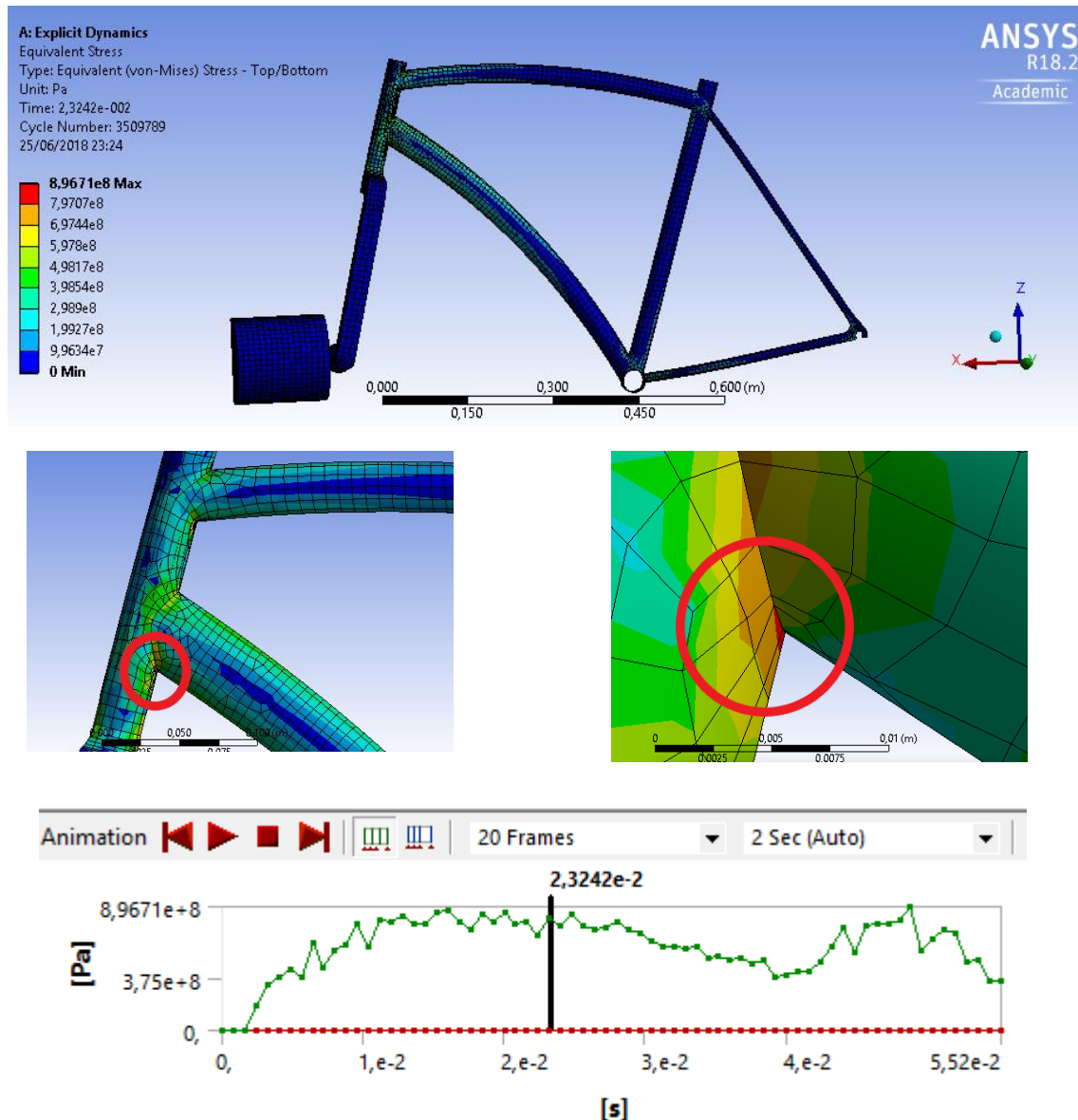


Ilustración 46. Tensiones equivalentes de Von-Mises

Finalmente, analizando la gráfica de velocidad del percutor, se observa cómo a causa del rebote vuelve en la dirección contraria casi con la misma velocidad con la que cae, lo que puede resultar algo exagerado, aunque en los videos del ensayo se ha observado que el rebote es considerable. Al final de dicho gráfico se ve que empieza a descender la velocidad por la acción de la gravedad hasta volver a caer y rebotar de nuevo contra el rodillo. Se recuerda que lo ideal sería representar todos estos rebotes hasta que el percutor alcanzase velocidad nula para representar todo el ensayo, suponiendo mucho tiempo para el cálculo.

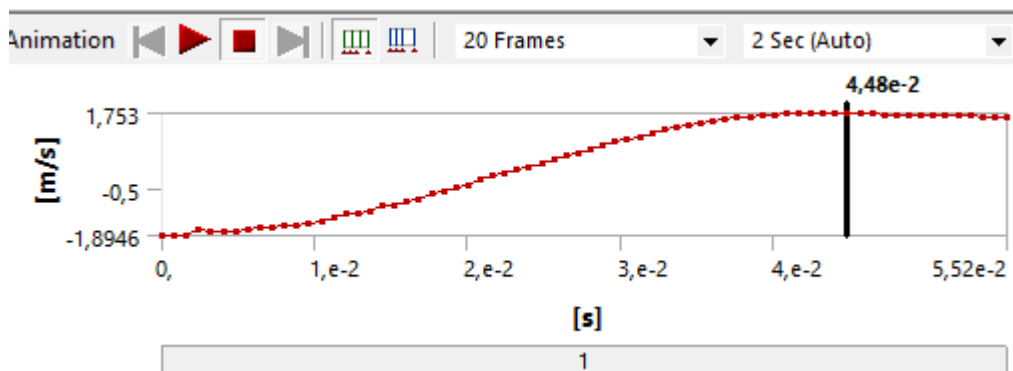


Ilustración 47. Velocidad del percutor

7 DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA GANTT

En este apartado se muestran las diferentes etapas por las que ha pasado el proyecto desde el principio hasta el fin y la planificación que se ha seguido para completarlo. Se facilita también el diagrama de Gantt donde se podrán observar los diferentes bloques de trabajo y la duración de cada uno, así como el camino crítico indicado con triángulos rojos y relleno de las tareas a rayas.

El proyecto comienza el 1 de noviembre de 2017 y se da por finalizado el 27 de junio de 2018, siendo el 28 de junio la fecha límite para la entrega de éste. De los 239 días del desarrollo del proyecto, no todos los días se ha trabajado en él, siendo en la época de exámenes cuando menos tiempo de le ha dedicado. Los fines de semana (sábado y domingo) tampoco se han contado como días de trabajo.

Se describen a continuación las operaciones que se han realizado:

Tarea 1: Estudio del proyecto

Se presenta el proyecto por parte del tutor al alumno/a encargado/a de desarrollarlo. Consta de dos subtareas que son el análisis de alternativas (2 días) y el estudio de las prestaciones (15 días).

Duración: 17 días

Hito: Estudio completado

Tarea 2: Diseño del conjunto

Para la realización del diseño ha sido necesario buscar información básica sobre las bicicletas como pueden ser las medidas estándares, materiales más empleados, procesos de fabricación... (7 días). Una vez reunida la información se diseña solamente el cuadro (15 días) y se llevan a cabo varias pruebas en ANSYS (5 días). Al mismo tiempo que se hacen las pruebas se leerá la norma de ensayos (1 día) y se completará el diseño del cuadro con la horquilla y el percutor (5 días).

Duración: 33 días

Hito: Diseño completado

Tarea 3: Análisis por Elementos Finitos

Esta tarea ha sido a la que más tiempo se le ha dedicado. Se ha comenzado por aplicar todos los parámetros necesarios para el análisis como el tipo de mallado, materiales, comportamiento del material, espesores... (20 días).

Una vez preparado el modelo para realizar el análisis se han llevado a cabo varias pruebas hasta topar con la mejor solución (37 días). Esta subtarea ha sido la más costosa ya que cada análisis suponía varias horas de espera. Una vez dado el visto bueno al modelo se dará por válido (1 día).

Duración: 58 días

Hito: Análisis completado

Tarea 4: Interpretación del resultado

Esta tarea está relacionada con la validación del modelo de la anterior tarea. Cuando se valida el modelo, se revisarán todos los pasos seguidos en el análisis para reunir toda la información y poder interpretar el resultado obtenido.

Duración: 1 día

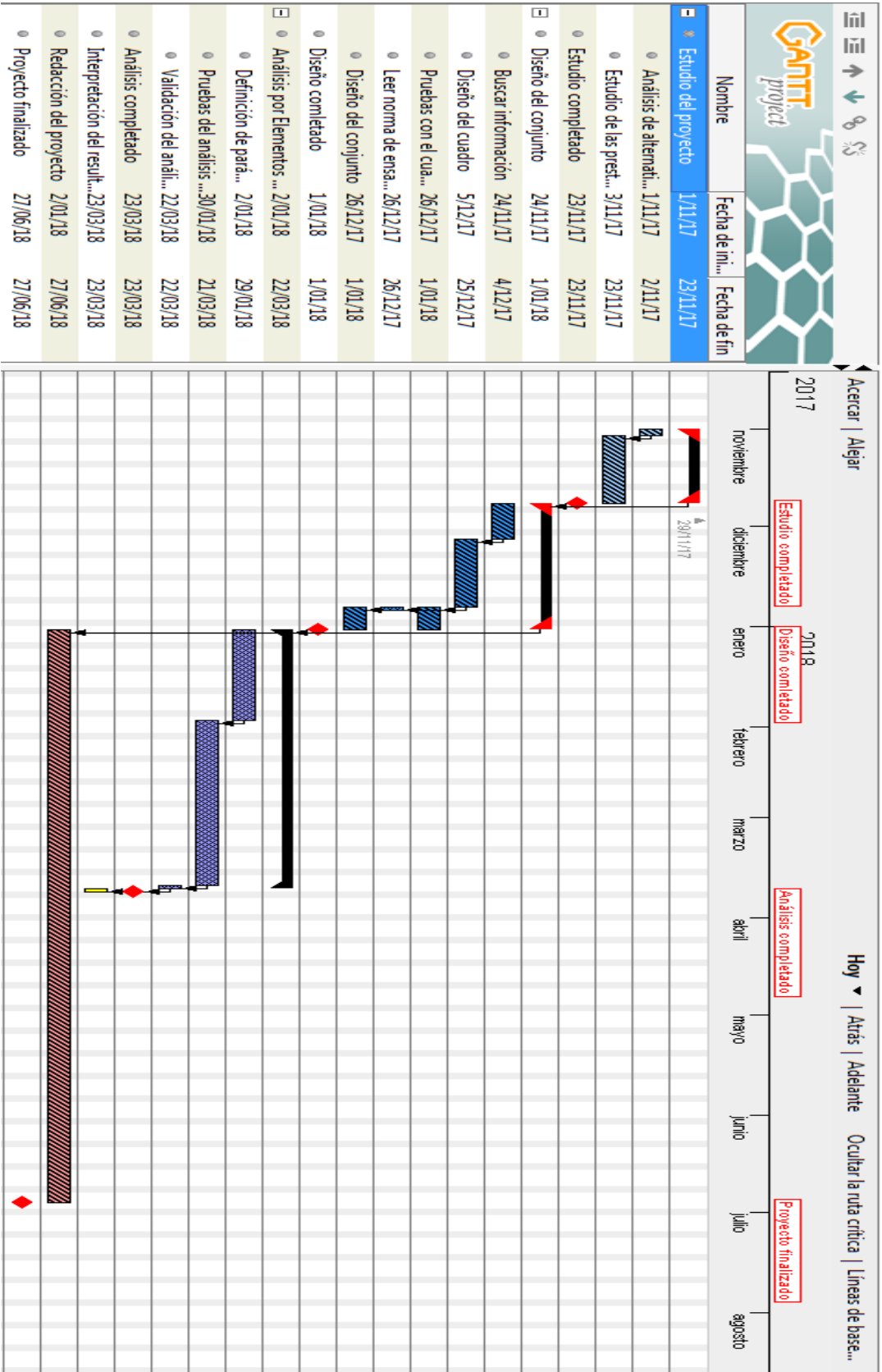
Tarea 5: Redacción del proyecto

Se comenzará con la redacción del Trabajo de Fin de Grado a la vez que la tarea 3, redactando los puntos que no estén relacionados directamente con dicha tarea.

Duración: 138 días *

Hito: Proyecto finalizado

*NOTA: Los 138 días son los días transcurridos desde que se empieza la redacción hasta que queda completada, pero no todos los días se ha trabajado en la redacción.



8 PRESUPUESTO

8.1 HORAS INTERNAS

En este apartado se han tenido en cuenta únicamente las horas correspondientes al ingeniero superior encargado de la realización del proyecto.

Tabla 5. Horas internas

HORAS INTERNAS			
CONCEPTO	HORAS	€/HORA	COSTE
Ingeniero superior	130	30	3.900 €
TOTAL			3.900 €

8.2 AMORTIZACIONES

Se tienen en cuenta todas las herramientas necesarias como licencias y ordenadores. El IVA no está aplicado a los precios que se muestran, ya que se tendrá en cuenta en el presupuesto detallado.

Tabla 6. Amortizaciones

AMORTIZACIONES				
CONCEPTO	COSTE INICIAL	VIDA ÚTIL	USO	COSTE
Licencia Solid Edge	1.220 €	1 años	30 horas	4,18 €
Licencia Ansys Workbench	26.400 €	1 años	160 horas	482,19 €
Licencia Project	200 €	1600 horas	3 horas	0,38 €
Ofice Hogar y estudiantes	149 €	1 años	50 horas	0,85 €
Ordenador	800 €	4 años	240 horas	5,48 €
			TOTAL	493,07 €

8.3 PRESUPUESTO DETALLADO

Para el presupuesto detallado se han tenido en cuenta unos imprevistos del 5% y el IVA del 21%. Como se puede observar, la mayor parte del presupuesto total va destinado a las horas internas realizadas por el ingeniero superior.

Tabla 7. Presupuesto detallado

PRESUPUESTO DETALLADO	
CONCEPTO	COSTE
Horas internas	3.900,00 €
Amortizaciones	493,07 €
Subtotal1	4.393,07 €
Imprevistos (5%)	219,65 €
Subtotal2	4.612,73 €
IVA (21%)	968,67 €
PRESUPUESTO TOTAL	5.581,40 €

9 CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha visto cómo se ha realizado la simulación del **Ensayo de choque (caída de una masa)** definida en la norma **española UNE-EN ISO 4210-6**. Para ello se han estudiado las condiciones y herramientas necesarias para modelar la geometría de un cuadro de bicicleta, con el que a continuación simular un ensayo de caída libre de un percutor utilizando la aplicación de análisis por Elementos Finitos ANSYS.

En lo referente al modelo geométrico del cuadro, se diseñó un cuadro de bicicleta basado en un cuadro estándar de talla M que introduce algunas variaciones de tipo estético que afectan a la forma del cuadro según los parámetros que se muestran en la ilustración 15, siendo los de la tabla 4 los valores para las distintas tallas. El objetivo del proyecto consistía en simular el ensayo citado para comprobar si el cuadro se ajusta a la norma.

A lo largo del desarrollo del proyecto han surgido diversas complicaciones, fundamentalmente relacionadas con las dificultades que entraña generar un modelo de Elementos Finitos que reflejase adecuadamente las características del sistema que se quiere simular, como a la hora de simular el ensayo empleando un método de dinámica explícita con las dificultades que este procedimiento entraña, tanto desde el punto de vista del tiempo de procesado como desde el punto de vista de la convergencia del análisis.

Teniendo en cuenta esta limitación, se empezó por restringir el objetivo de la simulación, limitándola al tiempo correspondiente al primer golpe y rebote del percutor sobre la bicicleta, cuando lo correcto hubiese sido extenderla el tiempo suficiente como para que el percutor se detuviese sobre el cuadro y apartarlo para medir la deformación residual.

Como el modelo de elementos finitos utilizaría elementos cáscara, la geometría tenía que definirse con un modelo de superficies. Las tareas de mallado con ANSYS han demostrado las dificultades que plantea un modelo de superficies para representar algunas complejidades de su geometría, como las uniones soldadas entre los tubos sin que el modelo perdiera su rigidez y obteniendo una malla única para el cuadro y las zonas de unión entre las vainas traseras y la placa de enganche de la rueda posterior.

Otra de las dificultades que surgieron fue la necesidad de utilizar la dinámica explícita para simular adecuadamente un ensayo en el que se producen impactos. Se trata de análisis que requieren mucho tiempo de cálculo, sobre todo para una malla compleja como la que se planteó para el cuadro de

bicicleta. Este condicionante dificultaba el ajuste de los parámetros del análisis, dado que el efecto de cada modificación no se puede comprobar hasta terminar el nuevo análisis. Esto repercutió en la duración escogida para la simulación (el tiempo suficiente para analizar el primer choque del percutor) así como la posibilidad de abordar otros estudios como el efecto de los parámetros de amortiguamiento en la convergencia y resultados del análisis, lo que puede ser una línea de estudio a desarrollar en posteriores trabajos fin de grado.

El estudio crítico de los resultados ha demostrado que la deformación permanente tras el primer golpe del percutor se mantenía por debajo de los límites que impone la norma *Ensayo de choque (caída de una masa)*. Esta prueba no es suficiente para dar el diseño por válido, aunque hace suponer que puede ser así. También se ha comprobado que la velocidad del percutor tras rebotar no decrece tanto como se aprecia en los vídeos sobre el ensayo, lo que tal vez se hubiese podido paliar con un mejor ajuste de los parámetros de amortiguamiento, aunque el coste de los análisis y la falta de resultados experimentales impedían abordar este estudio.

Por último, también se ha podido observar la complejidad del análisis mediante ANSYS Workbench, sobre todo con modelos de superficie en un análisis de Dinámica Explícita, debido a la multitud de parámetros que se deben de conocer y tener en cuenta, siendo la respuesta del programa no siempre la esperada ante estos parámetros. Un análisis así exige mucho tiempo de dedicación y mucha experiencia en el diseño de elementos mecánicos, así como un conocimiento profundo del Método de Elementos Finitos. Aunque esta complejidad haya sido un obstáculo a la hora de realizar el análisis, ha permitido dotar al ingeniero encargado de este proyecto con un mayor conocimiento en el ámbito del modelado geométrico y del funcionamiento del método de los Elementos Finitos.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] MTBPRO. “Geometría de la bici: medidas, ángulos y lo que significan”.
<https://www.mtbpro.es/afondo/geometria-de-la-bici-de-mtb-medidas-angulos-y-lo-que-significan>
- [2] No sin mi bici. “Medidas y estándares de la bicicleta” (2014)
<https://nosinmibici.com/2014/02/18/medidas-y-estandares-de-la-bicicleta/>
- [3] El blog de Tuvalum. “La guía definitiva de cuadros de bicicleta; ¿qué material es mejor?” (2017)
<https://tuvalum.com/blog/guia-materiales-cuadros-bicicleta/>
- [4] NeoNickel. “4340 Alloy Steel”
<https://www.neonickel.com/es/alloys/alloy-steels/4340-alloy-steel/>
- [5] Antonio. “Qué es el acero 4130” (2010)
<http://954bmx.blogspot.com/2010/04/que-es-el-acero-4130.html>
- [6] New Horizons Bikes. Chairman Bill. “Bike frame & fork materials, a discussion”
<https://newhorizonsbikes.com/articles/bike-frame-fork-materials-a-discussion-pg169.htm>
- [7] Centro de formación SAE. “¿Qué es Solid Edge?”
<http://www.academiasae.com/paginas/empresas/disenio/industrial-que-es-solid-edge.html>
- [8] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Apuntes de clase de Cálculo de Máquinas (2017-2018)
- [9] Brujulabike, Ignacio p. “El primer cuadro de grafeno pesa solo 350 gramos y es 100 veces más resistente que el acero” (2016)
<https://www.brujulabike.com/primer-cuadro-grafeno-bici/>
- [10] Bici Home. “La historia de la bicicleta”
<https://bicihome.com/la-historia-de-las-bicicleta/>
- [11] “Analysis settings for Explicit Dynamic Analyses”
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/exd_ag/ds_explicit_dyn_settings.html

11 ANEXOS

Se muestra en la siguiente imagen las distintas partes que componen una bicicleta, siendo el cuadro el elemento central de este proyecto.



Ilustración 48. Componentes de una bicicleta



Ilustración 49. Ejemplo de montaje del ensayo