



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA HORQUILLA DELANTERA DE UNA BICICLETA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Alumno: Sergio Herrera Maza

Tutor: Prof. D. José Manuel Vasco Olmo
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2017



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don JOSÉ MANUEL VASCO OLMO, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA HORQUILLA DELANTERA DE UNA BICICLETA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS, que presenta SERGIO HERRERA MAZA, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO de 2017

El alumno:

SERGIO HERRERA MAZA

Los tutores:

JOSÉ MANUEL VASCO OLMO

Agradecimientos:

A mi tutor, D. José Manuel Vasco Olmo por toda la ayuda prestada para hacer posible este TFG.

A mi familia, por todo su apoyo en los momentos más difíciles.

A mis compañeros de piso, por hacer de estos años los mejores de mi vida.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objeto del TFG.....	8
1.2. Normativa vigente	8
1.2.1. Ensayo estático de flexión.....	9
1.2.1.1. Requisitos	9
1.2.1.2. Método de ensayo.....	9
1.2.2. Ensayo de choque hacia atrás	10
1.2.2.1. Requisitos	10
1.2.2.2. Método de ensayo.....	11
1.2.3. Ensayo de fatiga de flexión	12
1.2.3.1. Requisitos	12
1.2.3.2. Método de ensayo.....	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Motivación	14
3. MODELADO.....	15
3.1. Horquilla.....	15
3.2. Percutor	20
3.3. Eje o rodillo	23
4. PRE-PROCESADO Y PROCESADO	27
4.1. Análisis estático de flexión	30
4.1.1. Análisis con cargas puntuales.....	30
4.1.2. Análisis con carga de presión.....	39
4.2. Análisis dinámico de impacto	43
4.3. Análisis a fatiga	63
5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	74
5.1. Análisis estático de flexión	74
5.2. Análisis dinámico de impacto	93
5.3. Análisis de fatiga	102
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	109
7. BIBLIOGRAFÍA	110

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Montaje del ensayo de flexión	10
Ilustración 2. Montaje del ensayo de choque hacia atrás.....	11
Ilustración 3. Rodillo de pequeña masa (1 kg máximo).....	12
Ilustración 4. Montaje del ensayo de fatiga de flexión.....	13
Ilustración 5. Dimensiones y detalles de la horquilla.....	15
Ilustración 6. Tubo de dirección.....	16
Ilustración 7. Tramo de sección constante.....	17
Ilustración 8. Tramo de sección variable	18
Ilustración 9. Cogida.....	18
Ilustración 10. Horquilla completa.....	19
Ilustración 11. Percutor.....	21
Ilustración 12. Geometría del percutor.....	22
Ilustración 13. Relación entre la densidad y la altura del percutor	23
Ilustración 14. Relación entre la densidad y semiancho del rodillo	26
Ilustración 15. Eje o rodillo	26
Ilustración 16. Discretización de un sistema continuo.....	29
Ilustración 17. Aplicación de cargas puntuales	34
Ilustración 18. Condiciones de contorno en el empotramiento.....	34
Ilustración 19. Malla de la horquilla	36
Ilustración 20. Elemento tetraédrico	37
Ilustración 21. Errores y advertencias en la malla de la horquilla circular	38
Ilustración 22. Porcentaje de errores y advertencias de la malla de la horquilla circular	38
Ilustración 23. Errores y advertencias de la malla en la horquilla elíptica	39
Ilustración 24. Porcentaje de errores y advertencias de la malla de la horquilla elíptica	39
Ilustración 25. Aplicación de la carga uniformemente sobre la superficie	40
Ilustración 26. Superficie sobre la que se aplica la carga	40
Ilustración 27. Definición de un reference point (Punto de Referencia).....	45
Ilustración 28. Definición de la inercia en el percutor.....	46
Ilustración 29. Montaje definitivo	46
Ilustración 30. Restricciones en el ensamblaje	48
Ilustración 31. Restricción coaxial entre rodillo y horquilla	49
Ilustración 32. Mass Scaling	50
Ilustración 33. Propiedades de contacto percutor-rodillo	52
Ilustración 34. Comportamiento en la dirección normal del choque	53
Ilustración 35. Comportamiento en la dirección tangencial del choque.....	53
Ilustración 36. Interacción entre rodillo y percutor.....	54
Ilustración 37. Inicialización de las propiedades de la interacción	55
Ilustración 38. Restricción de interacción entre rodillo y horquilla	56
Ilustración 39. Definición de percutor y rodillo como rígidos	56
Ilustración 40. Condiciones de contorno del modelo.....	57
Ilustración 41. Creación de las condiciones de contorno	58
Ilustración 42. Restricción de giro del rodillo.....	59
Ilustración 43. Creación del campo predefinido de velocidad del percutor.....	60
Ilustración 44. Malla del modelo completo	60
Ilustración 45. Malla del rodillo	61

Ilustración 46. Análisis de la malla del rodillo.....	61
Ilustración 47. Malla del percutor.....	62
Ilustración 48. Análisis de la malla del percutor	62
Ilustración 49. Ubicación del set creado como punto.....	64
Ilustración 50. Tipo de Step creado en fatiga.....	65
Ilustración 51. Configuración del periodo de tiempo	66
Ilustración 52. Configuración de la división del periodo de tiempo.....	67
Ilustración 53. Determinación del número de ciclos.....	68
Ilustración 54. Determinación para que los cálculos sean sobre el Set.....	68
Ilustración 55. Carga impuesta en ensayo de fatiga	69
Ilustración 56. Imposición del valor de la carga y de la amplitud.....	70
Ilustración 57. Gráfica de carga senoidal respecto del tiempo	71
Ilustración 58. Tipo de amplitud.....	71
Ilustración 59. Configuración de la amplitud	72
Ilustración 60. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga puntual.....	75
Ilustración 61. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga puntual	75
Ilustración 62. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga superficial.....	76
Ilustración 63. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga superficial	77
Ilustración 64. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, con propiedades plásticas y carga superficial.....	77
Ilustración 65. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, con propiedades plásticas y carga superficial	78
Ilustración 66. Bicicleta de montaña	79
Ilustración 67. Deformaciones en horquilla circular, acero, paseo	80
Ilustración 68. Bicicleta de paseo	80
Ilustración 69. Tensiones en horquilla circular, acero, paseo.....	81
Ilustración 70. Deformaciones en horquilla elíptica, acero, montaña	81
Ilustración 71. Tensiones en horquilla elíptica, acero, montaña.....	82
Ilustración 72. Deformaciones en horquilla elíptica, acero, paseo	82
Ilustración 73. Tensiones en horquilla elíptica, acero, paseo.....	83
Ilustración 74. Deformaciones en horquilla circular, aluminio, montaña.....	84
Ilustración 75. Tensiones en horquilla circular, aluminio, montaña	84
Ilustración 76. Deformaciones en horquilla circular, aluminio, paseo	85
Ilustración 77. Tensiones en horquilla circular, aluminio, paseo	85
Ilustración 78. Deformaciones en horquilla elíptica, aluminio, montaña.....	86
Ilustración 79. Tensiones en horquilla elíptica, aluminio, montaña	87
Ilustración 80. Deformaciones en horquilla elíptica, aluminio, paseo	87
Ilustración 81. Tensiones en horquilla elíptica, aluminio, paseo.....	88
Ilustración 82. Deformaciones en horquilla circular, titanio, montaña.....	88
Ilustración 83. Tensiones en horquilla circular, titanio, montaña.....	89
Ilustración 84. Deformaciones en horquilla circular, titanio, paseo.....	89
Ilustración 85. Tensiones en horquilla circular, titanio, paseo	89
Ilustración 86. Deformaciones en horquilla elíptica, titanio, montaña.....	90
Ilustración 87. Tensiones en horquilla elíptica, titanio, montaña	90

Ilustración 88. Deformaciones en horquilla elíptica, titanio, paseo	91
Ilustración 89. Tensiones en horquilla elíptica, titanio, paseo	91
Ilustración 90. Desplazamientos horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque	93
Ilustración 91. Tensiones horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque	94
Ilustración 92. Variación de energía cinética, horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque	95
Ilustración 93. Variación de energía interna, horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque	95
Ilustración 94. Desplazamiento de horquilla circular, acero, montaña, ensayo de choque	96
Ilustración 95. Desplazamientos horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque	96
Ilustración 96. Variación de energía cinética, horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque	97
Ilustración 97. Variación de energía interna, horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque	97
Ilustración 98. Desplazamiento de horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo de choque	97
Ilustración 99. Desplazamientos horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque	98
Ilustración 100. Variación de energía cinética, horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque	99
Ilustración 101. Variación de energía interna, horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque	99
Ilustración 102. Desplazamiento de horquilla circular, titanio, montaña, ensayo de choque	99
Ilustración 103. Desplazamiento periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga	103
Ilustración 104. Desplazamiento entre periodo y periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga	103
Ilustración 105. Fuerza periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga	104
Ilustración 106. Desplazamiento horquilla circular, acero, montaña, ensayo de flexión estática	104
Ilustración 107. Desplazamiento periodo horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo de fatiga	105
Ilustración 108. Fuerza periodo horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo de fatiga	105
Ilustración 109. Desplazamiento horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo estático de flexión	106
Ilustración 110. Desplazamiento total horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo de fatiga	106
Ilustración 111. Desplazamiento horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo estático de flexión	107

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales.....	31
Tabla 2. Relación tensión-deformación de los materiales.....	32
Tabla 3. Datos tensión-deformación para ensayo estático de flexión	91
Tabla 4. Resultados ensayo de choque, acero.....	100
Tabla 5. Resultados ensayo de choque, aluminio.....	100
Tabla 6. Resultados ensayo de choque, titanio	100
Tabla 7. Resultados ensayo de fatiga, acero.....	108
Tabla 8. Resultados ensayo de fatiga, aluminio	108
Tabla 9. Resultados ensayo de fatiga, titanio	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto del TFG

El siguiente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se ha elaborado con el fin de complementar la formación en el Grado de Ingeniería Mecánica, cursado en la Escuela Politécnica Superior de Jaén, de la Universidad de Jaén.

El TFG que se desarrolla a continuación se titula “ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA HORQUILLA DELANTERA DE UNA BICICLETA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS” y ha sido dirigido por D. José Manuel Vasco Olmo, profesor del área de Ingeniería Mecánica y Minera.

En el presente TFG se llevará a cabo el análisis numérico de un componente de una bicicleta, la horquilla delantera. Se realizará el modelado de dicho componente para posteriormente llevar a cabo su análisis numérico de acuerdo con las solicitaciones o ensayos recogidos en la normativa para este tipo de vehículo. Asimismo, se estudiarán distintas geometrías (en lo que respecta a la sección transversal de la horquilla), para diversos materiales, realizando un estudio comparativo sobre su comportamiento frente a las solicitaciones o ensayos impuestos.

1.2. Normativa vigente

Tal y como se ha comentado anteriormente, las normas recogen 3 ensayos para estudiar la resistencia mecánica de la horquilla delantera de una bicicleta y, de este modo, asegurar que cumplirá con las solicitaciones exigidas una vez esté en uso.

Tales normas son, la UNE-EN 14764 [1] para bicicletas de paseo, y la UNE-EN 14766 [2] para bicicletas de montaña. Ambas definen todos los requisitos y condiciones que deben cumplir todos y cada uno de los elementos que componen una bicicleta, así como la totalidad de la misma. En el artículo dedicado a la horquilla

delantera vienen reflejados los distintos aspectos de montaje referidos a este elemento, así como los diferentes ensayos de seguridad y su ejecución, que es lo que interesa en este caso.

1.2.1. Ensayo estático de flexión

1.2.1.1. Requisitos

Durante el ensayo, no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en cualquier punto de la horquilla y la deformación permanente medida por el desplazamiento del eje de rotación, del eje de la rueda o del eje simulado en relación al eje del tubo de dirección no debe sobrepasar 5 mm en las horquillas rígidas o 10 mm en las horquillas de suspensión, tanto para bicicletas de paseo como para bicicletas de montaña.

1.2.1.2. Método de ensayo

Se coloca la horquilla en un dispositivo de fijación representativo del tubo de dirección sujeto entre los cojinetes de dirección normales y se instala un pivote de rótula de soporte de la carga sobre un eje colocado en las muescas de los brazos. Se coloca un dispositivo de medida de la flecha bajo el punto de fijación de la carga para medir la flecha y la deformación permanente de la horquilla perpendicularmente al eje del tubo de dirección y en el plano de la rueda. Dicho montaje se muestra en la Ilustración 1, donde (1) es la fijación de la carga que puede pivotar sobre el eje, (2) es el dispositivo de medida de la flecha y (3) es el montaje rígido incluyendo los cojinetes de dirección. [1], [2].

Se aplica al rodillo una fuerza estática de precarga de 100 N que sea perpendicular al eje del tubo de dirección, en el sentido opuesto al desplazamiento y en el plano de la rueda. Se suprime y después se aplica esta carga hasta que se obtenga un valor de flexión estable. Se pone a cero el dispositivo de medida de la flecha.

Se incrementa la fuerza estática hasta 1000 N, para horquillas de bicicletas de paseo, y 1500 N para horquillas de bicicletas de montaña, y se mantiene esta fuerza durante 1 min, después se vuelve a reducir la fuerza a 100 N y se registra cualquier deformación permanente.

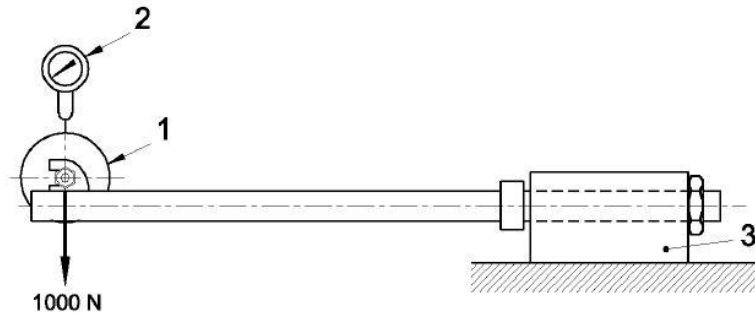


Ilustración 1. Montaje del ensayo de flexión

1.2.2. Ensayo de choque hacia atrás

En este caso, existen dos formas diferentes de unir la cabeza de la horquilla al tubo de dirección: por soldeo o soldeo fuerte, por presión, pegado o atornillado. Dependiendo de qué tipo de unión sea, la altura a la que se deja caer el percutor es diferente. En el presente trabajo, se estudiará la unión por soldeo o soldeo fuerte.

1.2.2.1. Requisitos

Durante el ensayo efectuado no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en cualquier punto de la horquilla y la deformación permanente medida por el desplazamiento del eje de rotación del eje de la rueda o del eje simulado en relación con el eje del tubo de dirección, no debe sobrepasar los 45 milímetros.

Si la horquilla se ha utilizado en el ensayo de impacto para evaluar el conjunto cuadro y horquilla (caída de una masa), no es preciso realizar este ensayo.

1.2.2.2. Método de ensayo

Se monta la horquilla en un dispositivo de fijación representativo del tubo de dirección, apretada entre los cojinetes de dirección normales como se muestra en la Ilustración 2. Para la aplicación de la carga de impacto sobre la horquilla se instala en ésta un rodillo que tenga una masa inferior a 1 kg y con dimensiones acordes con las de la Ilustración 3.

Se coloca un percutor que tenga una masa de 22.5 kg sobre el rodillo fijado en las punteras de la horquilla de tal forma que ejerza una fuerza en el sentido opuesto al desplazamiento y en el plano de la rueda. Se coloca un dispositivo de medida de la flecha bajo el rodillo y se registra la posición de la cara inferior del rodillo en una dirección perpendicular al eje del tubo de dirección y en el plano de la rueda. Se anota la posición vertical de la horquilla.

Se retira el dispositivo de medida de la flecha, se levanta el percutor a una altura de 180 mm (en el caso de horquillas utilizadas en bicicletas de paseo), y de 360 mm (en el caso de horquillas utilizadas en bicicletas de montaña), y se suelta para que golpee el rodillo contra la dirección de inclinación de la horquilla. El percutor va a rebotar, lo que es normal. Cuando el percutor se detenga sobre el rodillo, se mide la deformación permanente bajo el rodillo.

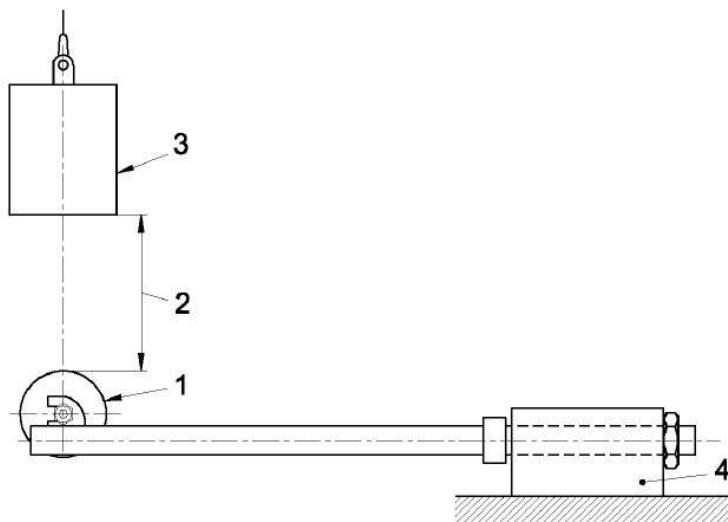


Ilustración 2. Montaje del ensayo de choque hacia atrás

Donde (1) es el rodillo de pequeña masa, (2) es la altura de caída de 180 mm o 360 mm, (3) es el percutor de 22.5 kg de masa, (4) es el montaje rígido incluyendo los rodamientos de dirección y (5) es el rodillo de pequeña masa, tal y como se describe en la ilustración de debajo. [2], [1].

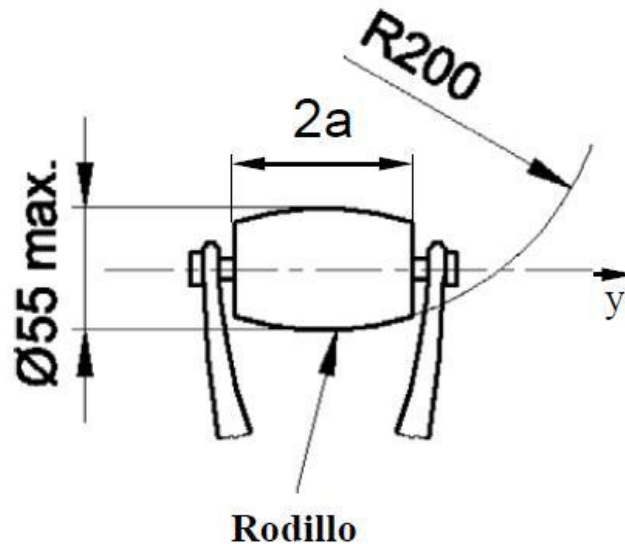


Ilustración 3. Rodillo de pequeña masa (1 kg máximo)

1.2.3. Ensayo de fatiga de flexión

1.2.3.1. Requisitos

Durante la ejecución del ensayo, no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en cualquier punto de la horquilla.

Para las horquillas de fibra de carbono, la flecha máxima durante el ensayo en los puntos de aplicación de los esfuerzos no debe exceder del 20% del valor inicial.

1.2.3.2. Método de ensayo

Se coloca la horquilla en un dispositivo de sujeción representativo del tubo de dirección, apretado entre los palieres de dirección normales tal y como se muestra en la Ilustración 4.

En el caso de horquillas de bicicletas de montaña se aplican ciclos de carga totalmente alternantes con una amplitud de 650 N durante 100000 ciclos a una frecuencia de ensayo inferior o igual a 25 Hz. En el caso de horquillas de bicicleta de paseo, la amplitud de los ciclos de carga aplicados es de 450 N. Dichas cargas se aplican en el plano de la rueda y en dirección perpendicular al tubo de dirección a un pivote de rótula de soporte de la carga colocado sobre un eje y posicionado en las muescas de eje de los brazos.

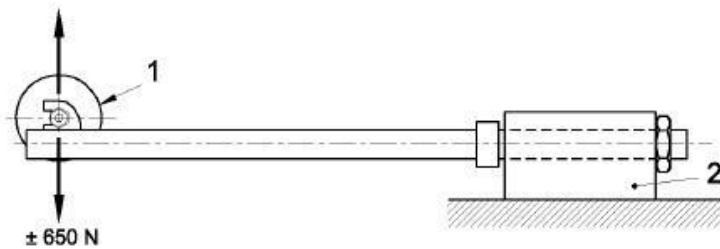


Ilustración 4. Montaje del ensayo de fatiga de flexión

Donde (1) es el dispositivo pivotante de aplicación de la fuerza y (2) es el montaje rígido incluyendo los cojinetes de dirección. [2], [1].

2. OBJETIVOS

2.1. Motivación

En los últimos años, la utilización de las bicicletas como medio de transporte en diferentes países del mundo se ha visto notablemente incrementado. Este aumento de ciclistas se debe sobre todo a una sociedad más comprometida con el medio ambiente y que ha empezado a ser consciente del impacto negativo de los gases emitidos por los motores de combustión interna (coches, motocicletas, etc). También es debido a las campañas para tener una vida saludable y al boom que ha supuesto el ciclismo de montaña. [3].

Esto ha hecho que hoy día se estudien a fondo todos los elementos que componen una bicicleta con el fin obtener geometrías que soporten mayores esfuerzos. Además, un factor muy importante a tener en cuenta en las bicicletas, sobre todo las de competición, es el peso. De modo que se estudian materiales muy resistentes mecánicamente y de baja densidad, tales como el aluminio, por ejemplo.

Uno de los elementos más importantes de la bicicleta es la horquilla delantera, ya que ésta soportará gran parte de los esfuerzos cuando el terreno sea irregular y, sobre todo, cuando la pendiente sea descendente. Esta es la razón que ha impulsado a hacer este TFG, ya que se van a estudiar distintas geometrías con distintos materiales con el fin de comprobar si cumplen o no con lo establecido en la normativa vigente.

3. MODELADO

El modelado de la geometría de todos los elementos requeridos para simular los ensayos descritos en la sección 1.2 se basa principalmente en la operación de extrusión de diferentes secciones a lo largo de distintas trayectorias. Éste se ha llevado a cabo con el software *Catia V5* y con el programa *Abaqus 6.13*.

Tres son los componentes mecánicos que se han de modelar: horquilla, percutor y rodillo.

3.1. Horquilla

Este componente se ha definido en *Catia V5* y se ha modelado por tramos, es decir, se han creado distintas extrusiones, las cuales se han unido finalmente para crear el componente definitivo.

Las medidas de este elemento se han tomado de un modelo real, facilitado por el grupo de investigación del Área de Ingeniería Mecánica, siendo las siguientes:

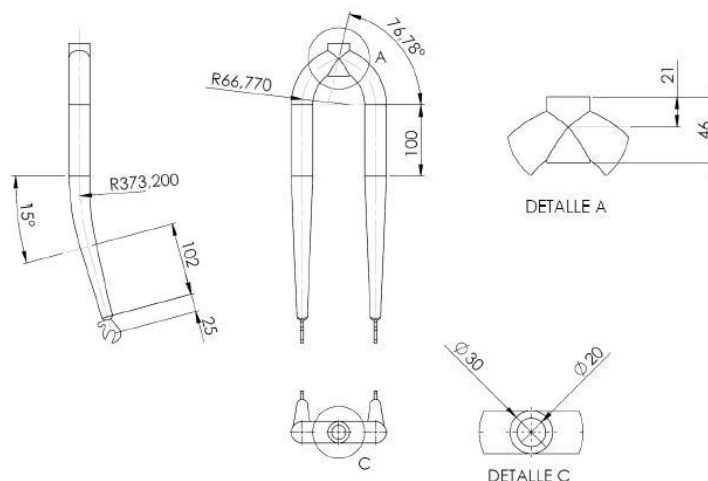


Ilustración 5. Dimensiones y detalles de la horquilla

Dos secciones transversales distintas van a ser analizadas, circular y elíptica; siendo las dimensiones para ambas secciones las indicadas en la Ilustración 5.

A continuación, se va a explicar cómo se han modelado cada uno de los tramos que componen la pieza y, con ello, la pieza definitiva.

El primer tramo que se ha creado ha sido el tubo de dirección (Ilustración 6). Se ha llevado a cabo a través de una extrusión recta simple donde los únicos elementos necesarios son el croquis de la sección y la longitud de extrusión. Esta extrusión se hace con la operación *Pad*.

El croquis está compuesto por dos círculos, uno dentro del otro. De esta manera se define el espesor deseado.



Ilustración 6. Tubo de dirección

Después se han creado, el tramo que nace en el tubo de dirección y describe un arco de circunferencia y el tramo recto que le sigue (Ilustración 7). Ambos, de sección constante. Para ello, son necesarios dos croquis, el que define la sección y el que define el recorrido de la misma. Una vez se tienen ambos, se hace una operación de barrido, en el programa llamada *Rib*, de la sección a lo largo de la trayectoria. Se ha dejado la unión como la intersección de ambos cuerpos.

Esta operación se hace dos veces, una para crear un tramo macizo (un croquis de sección circular o de sección elíptica, dependiendo de si se está modelando la horquilla circular o la horquilla elíptica, respectivamente), y otra para hacer un vaciado del mismo (otro croquis de una u otra sección, pero esta vez, de menor

diámetro, puesto que es el vaciado) y, así, definir el espesor requerido. Para facilitar la operación, se crea un cuerpo nuevo en, *Insert* → *Body*, y se modela el tramo de vaciado con la operación *Rib*. Una vez hecho esto, se define el tramo macizo como objeto de trabajo y, a continuación, al *Body* creado anteriormente, se le aplica la opción *Remove*. Esto hará que al elemento macizo se le reste dicho *Body* y, con ello, se tendrá un cuerpo hueco con el espesor deseado.

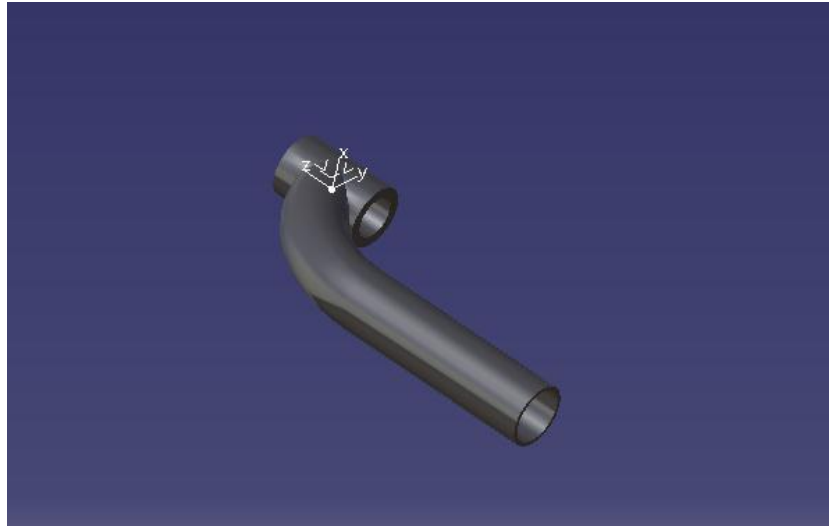


Ilustración 7. Tramo de sección constante

El tramo siguiente es el de sección variable (Ilustración 8). En el caso de la horquilla de sección circular, este tramo empieza y acaba con sección circular. Sin embargo, para la horquilla elíptica, empieza con sección elíptica y acaba con sección circular.

En este caso también hay que hacer un vaciado, y se hace igual que se explicó en el tramo anterior, definiendo un cuerpo (*Body*). Sin embargo, esta vez no se puede hacer con la operación *Rib*, ya comentada anteriormente, ya que la sección varía. En este caso, se emplea la operación *Multi-sections Solid*. Además, para hacer un elemento más parecido aún al real, también se variará, progresivamente, el espesor de la sección. Esto se define en el croquis de vaciado simplemente creando un espesor menor al principio y mayor al final, en el muñón. Este aumento de espesor tiene sentido, ya que cerca de las cogidas, el momento será mayor, puesto que la longitud del brazo mecánico también lo es, con lo cual, se necesita mayor cantidad de material para soportar los esfuerzos.



Ilustración 8. Tramo de sección variable

Por último, queda el tramo de las cogidas (Ilustración 9). Para hacer este tramo, simplemente se ha creado el croquis de dicha pieza y se ha extruido con la operación *Pad* la longitud requerida. La unión de las cogidas con la horquilla se hace a través de un muñón, el cual se ha modelado realizando la revolución de un arco de circunferencia. Dicha revolución se hace con la operación *Shaft*.

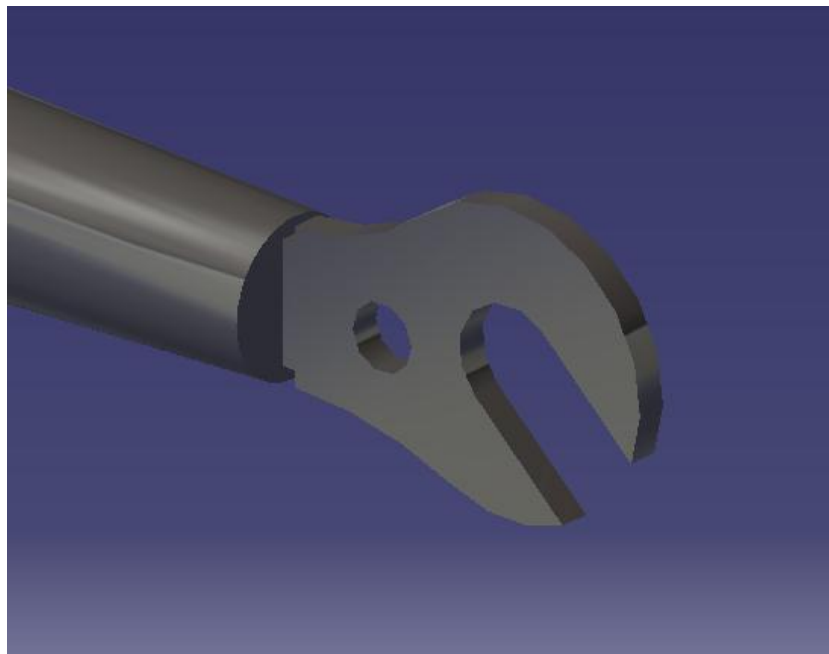


Ilustración 9. Cogida

Finalmente, se hace una operación *Mirror*, para crear el otro brazo de la horquilla exactamente igual que el descrito anteriormente.



Ilustración 10. Horquilla completa

3.2. Percutor

Este componente ha sido creado en el propio programa *Abaqus 6.13*. Para el modelado del mismo hay que ir al módulo de *Part*. Dentro de éste hay que crear o iniciar un nuevo objeto (*Create Part*). Dicho objeto puede ser:

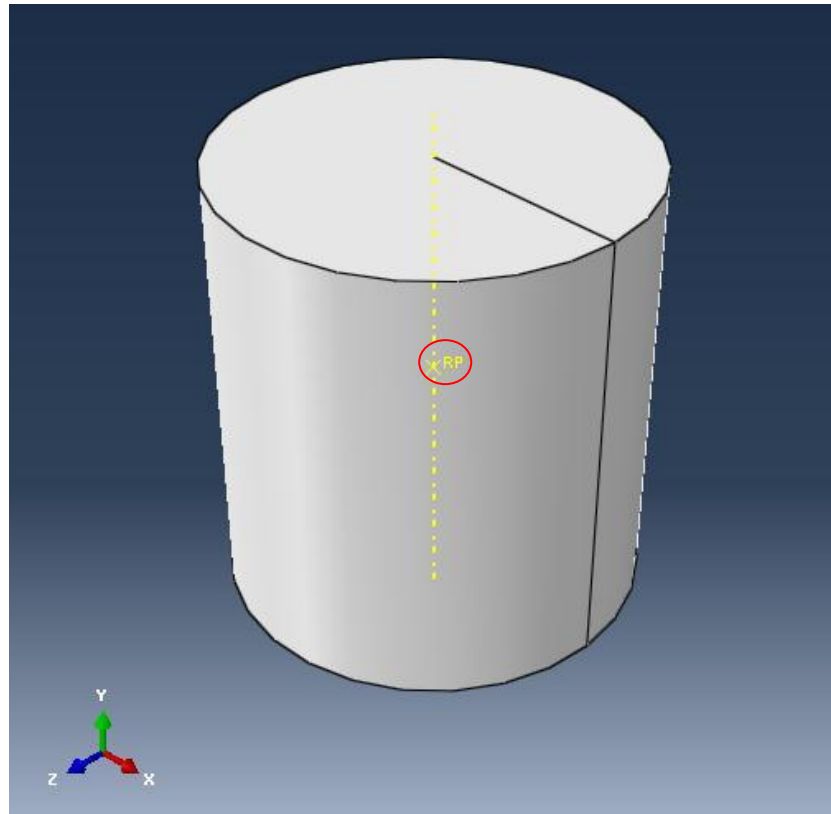
- Deformable
- Discrete rigid
- Analytical rigid
- Eulerian

Puesto que la deformación del elemento no es lo que se persigue en esta simulación, ya que lo que interesa es la deformación de la horquilla, esta parte se crea como un objeto discreto rígido (*Discrete rigid*). Esto hará que al contacto con el eje no se deforme, a diferencia de lo que le ocurriría a un elemento creado como *Deformable*. Además, el hecho de ser discreto supone que hay que mallarlo.

El hecho de no crear este objeto como *Analytical rigid* es debido a que éste no permite el movimiento del objeto al cual se designa y, como en este caso, el percutor tiene que moverse para golpear el eje y, con ello, provocar deformaciones en la horquilla, no es la opción adecuada.

Definir un objeto como *Eulerian* permite crear un volumen de control fijo, el cual es atravesado por el elemento en cuestión para estudiar cómo varían las propiedades de éste desde que entra hasta que sale de dicho volumen. Para la simulación del caso dinámico interesa ver la variación de las propiedades en todo el proceso y no sólo en una zona, por eso esta opción no es la adecuada. Para ello se utiliza una malla lagrangiana, la cual se mueve con el objeto. Tiene mayor coste computacional, sin embargo, es la más adecuada. [4].

Una vez definido el tipo de elemento u objeto, hay que darle forma. La forma será de revolución (Ilustración 11).

**Ilustración 11.** Percutor

Además, será de tipo placa (*Shell*), ya que no es un alambre (*Wire*) o un punto (*Point*). Se podría considerar la opción de crear el objeto como sólido (*Solid*), pero cuando se llega al módulo de *Assembly*, el cual se verá con más detalle posteriormente, el software no permite ensamblarlo. Esto tiene sentido, ya que, como no se va a deformar porque es rígido, el propio software evita que, al mallarlo, se creen nodos interiores, cuyas propiedades no diferirán con respecto a las de los nodos de la superficie, es decir, que las propiedades de este elemento variarán en su conjunto todas a la vez y no existirán variaciones entre unas zonas y otras.

Lo anteriormente indicado es la razón por la que se ha de definir un punto que será el centro de gravedad de la pieza. Las condiciones que haya que establecer en este objeto serán establecidas en dicho punto. Éste aparece como *RP* (*Reference Point*) en la Ilustración 11 rodeado con un círculo rojo. Puesto que la pieza presenta simetría en todos sus ejes, el centro de gravedad estará situado en el centro de la misma.

Para conocer completamente la geometría, se requiere la altura del percutor (h_{per}), ya que la Norma [1], [2], sólo establece los valores de masa (m_{per}) de 22.5 kg y diámetro (d_{per}) de 0.15 m del mismo.

En la Ilustración 12 se muestra un esquema del percutor, que tiene forma cilíndrica, por tanto, su geometría se establece completamente mediante la definición del diámetro y la altura.

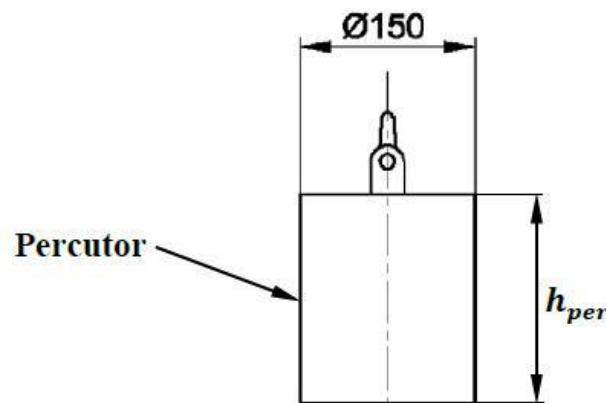


Ilustración 12. Geometría del percutor

En función de la información disponible, existen una cantidad de variables a determinar, que depende del material empleado.

Suponiendo que el material es homogéneo $\rho_{per} = cte$, la masa total del percutor se expresa según la siguiente ecuación,

$$m_{per} = \rho_{per} \cdot h_{per} \cdot \frac{\pi \cdot d_{per}^2}{4} \quad 1)$$

Por lo tanto, la masa del percutor se expresa como función de parámetros geométricos y del material. Se establece una relación de densidad-altura que cumplen con el peso del percutor establecido por la Norma [1], [2], expresado por la siguiente ecuación y que se muestra en la Ilustración 13, donde las abscisas son altura del percutor, medida en [m] y las ordenadas son densidad del material, medida en [kg/m³].

$$h_{per} = \rho_{per} \cdot \frac{4}{m_{per} \cdot \pi \cdot d_{per}^2} \quad 2)$$

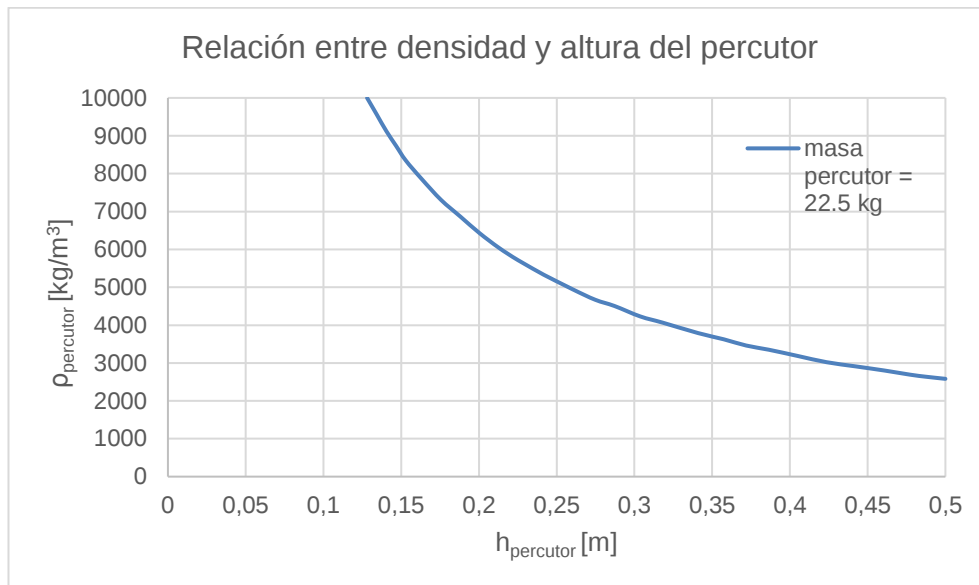


Ilustración 13. Relación entre la densidad y la altura del percutor

Se podría haber elegido una altura aleatoria siempre y cuando en el software se defina la masa establecida por la norma en el *RF*, ya que no se desea estudiar el contacto percutor-rodillo y, por ende, no es necesario que éstos tengan que cumplir las especificaciones, es decir, las propiedades de un material. Sin embargo, se ha hecho esto para que la simulación se parezca lo máximo posible a la realidad.

3.3. Eje o rodillo

Dicho componente también se ha definido en *Catia V5*, tal y como las horquillas circular y elíptica.

Para este componente la Norma [1], [2] establece requerimientos de masa y geométricos, tal y como en el caso del percutor. Dichos requerimientos se mencionan a continuación:

- Masa del rodillo: $m_{rod} \leq 1 \text{ kg}$
- Diámetro de sección radial: $d \leq 0.055 \text{ m}$
- Radio de sección axial: $R = 0.2 \text{ m}$

En la Ilustración 3 se muestra un esquema del rodillo donde se visualizan los parámetros que lo definen.

Para definir completamente la geometría, se requiere conocer el semiancho del rodillo, a . En función de la información disponible, existen una cantidad de variables a determinar, que depende del material empleado. La masa del rodillo m_{rod} se define como:

$$m_{rod} = \int \rho_{rod} dV \quad 3)$$

Suponiendo que el material es homogéneo, es decir, de densidad constante, ésta se puede sacar fuera de la integral:

$$m_{rod} = \rho_{rod} \int dV \quad 4)$$

El volumen del rodillo viene definido como:

$$V_{rod} = \int dV \quad 5)$$

El volumen se calcula integrando el área de la sección $A(y)$, perpendicular al eje y , entre ambos extremos, como se expone en la siguiente ecuación,

$$V_{rod} = \int_{-a}^a A(y) dy \quad 6)$$

El área de la sección transversal al eje y será:

$$A(y) = \pi[r(y)]^2 \quad 7)$$

El radio del percutor respecto al eje y , se establece como:

$$r(y) = \frac{d}{2} - R + \sqrt{R^2 - y^2} \quad 8)$$

Integrando se obtiene la masa del rodillo, cuya expresión es:

$$m_{rod} = \rho_{rod} \cdot \pi \left[a \left(\frac{d}{2} - 2dR + 4R^2 \right) + (d - 2R) \left(a\sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a}{R} \right) \right) - \frac{2}{3} a^3 \right] \quad 9)$$

Por tanto, la masa del rodillo se expresa como función de parámetros geométricos y materiales:

$$m_{rod} = f(\rho_{rod}, d, a, R) \quad 10)$$

Donde $2a$ es el ancho del rodillo.

La masa del rodillo es función del material empleado y de tres variables geométricas:

- d : se establece por la Norma [1], [2].
- R : se establece por la Norma [1], [2].
- a : se limita superiormente por la separación entre los brazos de la horquilla.

En la Ilustración 14 se establece una región de las configuraciones de densidad-ancho posibles que se ubica a la derecha del semiancho entre los brazos de la horquilla, y debajo de la curva de peso máximo del rodillo. En el gráfico, las abscisas son semiancho del rodillo a , medido en [m] y las ordenadas son densidad del material ρ_{rod} , medida en [kg/m³].

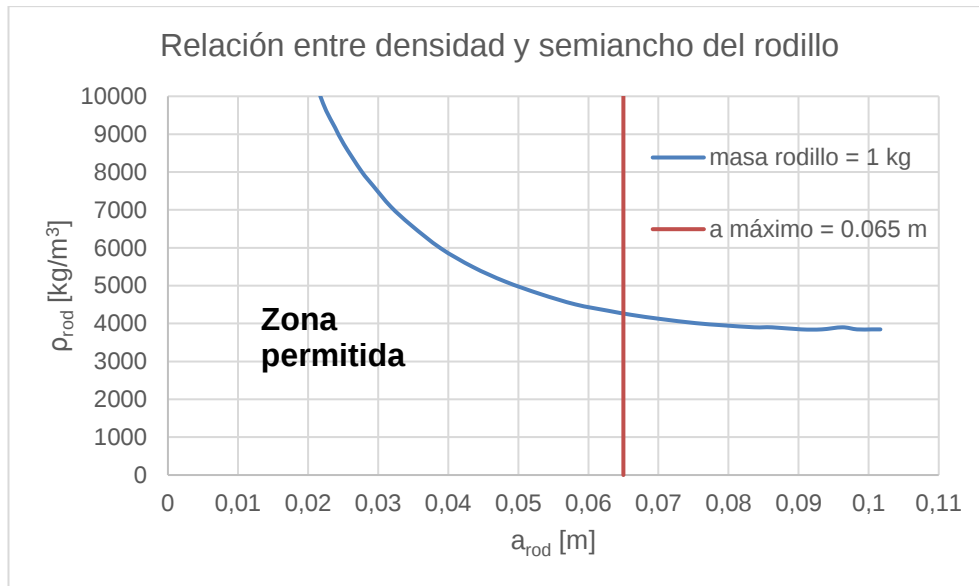


Ilustración 14. Relación entre la densidad y semiancho del rodillo

Una vez definido el material del rodillo, se determina la densidad, y se establece un ancho máximo para no superar el peso establecido por la Norma [1], [2].

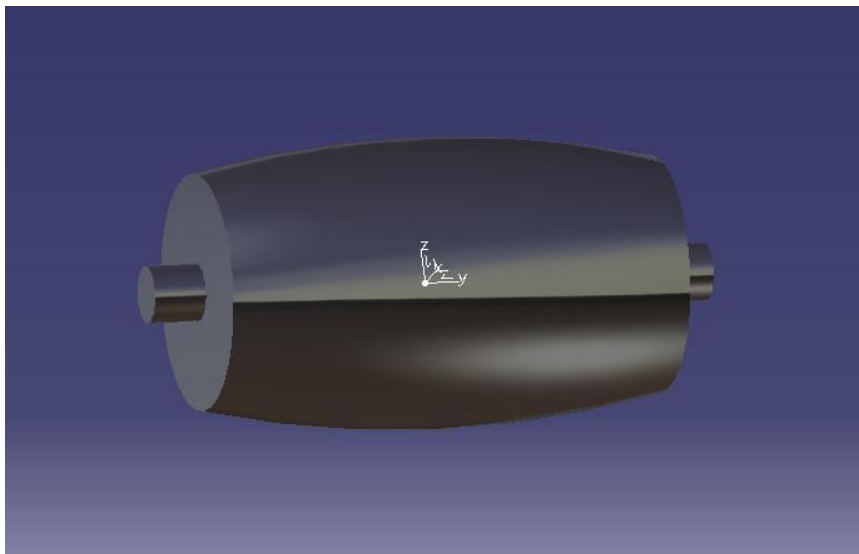


Ilustración 15. Eje o rodillo

4. PRE-PROCESADO Y PROCESADO

Creada la geometría, el siguiente procedimiento es la simulación. Las simulaciones del presente TFG se llevarán a cabo con el software *Abaqus 6.13*.

Abaqus es un programa informático de simulación que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos y otros.

Consta de cuatro productos: *Abaqus/CAE* (siendo CAE el acrónimo de "Complete Abaqus Environment"), *Abaqus/CFD* (acrónimo de "Computational Fluid Dynamics"), *Abaqus/Standard* y *Abaqus/Explicit*. [5].

Se estudia el pre-procesado junto con el procesado porque el software *Abaqus* permite configurar ambos a la vez siguiendo una serie de pasos.

Antes de continuar explicando los distintos pasos a seguir para configurar las simulaciones, se explicará, brevemente, en qué consisten los métodos de discretización empleados para la resolución de problemas del medio continuo.

Inicialmente hay que diferenciar entre el método de diferencias finitas (FDM), el método de elementos finitos (FEM) y el método de volúmenes finitos (FVM).

- FDM

El objetivo del método de diferencias finitas es obtener una solución aproximada a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema, satisfaciendo las relaciones entre las derivadas en cada una de las regiones espaciales y/o temporales, junto con las condiciones de contorno, a lo largo de los bordes del dominio.

El método de diferencias finitas consiste en reemplazar las derivadas de las ecuaciones diferenciales en diferencias finitas aproximadas. Esto da lugar a un gran sistema de ecuaciones algebraicas que normalmente se resuelve por ordenador.

Es un método fácil de formular, empleado en problemas multidimensionales donde la malla se puede definir sin ningún problema mediante coordenadas cartesianas, es decir, cuerpos sin curvas. [6].

- FVM

Es la técnica de discretización más versátil y suele ser usada en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Su formulación parte de la base de dividir el dominio en un número de volúmenes de control donde se realiza la integración de las ecuaciones de gobierno sobre cada uno de los volúmenes.

- FEM

La idea de este método es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. De esta manera se consigue pasar de un sistema continuo, que está gobernado por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se puede modelar por un sistema de ecuaciones, lineal o no.

El método de elementos finitos supone, para solucionar el problema, dividir el dominio discretizado en subdominios denominados elementos, pudiendo ser estos elementos, puntos (en el caso lineal), líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el caso tridimensional) de forma que el dominio total sea lo más próximo posible al real, (Ilustración 16). [7].

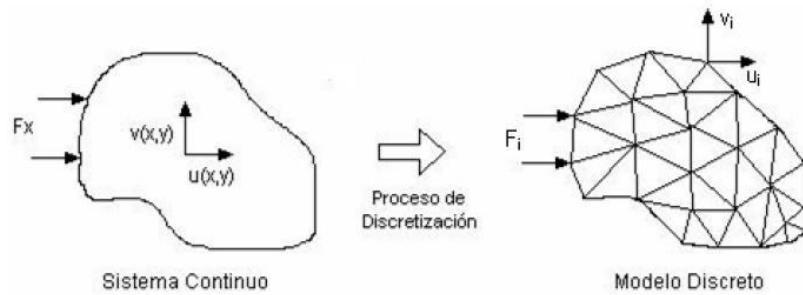


Ilustración 16. Discretización de un sistema continuo

Es empleado en geometrías complejas y mallas no estructuradas. Este método exige un rigor matemático en su formulación. Las condiciones de contorno se imponen de manera exacta.

En las siguientes secciones se expone el procesado llevado a cabo para cada uno de los ensayos simulados.

4.1. Análisis estático de flexión

Este es uno de los 3 ensayos a realizar a la horquilla delantera de la bicicleta para determinar si es o no apta para su uso.

Tal y como se comentó anteriormente (apartado 1.2), una vez ejercida la carga de 1500 N y 1000 N en el caso de bicicletas de montaña y bicicletas de paseo, respectivamente, la horquilla no debe sobrepasar 5 mm de deformación.

Para comprobar la fiabilidad de las simulaciones, éstas se llevarán a cabo aplicando la carga de dos maneras diferentes y se comprobará si los resultados son similares o no. Además, los resultados de esta simulación se pueden validar con ensayos experimentales, ya que se realizó un proyecto fin de carrera (PFC) en el que se obtuvieron resultados experimentales para este ensayo y con unas horquillas idénticas. [8]

Puesto que para medir la deformación se tendrá en cuenta que la carga está aplicada continuamente en el objeto estudiado, no importa si el caso de la simulación se configura sólo con propiedades elásticas. Independientemente a lo dicho, se harán también las simulaciones incluyendo propiedades plásticas a la horquilla para ver que no existen diferencias en los resultados.

A continuación, se detallarán cómo se han configurado en el software *Abaqus* 6.13 cada una de las dos formas de carga comentadas anteriormente.

4.1.1. Análisis con cargas puntuales

El primer paso a realizar en una simulación es introducir en el programa la geometría o geometrías necesarias para la ejecución de la misma. Para esta simulación sólo es necesaria la geometría de la horquilla, ya que la carga será impuesta de forma ficticia, es decir, sin la necesidad de otro elemento que actúe como tal.

Dicha geometría ha sido creada con *Catia V5*. Como éste y *Abaqus 6.13* están creados por la misma empresa, *Dassault Systems*, en el software de simulación existe una opción para importar cualquier geometría desde *Catia V5*.

Una vez hecho esto, hay que definir las propiedades del material. Para ello se crean tantos materiales como se deseen estudiar en el módulo *Property*. En este caso serán 3: acero, aluminio y titanio. Para crear dichos materiales hace falta conocer el valor de sus respectivas densidades, sus curvas tensión-deformación (para las propiedades plásticas) y el Módulo de Young, así como el coeficiente de Poisson. [9], [10].

PROPIEDADES	MATERIALES		
	Acero 8630	Aluminio 2024	Titanio Ti-5Al-2.5Sn
<i>Módulo de Young [MPa]</i>	210000	70000	107000
<i>Coeficiente de Poisson</i>	0.3	0.33	0.34
<i>Densidad [kg/m³]</i>	7850	2700	4500
<i>Límite elástico [MPa]</i>	200.2	290	405
<i>Límite de rotura [MPa]</i>	480	500	459

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales

También se necesitan los datos de tensión-deformación, los cuales se han sido facilitados por el departamento de Ingeniería Mecánica tras el ensayo de los materiales.

MATERIALES					
Acero 8630		Aluminio 2024		Titanio Ti-5Al-2.5Sn	
Tensión [MPa]	Deformación	Tensión [MPa]	Deformación	Tensión [MPa]	Deformación
0	0	0	0	0	0
200.2	0.00095	290	0.004143	405	0.003785
246	0.0247	411.49	0.01854	438.2022	0.062857
294	0.0488	436.96	0.03245	453.6517	0.098776
374	0.0953	455.89	0.04623	459.2697	0.142857
437	0.1398	469.48	0.06004	452.2472	0.197551
480	0.1823	479.82	0.07398	435.3933	0.262857
		487.89	0.0881	411.5169	0.315102
		493.25	0.10248	365.1685	0.364898
		497.64	0.1172		
		500.31	0.13235		

Tabla 2. Relación tensión-deformación de los materiales

Para el titanio, puesto que no se ha encontrado el diagrama tensión-deformación, esos valores se han definido en la zona elástica, con la ecuación:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 11)$$

Donde E es el módulo de Young (pendiente de la recta), ε la deformación y σ la tensión.

Cuando están creados los materiales, hay que crear tantas secciones como materiales haya, ya que a cada una de estas secciones se le asignará un material de los comentados anteriormente. Finalmente, se asigna la sección que se quiere estudiar a la geometría de la horquilla importada.

Una vez creados los materiales hay que ensamblar todas las piezas creadas e importadas en una misma región de trabajo. Esto se lleva a cabo en el módulo

Assembly. Como en este caso sólo existe una, no importa si se ensambla como malla independiente o dependiente. La diferencia entre una malla y otra es, que si una misma pieza se ensambla de forma independiente varias veces, se pueden crear distintas mallas para cada una de ellas. Sin embargo, ensamblar de forma dependiente tiene la ventaja de que, si existen varias piezas iguales y todas requieren el mismo tipo de malla, como todas dependen de todas, con mallar una sola se mallarán todas a la vez, es decir, se ahorra tiempo en la configuración de la simulación.

La opción *Auto-offset from other instances* es aconsejable que esté siempre marcada, ya que, si lo está, cada pieza que se introduzca en el ensamblaje aparecerá en un lugar diferente del dominio. Esto tiene la ventaja de que se ve en todo momento todas las piezas que componen el ensamblaje.

En este módulo se colocarán las piezas como se desee que estén al inicio de la simulación (traslación, rotación, etc). En este caso no importa el lugar, ya que sólo existe una. Sin embargo, en ensayos posteriores sí hará falta colocar bien las piezas, ya que habrá más de una.

El siguiente módulo a rellenar es el módulo *Step*. Puesto que esta simulación es estacionaria y estática, se elige un tipo de paso de tiempo *Static, General*. Dentro de las opciones que presenta no hay que modificar ninguna.

Como es obvio, antes de este paso se crea automáticamente otro, que es el paso inicial, es decir, el tiempo justo en el instante anterior de que comience la simulación ($t=0$).

Dentro de este módulo también se elige qué variables se quieren calcular *History Output Requests* y cuáles se desean mostrar *Field Output Requests* en el post-procesado.

Esta simulación está configurada de tal manera que las cargas están aplicadas en puntos estratégicos de las cogidas (Ilustración 17). Estos puntos son los mismos tanto para la horquilla circular como para la elíptica.

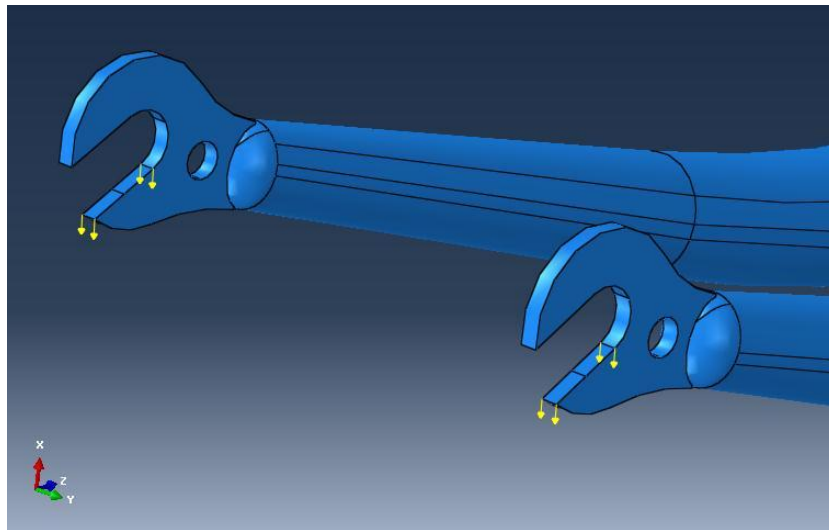


Ilustración 17. Aplicación de cargas puntuales

En el software hay que configurar la carga teniendo en cuenta que el valor impuesto es el de una sola de las 8 que aparecen en la imagen, es decir, que en el caso de la horquilla de una bicicleta de montaña el valor que hay que introducir en la configuración de la simulación es de -187.5 N , ya que son los 1500 N repartidos entre 8 puntos sobre los que se aplica la carga. El signo negativo se debe a que la carga se ejerce en el sentido negativo del eje OX .

Las condiciones de contorno de este problema son sencillas. Simplemente es un empotramiento total en el eje de dirección, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

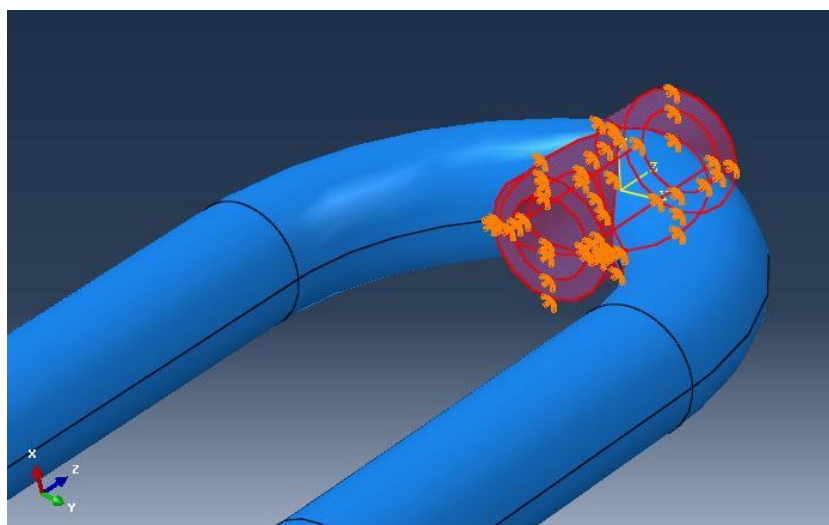


Ilustración 18. Condiciones de contorno en el empotramiento

Este tipo de condición de contorno en el programa se define en *Create Boundary Condition*, y dentro de este menú se escoge una condición tipo *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*. Dentro de este último menú se escoge *Encastre*, la cual impide el tanto el movimiento lineal como el giro en cualquier dirección.

Por último, antes de lanzar la simulación, hay que configurar el paso más importante, la malla. Esto se lleva a cabo en el módulo *Mesh*.

Puesto que la geometría de la pieza es bastante irregular, sobre todo en la zona del eje de dirección y en las cogidas, se mallará con tetraedros (Ilustración 19). Este tipo de celdilla se adapta perfectamente a cualquier forma o geometría, aunque los resultados no son tan buenos como en una celdilla cuadrada o hexagonal. Se podría pensar en hacer particiones de la pieza, tal y como se comentó anteriormente con las cogidas, y mallar cada una con un tipo de celdilla distinta, es decir, las zonas más irregulares con celdas tetraédricas y las más regulares, con celdas cuadradas o hexagonales. Sin embargo, puesto que este software funciona con el método de elementos finitos (FEM), no se pueden diferenciar distintas zonas con distintos tipos de malla. Esto se debe a que, a diferencia del FVM, la formulación para cada tipo de celda es diferente, por lo tanto, existirían problemas en las zonas de unión de un tipo y otro.

A la hora de hacer la malla hay que determinar el tamaño global aproximado (***Approximate Global Size***), el cual ha sido 3 en este caso. Se ha escogido este tamaño porque es suficiente para que se adapte bien a todas las zonas irregulares de la pieza. Un parámetro cualitativo fundamental en a la hora de mallar es intentar que la malla quede lo más homogénea posible, es decir, que no se vean zonas irregularmente malladas en las que los elementos se pudieran mostrar con una gran distorsión que diera problemas en la convergencia de los resultados.

El tipo de malla escogida ha sido *Tet Free* (tetragonal libre) con el fin de que se adapte bien a todas las zonas de la pieza.



Ilustración 19. Malla de la horquilla

Una vez elegido de forma general el elemento que gobierna la malla, se determinan algunos parámetros concretos del mismo. Existen dos librerías en las cuales un mismo elemento puede ser definido dependiendo del tipo de simulación: *Standard* y *Explicit*. Dentro de éstas aparecen los siguientes tipos de elementos.

- 3D Stress
- Acoustic
- Cohesive
- Continuum Shell
- Couple Temperature-Displacement
- Cylindrical
- Gasket
- Heat Transference
- Piezoelectric
- Pore Fluid/Stress
- Thermal Electric
- Thermal Electrical Structural

El elemento elegido para este tipo de simulación es *3D Stress*. Se usa para casos tridimensionales de tensión, que define perfectamente el tipo de problema a simular en este caso. Viene definido concretamente como *C3D4* (Ilustración 20). Donde la C significa que se emplea para medios Contínuos. 3D indica que sirve para casos

tridimensionales. Por último, el 4 indica el número de nodos y, por tanto, se emplea una integración numérica. A diferencia de si apareciera un 10, en el que se emplean diez nodos en el elemento para hacer una integración cuadrática.

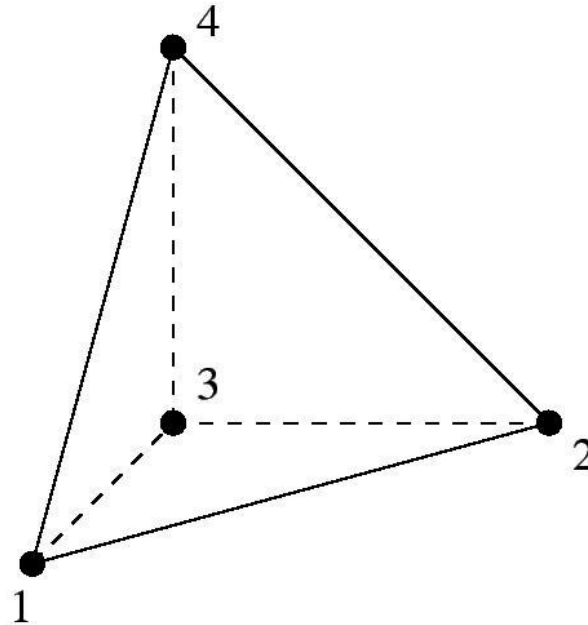


Ilustración 20. Elemento tetraédrico

Tal y como se muestra en la figura, la solución de tensión, velocidad, desplazamiento, etc, en cada elemento se calcula en los vértices del tetraedro (nodos), de ahí el 4. Esto es si se escoge la opción de *orden de geometría lineal*. Sin embargo, si se escoge la opción de *orden de geometría cuadrática* el número de puntos en los que se calcula la solución es mayor, ya que también se calculará en la zona media de cada arista, es decir, la expresión de la celdilla ahora será *C3D10*.

El último paso del mallado y no menos importante es la verificación de que la malla creada no tiene errores, ya que si existe algún error el software no permitirá ejecutar la simulación. Para ello se selecciona la opción *Verify Mesh* y, dentro de esta, *Highlight*. Una vez hecho esto aparecerá la geometría con colores amarillo o rosa dependiendo de si existen advertencias o errores en la malla, respectivamente (Ilustración 21), (Ilustración 23). Si no aparece ningún color quiere decir que la malla está perfecta. Además de lo dicho anteriormente, aparece un mensaje en el *Message Area* (Ilustración 22), (Ilustración 24), en el cual se visualiza el número de

elementos que tiene la malla, el número de elementos con error, el número de elementos con advertencia, así como sus respectivos porcentajes.

Se puede ver que el número de elementos erróneos es 0, por lo que la simulación no dará problemas. En cuanto a los elementos con advertencia sólo hay 90 de 60229 elementos en total que tiene la malla, esto es un 0.14943 %. Con estos resultados se establece que la malla es idónea para el análisis numérico.

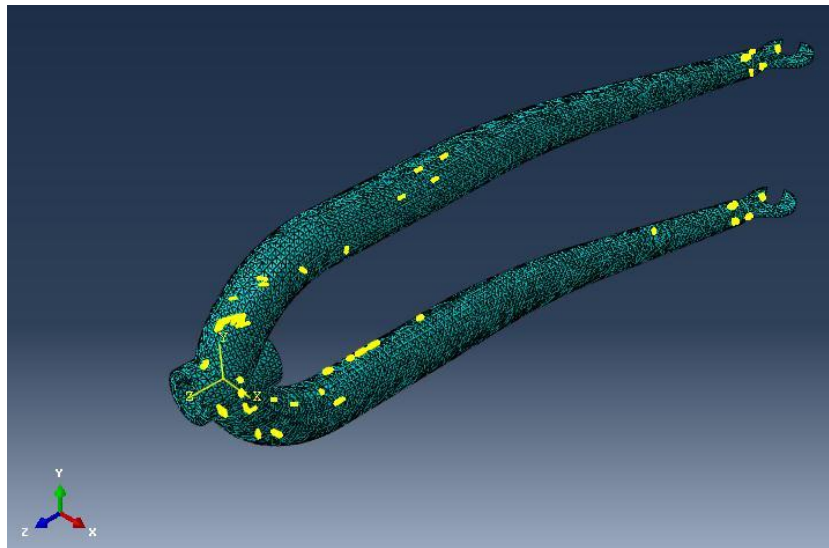


Ilustración 21. Errores y advertencias en la malla de la horquilla circular

```
Part instance: Horquilla_circular-1-1  
Number of elements : 60229, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 90 (0.14943%)
```

Ilustración 22. Porcentaje de errores y advertencias de la malla de la horquilla circular

En cuanto a la malla de la horquilla elíptica, se obtiene un porcentaje de advertencias del 0.133386 %, es decir, tan solo 67 elementos. El número de elementos de errores es 0. Con esto se concluye que esta malla es mejor aún que la malla de la horquilla circular.

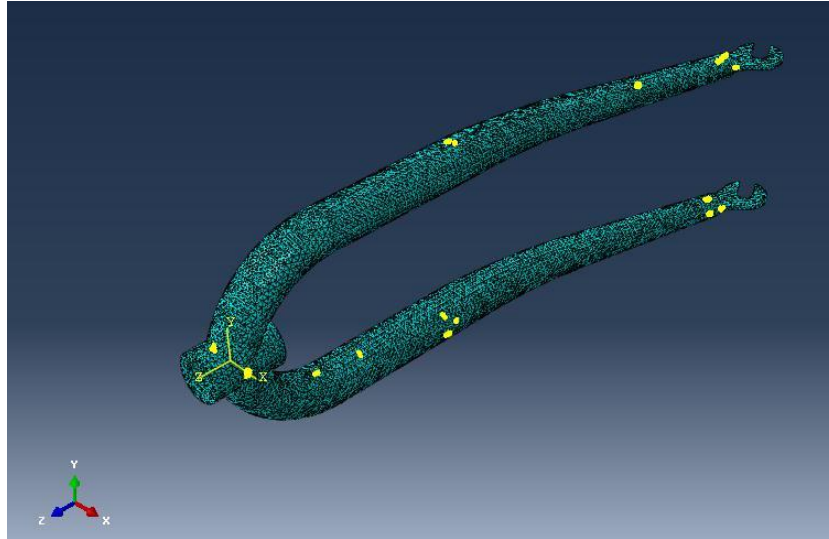


Ilustración 23. Errores y advertencias de la malla en la horquilla elíptica

Part instance: Horquilla_eliptica-1
Number of elements : 50230, Analysis errors: 0 (0%) Analysis warnings: 67 (0.133386%)

Ilustración 24. Porcentaje de errores y advertencias de la malla de la horquilla elíptica

Esos puntos amarillos son las advertencias en la malla y, tal y como se dijo anteriormente, como no existen errores, no aparecen zonas rosas. Aunque aparezcan zonas de advertencia, eso no evitará que la simulación sea ejecutada correctamente.

4.1.2. Análisis con carga de presión

Este ensayo es exactamente igual que el anterior, la única diferencia es que la carga en este caso se aplica sobre una superficie, mientras que en el caso anterior eran cargas puntuales.

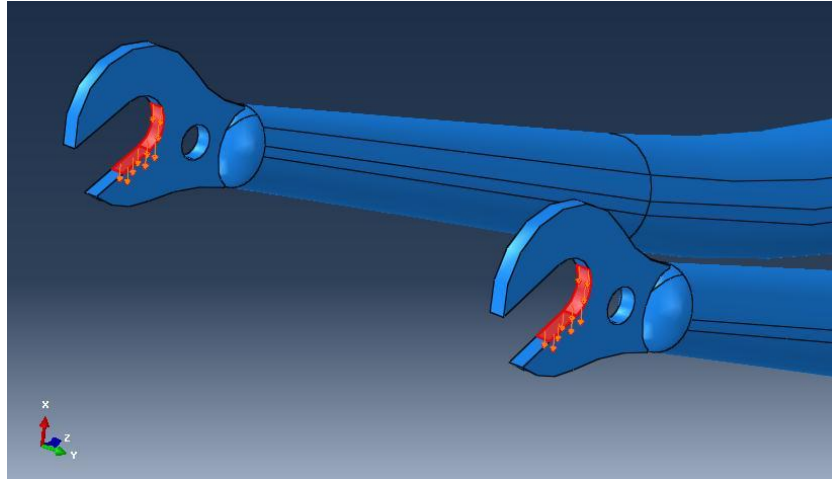


Ilustración 25. Aplicación de la carga uniformemente sobre la superficie

En la imagen se ve cómo la carga está aplicada sobre una superficie. Esta superficie no se conoce a priori (Ilustración 26), pero se puede calcular con unas sencillas operaciones trigonométricas, ya que será necesaria posteriormente.

Se ha elegido esta superficie porque cuando se aplique la carga en el eje, éste tendrá contacto con las cogidas aproximadamente en esa zona.

Para poder acotar la zona deseada hay que dividir la media circunferencia y el tramo rectilíneo de abajo en dos partes iguales cada uno.

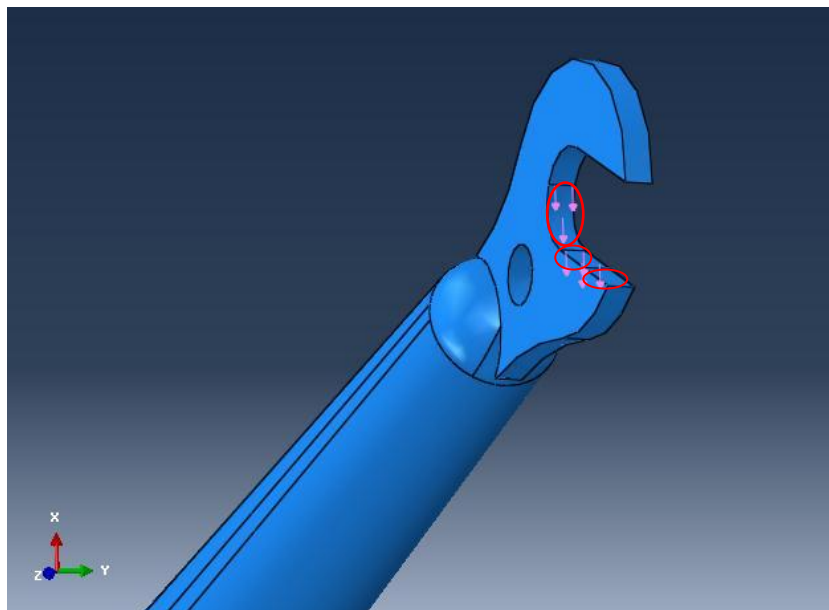


Ilustración 26. Superficie sobre la que se aplica la carga

Esto se lleva a cabo en el programa con la opción *Partition face: Sketch* en el módulo *Assembly*.

Una vez creadas las diferentes partes se obtienen sus medidas en Catia V5 y se calcula la superficie. Se diferencian 2 partes, la mitad de una semicircunferencia y la mitad del tramo rectilíneo denotadas como 1 y 2, respectivamente.

$$S_1 = e \cdot \frac{\pi \cdot r}{2} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot 5.5}{2} = 25.9181 \text{ mm}^2 \quad 12)$$

$$S_2 = e \cdot l = 3 \cdot 6.708 = 20.124 \text{ mm}^2 \quad 13)$$

La superficie de cada cogida es:

$$S = S_1 + S_2 = 46.0421 \text{ mm}^2 \quad 14)$$

Para configurar este tipo de carga, en primer lugar, hay que indicar un vector. Con este vector se impone tanto la dirección como el sentido de aplicación del esfuerzo (ahora se habla de esfuerzo y no de fuerza, ya que no es una fuerza puntual como en el caso anterior, sino que está aplicada sobre una superficie, es decir, es una presión). Dicho vector es el (-1,0,0), puesto que la carga se aplica en la dirección negativa del eje OX.

Tras indicar la dirección de aplicación de la carga hay que indicar el valor de la misma. Para ello simplemente hay que aplicar la ecuación:

$$P = \frac{F}{S} \quad 15)$$

Donde P es la presión, F es la fuerza y S es la superficie. La fuerza se conoce debido a que viene impuesta por el ensayo en cuestión (1000 N y 1500 N para horquillas delanteras de bicicletas de paseo y de montaña, respectivamente). La superficie fue calculada anteriormente. Por lo tanto, la presión aplicada será:

$$P_{montaña} = \frac{750}{46.0421} = 16.2894 \text{ MPa} \quad 16)$$

$$P_{paseo} = \frac{500}{46.0421} = 10.8596 \text{ MPa} \quad 17)$$

Sólo se pone la mitad de la carga en las fórmulas puesto que, como la horquilla es simétrica en el eje OZ, en cada cogida habrá la mitad de la presión aplicada.

4.2. Análisis dinámico de impacto

Este es el segundo de los análisis a realizar a la horquilla delantera de una bicicleta. Se llevará a cabo, tal y como indica la norma [1], [2], siempre y cuando no exista ninguna fisura o rotura visible en cualquier punto de la pieza (apartado 1.2).

La norma establece que el requisito que debe cumplir la horquilla para superar este ensayo es el de no superar una deformación superior a 45 mm (apartado 1.2).

En cuanto a la diferencia entre el ensayo para una horquilla de montaña y otra de paseo radica en la distancia a la cual el percutor se deja caer, siendo éste el mismo (misma masa de 22.5 kg) en ambos casos. En el caso de tratarse de una horquilla destinada a una bicicleta de montaña, la distancia a la cual se deja caer el percutor es de 360 mm, mientras que, si la horquilla es para ser montada en una bicicleta de paseo, esta distancia es de la mitad, 180 mm (apartado 1.2.2).

Una vez expuestos los requisitos a superar en el ensayo y hecho un breve resumen del mismo, se procederá a definir detalladamente cómo han de configurarse las simulaciones en *Abaqus 6.13* correctamente y, así, obtener resultados coherentes.

La configuración de esta simulación es la más complicada de las tres que se están tratando en este trabajo, ya que aquí existen e interactúan 3 cuerpos (horquilla, percutor y rodillo) y no uno sólo como ocurre en las otras dos. La dificultad de esta simulación radica en el hecho de definir correctamente dichas interacciones, las cuales se detallarán posteriormente.

El primer paso para la configuración de la simulación de este ensayo es importar desde *Catia V5*, en el módulo *Part*, tanto la horquilla como el rodillo, ambas geometrías creadas en dicho software (apartados 3.1, 3.3, respectivamente).

A la hora de importar la horquilla se hará como *Deformable 3D*, ya que será el cuerpo que interesa estudiar, es decir, en el que se medirán las deformaciones, tensiones, desplazamientos, etc.

En cuanto al rodillo, éste se importará como *Discrete Rigid 3D*. Esto es debido a que no se va a deformar. El hecho de que no se deforme implica que no se va a estudiar la interacción entre rodillo y percutor, es decir, que cuando se produzca el impacto entre ambos cuerpos, éste será completamente rígido, sin deformación de ninguno de los dos, ya que lo que interesa estudiar son las variaciones en las propiedades de la horquilla.

Finalmente, queda introducir el último de los cuerpos, el percutor. Éste se crea directamente en Abaqus 6.13, también como *Discrete Rigid 3D*, por la razón comentada anteriormente para el rodillo. No hace falta crearlo en Catia V5, aunque se podría hacer, porque es una geometría muy sencilla (apartado 3.2).

En este mismo módulo Part hay que colocar un *RP (Reference Point)* que actúe como centroide del rodillo y del percutor, ya que en módulos posteriores será necesario tener en cuenta esto. La definición de un punto de referencia se realiza con la opción *Tools*, en el mismo módulo *Part*, y se selecciona la opción *Reference Point* (Ilustración 27). Una vez seleccionada dicha opción, simplemente hay que indicar el punto en el que se quiere colocar en coordenadas cartesianas.

El punto de referencia es necesario incluirlo en los cuerpos rígidos, ya que, como tales, sólo hace falta un punto que realice los movimientos y sufra las variaciones de velocidad y aceleraciones, debido a que el resto del cuerpo hará exactamente lo mismo que éste, puesto que no se deforma, es decir, “lo seguirá”. Por lo tanto, como se verá posteriormente, a la hora de definir las propiedades de condiciones de contorno, velocidad, etc en un cuerpo rígido, se hace sobre su centroide.

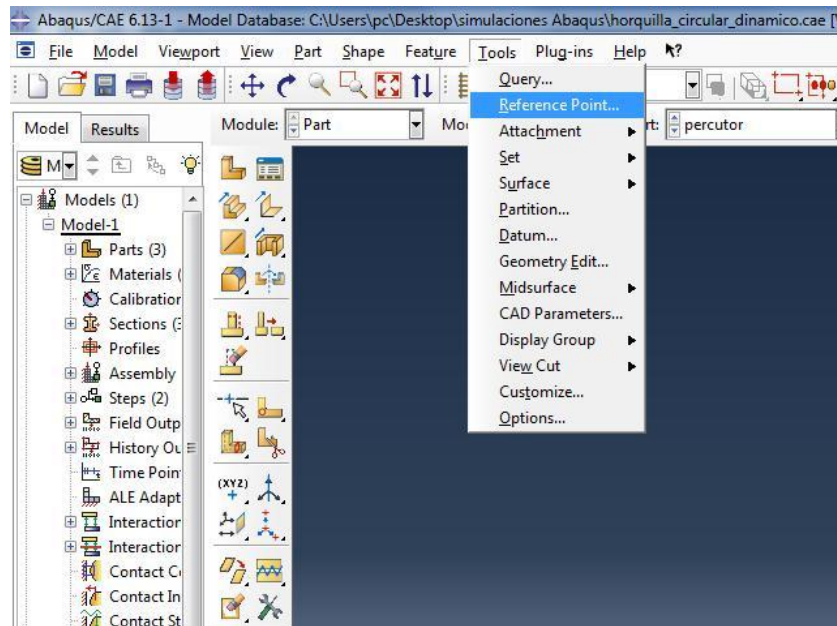


Ilustración 27. Definición de un reference point (Punto de Referencia)

Una vez hecho esto, hay que convertir el rodillo, importado desde *Catia V5*, de sólido a placa. Este paso es muy importante, ya que, si no se lleva a cabo, el programa no permitirá ensamblarlo en el entorno de trabajo (*Assembly*). Para hacer esto, hay que emplear la opción *Shape* (en el módulo *Part*) y seleccionar *Shell From Solid*. Una vez hecho esto se marcan todas las superficies de la pieza.

En el módulo *Property* las propiedades de los materiales se introducen en el software del mismo modo que como se hizo y se definió en el ensayo anterior (apartado 4.1.1). Estas propiedades sólo serán impuestas en la horquilla, ya que, tanto el percutor como el rodillo, se han definido como sólidos rígidos y no se deformarán. En el caso del percutor, hay que imponer una propiedad a parte, en Abaqus denominada como *Special*. Esta propiedad es una inercia. Esta inercia será la encargada de dar una masa al percutor. Dentro de *Special* hay que crear *Inertia*, e imponer que la masa del punto de referencia implantado anteriormente sea de 0.0225 Tn (Ilustración 28), ya que en Abaqus, si se trabajan las tensiones en MPa, las masas hay que introducirlas en toneladas y las longitudes en milímetros. Aquí se demuestra que las propiedades para un cuerpo rígido hay que implantarlas en el punto definido como centroide.

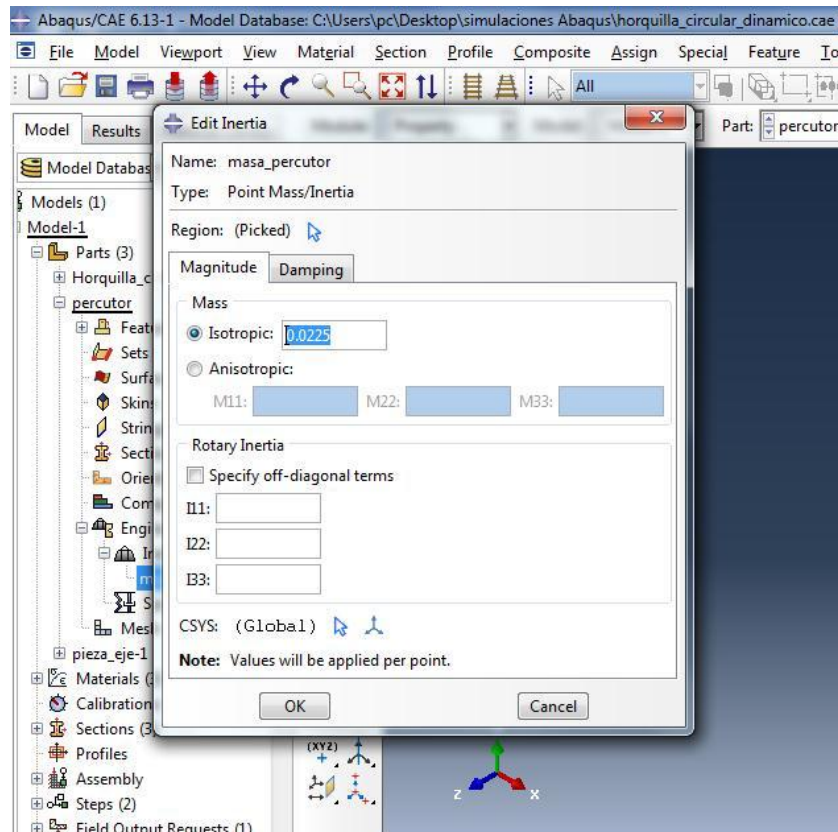


Ilustración 28. Definición de la inercia en el percutor

Ahora se va a definir el módulo de *Assembly* que, a diferencia del resto de simulaciones, esta vez habrá que introducir dos cuerpos más en el entorno de trabajo, tal y como se ha comentado anteriormente.

El ensamblaje una vez montado y con todos los cuerpos queda como se ve en la siguiente imagen.

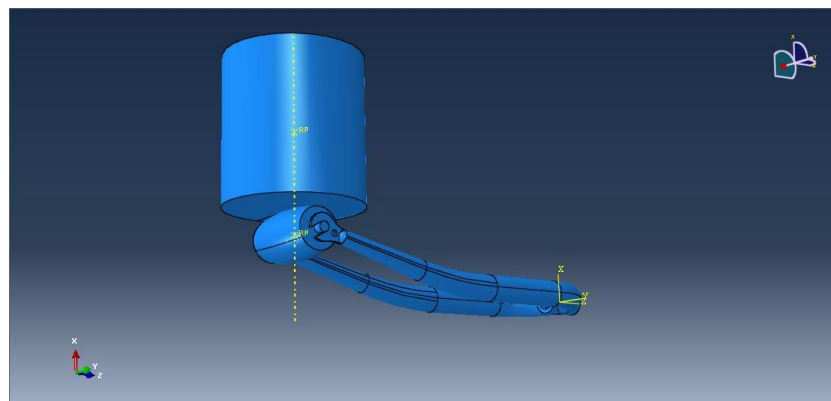


Ilustración 29. Montaje definitivo

A primera vista, se puede observar que el percutor no está separado del rodillo la distancia a la cual se debería dejar caer (Ilustración 29). Esto es para ahorrar tiempo en la simulación, ya que, aplicando una simple conservación de energía, se calcula la velocidad a la que el percutor llegaría a ese punto y se le impone en el centroide como ya se verá posteriormente.

El balance es muy sencillo. Al principio el percutor tendrá una energía potencial tomando como referencia el punto de contacto con el rodillo. Esta energía potencial vendrá dada por:

$$E_p = mgh \quad 18)$$

Siendo m la masa del percutor, definida en la norma, g la aceleración de la gravedad y h la altura desde la que se deja caer el percutor. La variable h variará dependiendo de si es una horquilla para bicicleta de paseo o una para bicicleta de montaña en 180 mm y 360 mm, respectivamente, como ya se ha comentado anteriormente.

Para el cálculo de la velocidad a la que llega a tocar el rodillo se aplica la ecuación de la energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad 19)$$

Igualándola a la de la energía potencial y despejando v .

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad 20)$$

Ya que la energía que el rodillo tiene al principio como potencial, al final se convertirá toda en cinética.

La velocidad, como es obvio, variará en función de la altura a la que se eleve el rodillo, es decir, que será distinta dependiendo de si es para horquilla de paseo o de montaña.

Una vez comentado esto, se va a explicar cómo introducir y unir cada una de las piezas que intervienen en esta simulación.

Las tres piezas se introducen igual que se explicó en el ensayo anterior y como malla dependiente. Una vez estén todas en el entorno de trabajo, se procederá a unirlas adecuadamente, ya que ese será el punto de partida a partir del cual el software hará los cálculos.

El apartado *Constraint* (Ilustración 30), que significa restricción, será en el que se imponga cómo ha de ser la disposición de las distintas piezas.

Lo primero que se hace es unir la horquilla con el rodillo. Para ello se utiliza la restricción *Coaxial* (Ilustración 31).

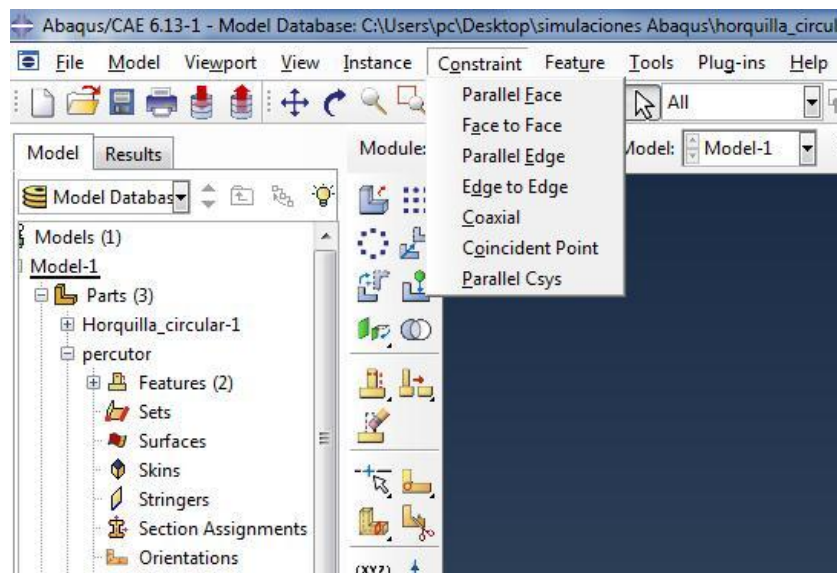


Ilustración 30. Restricciones en el ensamblaje

Esta restricción hace que el eje de la cogida sea coaxial con el eje del rodillo, de tal modo que el rodillo quede fijado a la horquilla tanto en la dirección *OX* como

en la OZ. Para evitar el movimiento relativo entre ambas piezas en la dirección OY se utilizará una restricción en la interacción que se verá posteriormente.

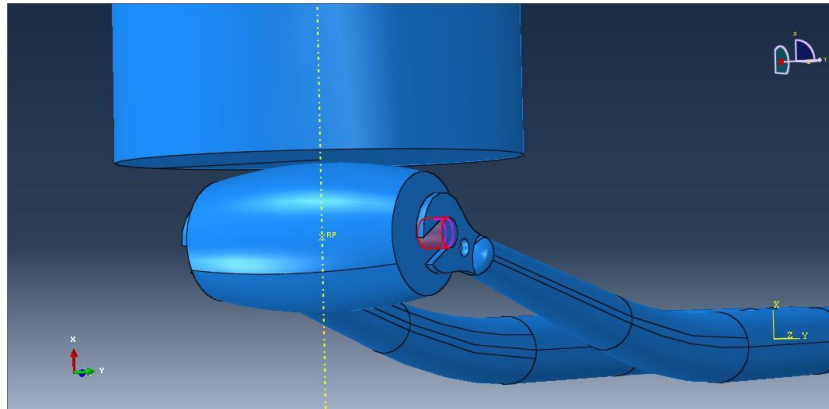


Ilustración 31. Restricción coaxial entre rodillo y horquilla

Simplemente queda explicar cómo colocar el percutor justo encima del rodillo. Para ello se utilizarán las opciones de *Rotate* y *Translate*, que permitirán, en el caso de *Rotate*, eligiendo un eje de rotación definido por dos puntos y el ángulo de giro, rotar la pieza como se desee y en el caso de *Translate*, eligiendo un punto inicial del cuerpo y unas coordenadas correspondientes al punto de destino, mover la pieza al lugar deseado.

El punto (0,0,0) de las coordenadas cartesianas viene definido por la primera pieza que se introduce en el entorno de trabajo desde el módulo *Assembly*. En este caso está en la horquilla, por lo tanto, el punto final en la translación del percutor tiene que ir referenciado a ese punto.

Otro aspecto a considerar es la creación de 3 sets, uno para cada cuerpo, con el fin de estudiar, una vez acabada la simulación, cómo varían las propiedades en cada componente por separado. En el caso del rodillo y el percutor no se estudiarán deformaciones ni tensiones debido a que se tratan de sólidos rígidos.

Tras configurar el módulo *Assembly* hay que configurar el *Step*. El paso de tiempo que hay que crear es el *Dynamic Explicit*. Este tipo de paso dinámico explícito es el que se usa en la mayoría de simulaciones de impacto. Tanto este como el implícito (*Dynamic Standard*) se usan en problemas en los que aparece la

no linealidad en la variación de las propiedades de las piezas, como es el caso que se trata en esta sección (caso plástico).

Se usa el método explícito porque es más fácil a la hora de formular las condiciones de contacto que en el implícito. Además, el coste computacional es mucho menor. Por estas dos razones principalmente está extendido el uso de este tipo de método en simulaciones de impacto, además de otras muchas de estado transitorio y no linealidad. [11].

El periodo de tiempo será de 2 segundos. Este tiempo será suficiente para que ocurra el impacto entre el rodillo y el percutor y permita a la horquilla estabilizarse. De hecho, el impacto en sí ocurre en torno a 0.7 s (como se indicará posteriormente) después de iniciarse la simulación.

El resto de parámetros no hay que modificarlos, excepto la opción *Mass Scaling* (Ilustración 32). En realidad, no se tiene porqué modificar este último, aunque el hecho de hacerlo permite disminuir el tiempo de cálculo de la simulación.

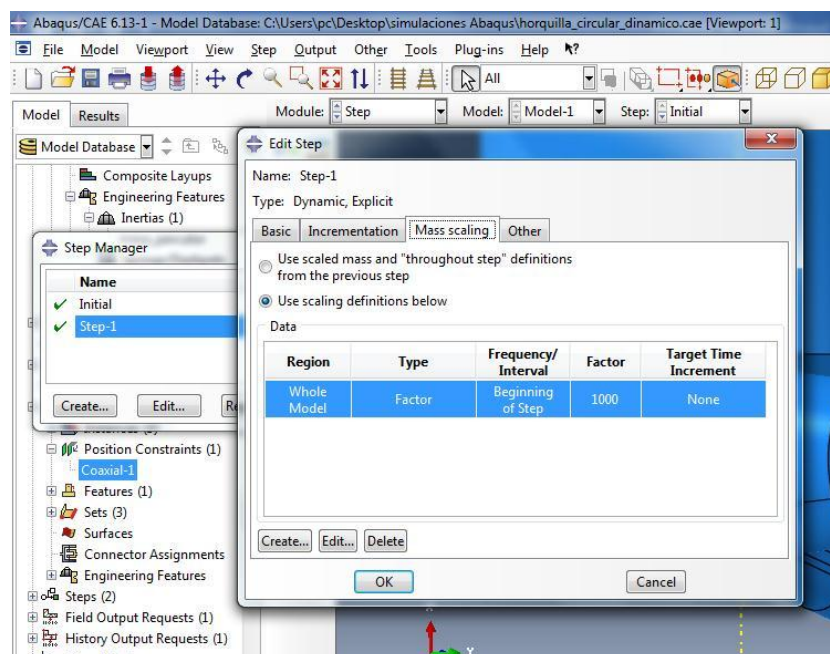


Ilustración 32. Mass Scaling

Mass Scaling se usa para incrementar la eficiencia del análisis. Lo que hace básicamente es variar la densidad de los elementos pequeños para reducir así el incremento de tiempo de simulación estable. [11].

El único problema de esta técnica es que se necesitan unos datos reales para ser capaz de comprobar que la mejora de la eficiencia computacional no ha afectado a la precisión de los resultados.

Para ello, se ha utilizado el procedimiento de *Automatic Mass Scaling*, lo cual permite que los resultados obtenidos sean bastante precisos aumentando mucho la velocidad de cálculo de la simulación. [11].

El siguiente paso es la configuración de la interacción entre los cuerpos en el módulo *Interaction*. En este tipo de simulaciones la configuración de este módulo determinará si la simulación empezará a ejecutarse o existirán errores. Es el módulo más importante, ya que el comportamiento de unas piezas dependerá del de otras, con lo cual, hay que definirlo correctamente.

Primero se crearán las propiedades del contacto entre el percutor y el rodillo en *Interaction Property*. El tipo de interacción será *Contact*, puesto que es lo que se está analizando (Ilustración 33).

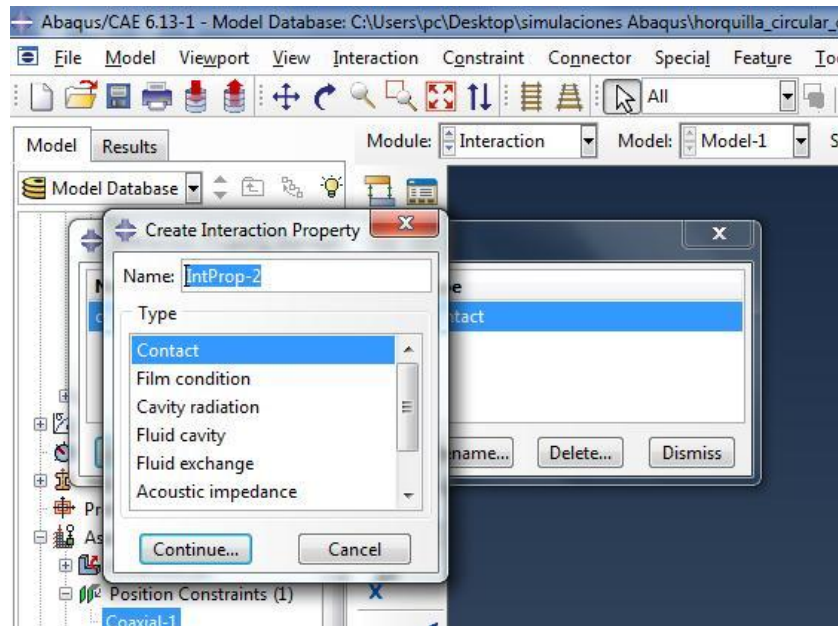


Ilustración 33. Propiedades de contacto percutor-rodillo

En este contacto hay que definir un comportamiento normal (*Normal Behavior*) y otro tangencial (*Tangential Behavior*).

El contacto normal se definirá como “*Hard*” *Contact* (Ilustración 34) y se permitirá la separación de ambos cuerpos al chocar, percutor y rodillo, es decir, existirá un rebote. Para permitir la separación de ambos cuerpos se marca la opción de *Allow separation after contact*.

La razón de definir el contacto normal como un contacto duro es debido a que los cuerpos que interaccionan son sólidos rígidos, es decir, no se deformarán (rodillo y percutor).

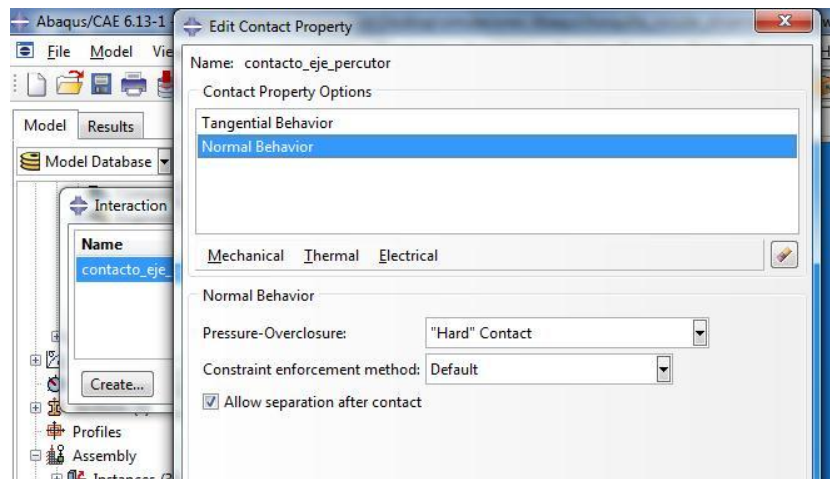


Ilustración 34. Comportamiento en la dirección normal del choque

En cuanto al comportamiento tangencial hay que definirlo con formulación tipo *Penalty* (Ilustración 35) con un coeficiente de fricción de 0.2.

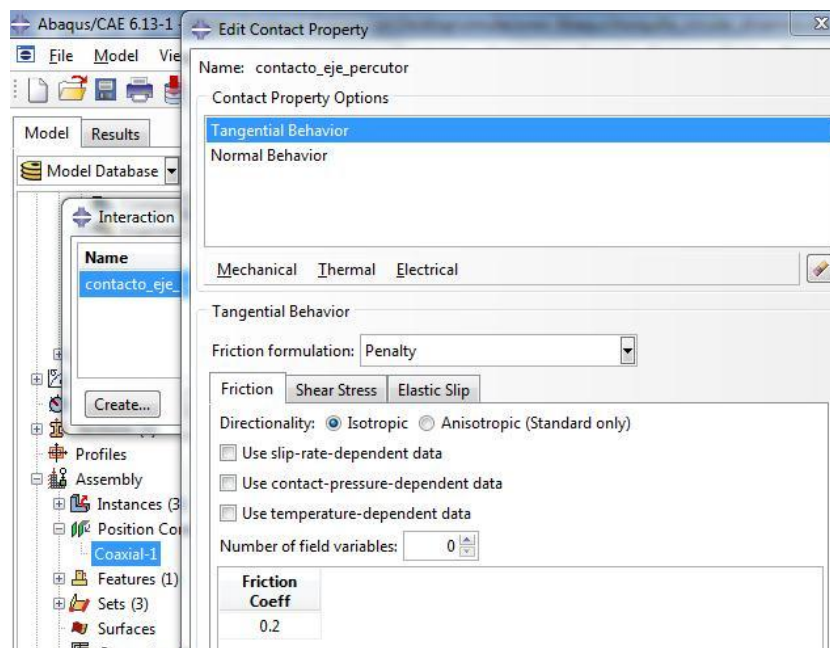


Ilustración 35. Comportamiento en la dirección tangencial del choque

Se usa la formulación de tipo *Penalty* porque es la utilizada de manera general para la mayoría de los problemas de contacto. Se puede decir que este tipo de formulación define una fricción tangencial básica.

El valor del coeficiente de fricción es 0.2 porque para simulaciones en las que aparece comportamiento tangencial en la fricción, tal es el caso de un impacto, por experiencia, este valor es el idóneo.

Una vez definido el comportamiento del contacto, hay que crear el contacto propiamente dicho. Esto se lleva a cabo a través de la opción *Create Interaction*.

Cuando se crea la interacción, simplemente hay que imponer, en *Global property assignments* (Ilustración 38), las propiedades de interacción creadas anteriormente.

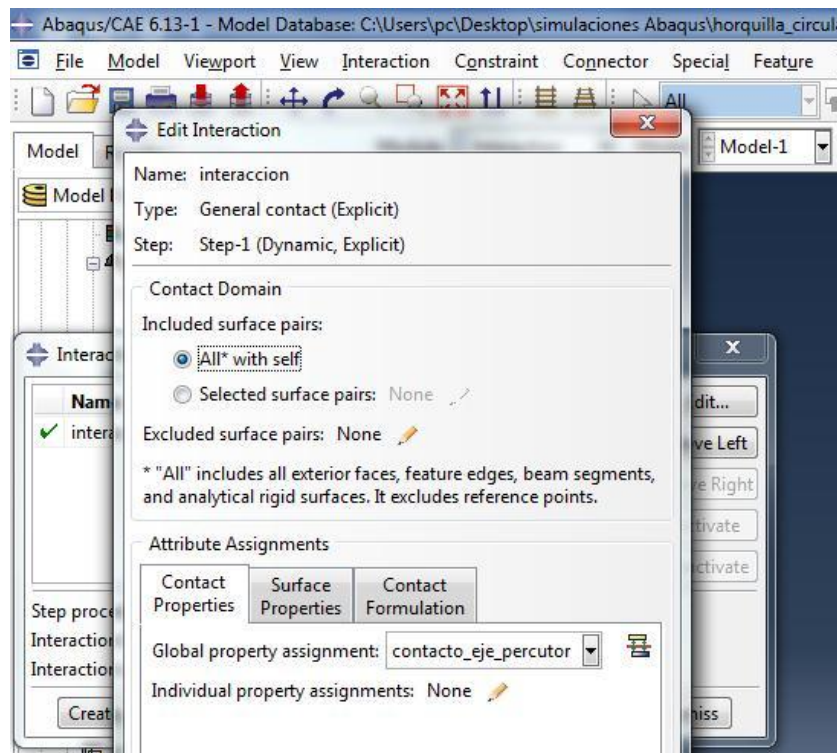


Ilustración 36. Interacción entre rodillo y percutor

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta es que cuando se inicia la ejecución de la simulación, la interacción sea creada en el paso 1 (Ilustración 37), es decir, que inicialmente los cuerpos no estén en contacto. Si esto no se hace de esta manera, aparecerán problemas y mensajes de error que no permitirán ejecutar la simulación.

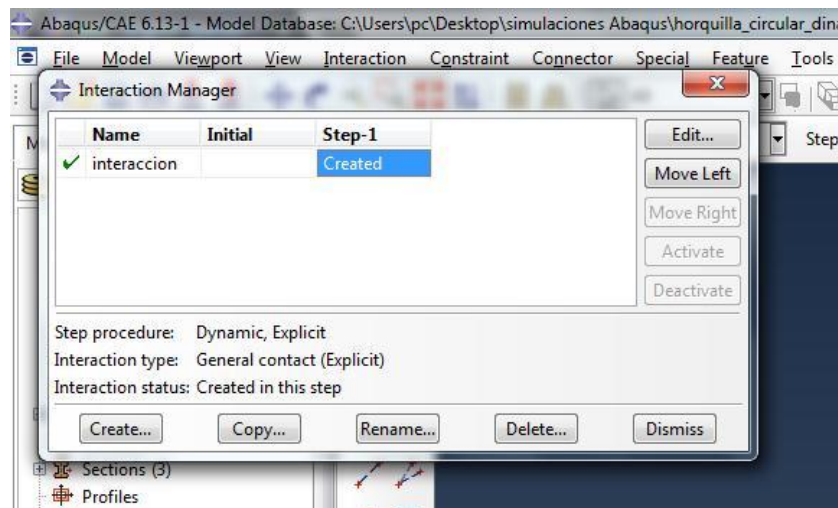


Ilustración 37. Inicialización de las propiedades de la interacción

El último aspecto a definir en este módulo es el *Constraint*. Como ya se ha comentado anteriormente, la palabra constraint significa restricción. Esto quiere decir que aquí se va a definir la unión de la horquilla con el rodillo, así como que los cuerpos sean rígidos.

Anteriormente se dijo que aún faltaba anclar el movimiento del rodillo en el eje OY. La unión de la horquilla con el rodillo se definirá con una restricción tipo *Tie* (Ilustración 38).

Este tipo de restricción simula una soldadura entre ambos cuerpos, es decir, cuando el percutor golpeé el rodillo, éste último se desplazará y, al estar soldado a la horquilla, ésta hará el mismo movimiento que el rodillo, siguiéndolo.

La razón real para colocar el rodillo es para que el percutor no deforme la horquilla al golpear. Además, a la hora de simular, es más fácil que el contacto sea entre cuerpos rígidos, evita problemas de inestabilidad, así como tiempo de simulación.

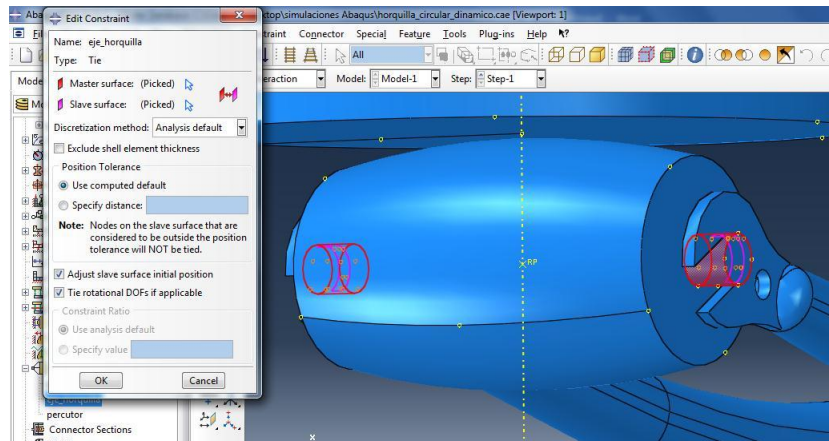


Ilustración 38. Restricción de interacción entre rodillo y horquilla

A la hora de definir la restricción de soldadura hay que definir una superficie que actúe como maestra (*Master surface*) y otra que actúe como esclava (*Slave surface*). La superficie maestra será la que se mueva y la esclava será la que siga a la superficie maestra. Esta última será la superficie de los bornes del rodillo, pues será el que se mueva por la acción del impacto del percutor. La superficie esclava será la interior de las cogidas de la horquilla, ya que ésta tiene que seguir el movimiento del rodillo.

A la hora de definir las superficies hay que tener mucho cuidado con elegir superficies que estén en contacto en su totalidad, ya que de lo contrario daría problemas.

Una vez hecho esto, se definen tanto el percutor como el rodillo como sólidos rígidos. Para ello se emplea la restricción *Rigid body* (Ilustración 39).

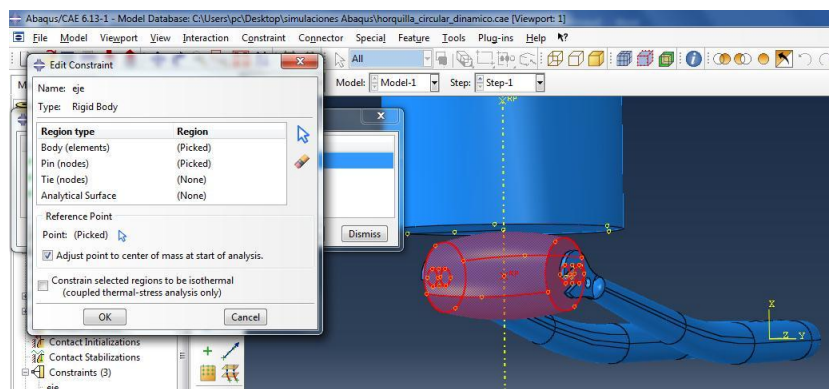


Ilustración 39. Definición de percutor y rodillo como rígidos

Para definir el cuerpo rígido hay que seleccionar la pieza deseada dos veces, es decir, una vez para seleccionar los elementos y la otra para seleccionar los nodos. También es imprescindible seleccionar un punto de referencia a dicho cuerpo, que será su centroide. Esta es la razón por la que anteriormente se definió un punto de referencia que actuara como centroide para cada cuerpo rígido.

Finalmente se marca la opción *Adjust point to center of mass at start of analysis*, con el fin de que no aparezca inestabilidad durante la simulación.

Una vez acabada la configuración de este módulo, hay que configurar el módulo *Load*, que será donde se impongan las restricciones de los movimientos, así como la definición del resto de parámetros de inicio de la simulación.

En la opción *Boundary Conditions* se impondrán los movimientos que deberán tener, tanto el rodillo como el percutor, así como el empotramiento en el eje de la horquilla (Ilustración 40).

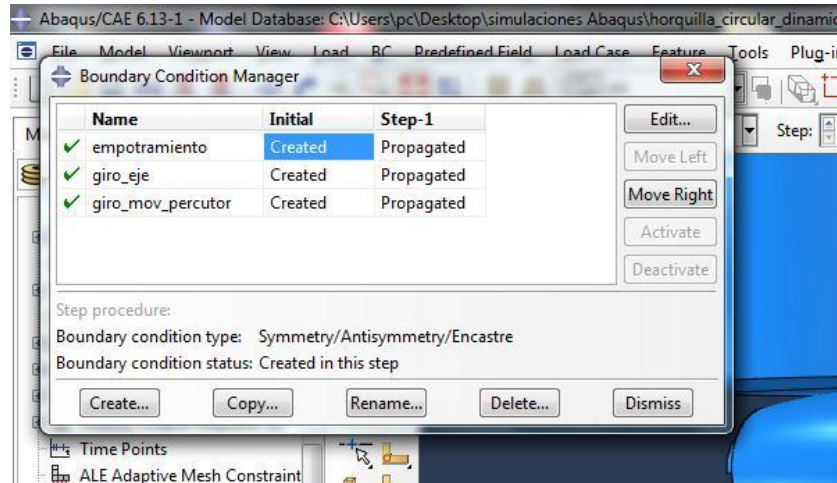


Ilustración 40. Condiciones de contorno del modelo

El empotramiento se definirá exactamente igual que en la simulación anterior. En cuanto al movimiento del percutor, sólo se le permitirá en la dirección *OX*, mientras que, al rodillo, la única restricción de movimiento será el giro, permitiéndole la translación en cualquier dirección. Estas restricciones del movimiento hay que crearlas en el paso de tiempo inicial y propagarlas hasta el paso de tiempo final (Ilustración 41).

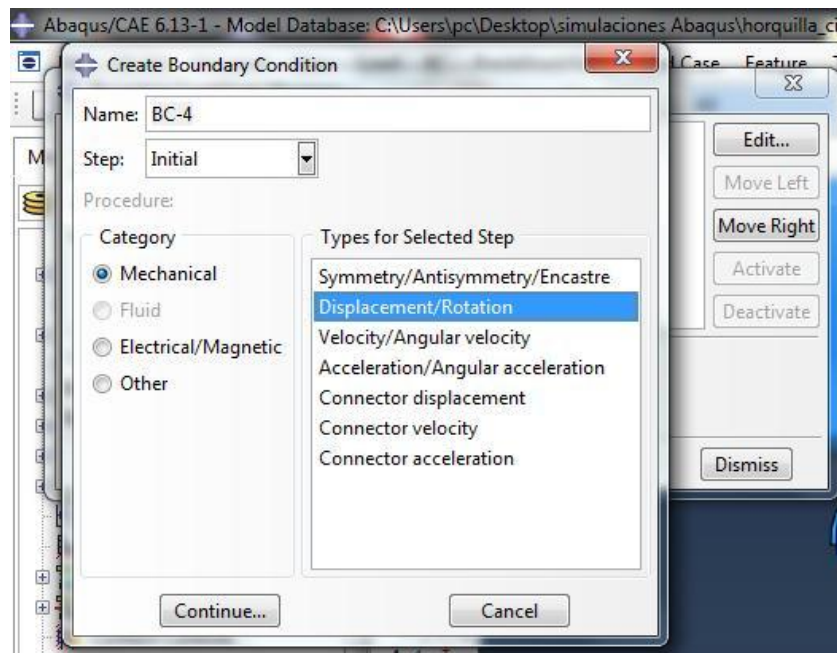


Ilustración 41. Creación de las condiciones de contorno

Para implantar el movimiento al rodillo y al percutor se elegirá la opción de *Displacement/Rotation*. En el caso del rodillo se dejan sin marcar sólo las casillas de traslación para permitir el movimiento en esas direcciones (Ilustración 42).

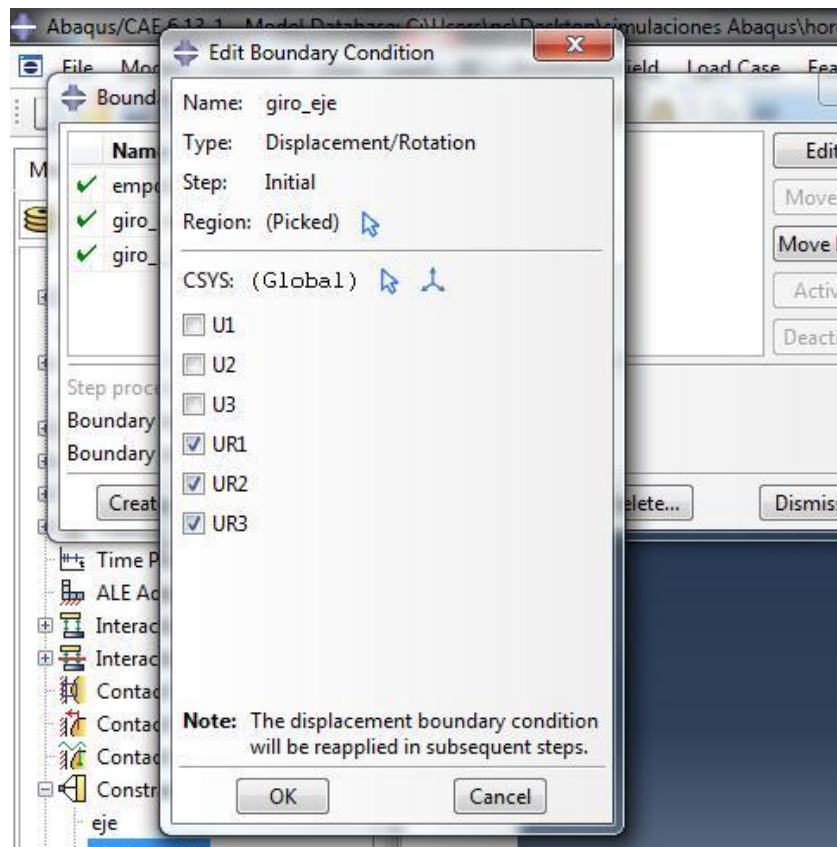


Ilustración 42. Restricción de giro del rodillo

En cuanto al percutor sólo se desmarcaría la casilla *U1* para permitir el movimiento sólo en la dirección *OX*.

Para definir las regiones de los movimientos implantados se hace todo sobre el centroide de los cuerpos rígidos. Esto es muy importante, ya que, de lo contrario, aparecerán problemas a la hora de ejecutar la simulación. Se define en: *Region* (Ilustración 42).

Finalmente, en *Predefined Field*, como su propio nombre índice, se predefine un campo de velocidad para el percutor (Ilustración 43). Esta velocidad será la calculada aplicando el principio de conservación de la energía ya comentado anteriormente en el apartado de *Assembly*.

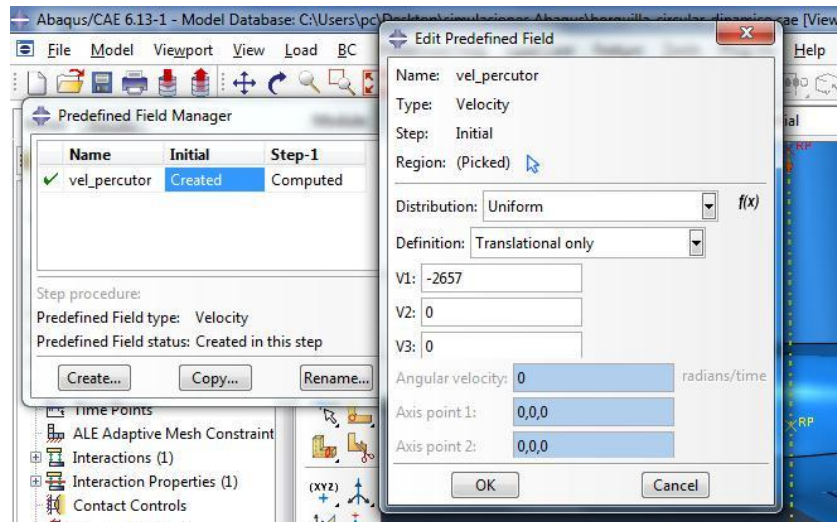


Ilustración 43. Creación del campo predefinido de velocidad del percutor

Este campo también tiene que ser creado en el instante de tiempo inicial y calculado a medida que éste avance.

En cuanto al valor, será implantado en la dirección *OX* negativa, ya que el percutor está bajando. Aquí también se impone en el centroide.

Una vez configurado el módulo *Load*, hay que configurar el módulo *Mesh*.

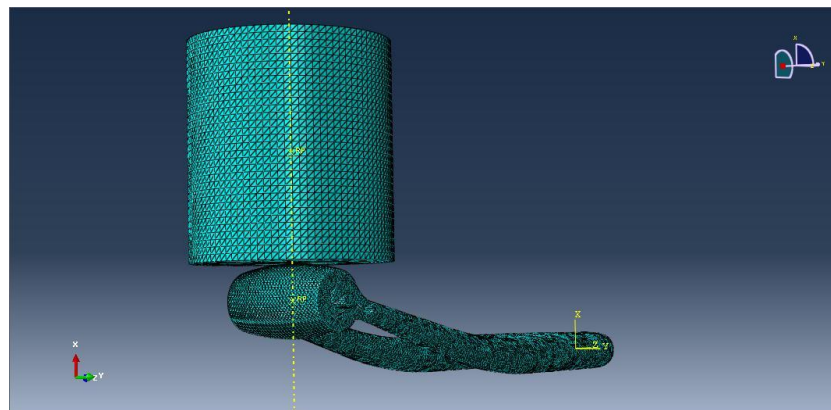


Ilustración 44. Malla del modelo completo

La malla para la horquilla se define de la misma manera que en la simulación anterior.

La malla para el rodillo será tetragonal, ya que va unido a la horquilla y ésta tiene ese tipo de malla. Puesto que se está usando una formulación en elementos finitos, no puede haber variación de los elementos en zonas continuas de las piezas, ya sea unidas o en una misma pieza, debido a inestabilidad. Esto ya se comentó en el análisis de la pieza con cargas puntuales (apartado 4.1.1).

La malla del percutor también estará formada por elementos tetraédricos porque contactará con el rodillo, el cual tendrá este tipo de elementos por la razón comentada anteriormente.

La verificación de la malla de la horquilla mostrará las mismas advertencias, tanto para la horquilla de sección circular como para la de sección elíptica, por lo tanto, no se mostrará en este apartado para no resultar redundante.

En cuanto a la verificación de las mallas del percutor y del rodillo, respectivamente, no se obtiene ninguna advertencia para ninguna de las dos, es decir, son mallas perfectas.

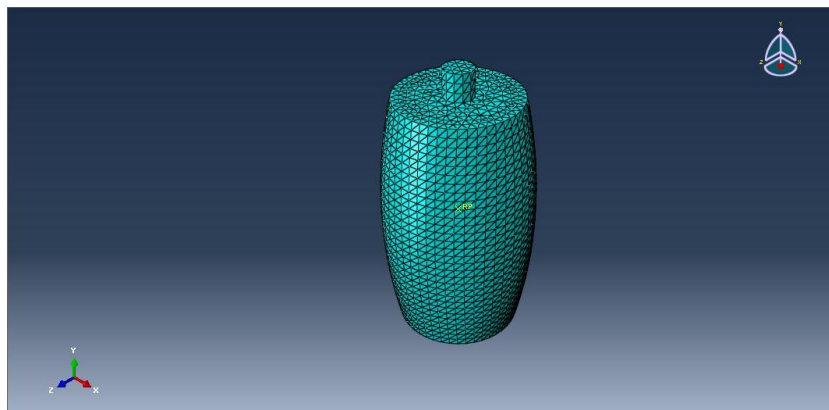
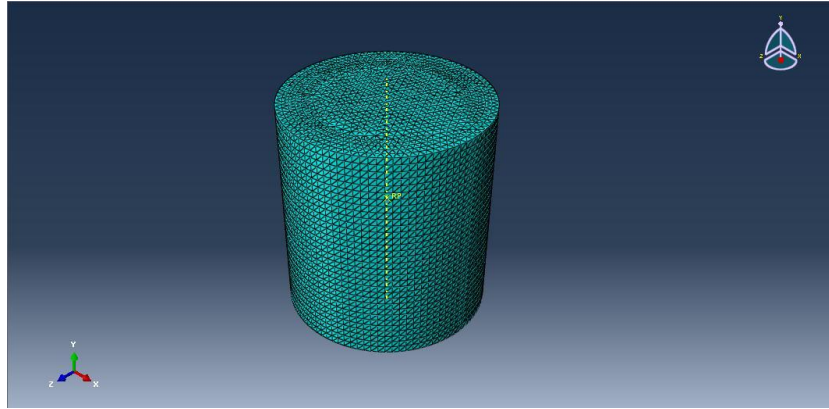


Ilustración 45. Malla del rodillo

```
Part: pieza_eje-1  
Number of elements : 3730, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 0 (0%)
```

Ilustración 46. Análisis de la malla del rodillo

**Ilustración 47.** Malla del percutor

```
Part: percutor  
Number of elements: 9508, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 0 (0%)
```

Ilustración 48. Análisis de la malla del percutor

La malla del rodillo se podría haber hecho más basta por el centro del mismo, ya que, al ser cuerpo rígido, no hacen falta muchos nodos para definirlo, es más, sólo bastaría con el centroide. Sin embargo, puesto que está definido como tal, es como si fuera una placa, es decir, por dentro está hueco (no existen nodos interiores). Esto hace que los nodos sean solamente superficiales y, tanto el coste computacional como el tiempo de simulación no se verán muy afectados ante una variación progresiva de la malla (basta en el centro y más fina hacia los bornes).

Definida la malla, simplemente queda ejecutar la simulación creando un *Job* tal y como se explicó en la simulación anterior.

4.3. Análisis a fatiga

Este ensayo comprobará la resistencia que tiene la horquilla ante un esfuerzo cíclico de carga dinámica sin precarga establecida, tal y como indica la norma [1], [2].

La norma, tal y como se muestra en (apartado 1.2) establece que, en el caso de bicicletas de montaña, la carga a aplicar es de $\pm 650\text{ N}$, mientras que, para bicicletas de paseo, dicha carga disminuye a $\pm 450\text{ N}$; siendo la frecuencia de ciclado en ambos casos de 25 Hz y 100000 el número de ciclos a aplicar.

La condición para la superación del ensayo es que la flecha máxima en los puntos de aplicación de los esfuerzos no debe exceder del 20% del valor inicial, es decir, del valor que se obtendría si se hiciera dicho ensayo como estático con las cargas mencionadas anteriormente.

A continuación, se detallará cómo este análisis se ha configurado en el software *Abaqus 6.13*.

En esta simulación, igual que ocurría en el caso de la simulación estática, sólo son necesarias las geometrías de las horquillas (circular y elíptica), ya que la carga también será impuesta de forma ficticia.

Dichas geometrías son las mismas que se crearon para la simulación del ensayo de flexión estática con *Catia V5* (apartado 3.1).

Para la definición de las propiedades de los materiales se procede exactamente igual que en el ensayo estático de flexión, puesto que son las mismas (apartado 4.1.1), (Tabla 1), (Tabla 2).

Una vez creados los materiales hay que ensamblar todas las piezas creadas e importadas en una misma región de trabajo. En este caso, puesto que la pieza del

ensamblaje sólo es la horquilla, igual que en la simulación del ensayo estático de flexión, se hace tal y como se explicó anteriormente para aquél (apartado 4.1.1).

Cabe destacar un paso auxiliar a la simulación del ensayo estático. En esta simulación, concretamente en este módulo *Assembly* se creará un set (Ilustración 49), el cual será un punto situado en el extremo de la cogida, con el fin de ver los resultados del desplazamiento y carga en dicho punto al final de la simulación y, de esta manera, comprobar si la horquilla ha sido sometida a esfuerzo cíclico o no.

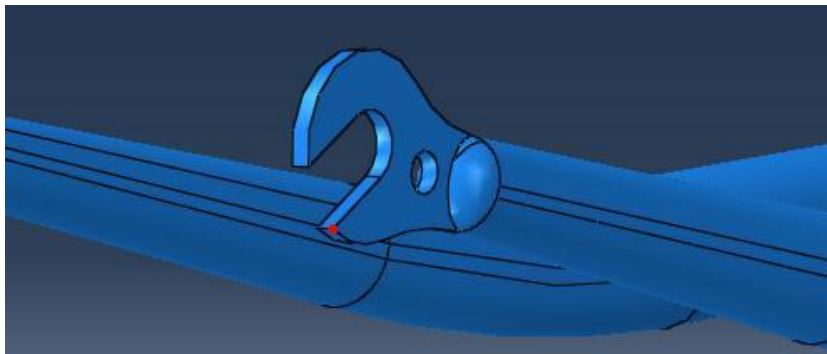


Ilustración 49. Ubicación del set creado como punto

El siguiente módulo a rellenar es el módulo *Step* (Ilustración 50). Aquí sí existe diferencia respecto a la configuración de dicho módulo en el ensayo estático de flexión.

Puesto que esta simulación es cíclica, ya que es una simulación de fatiga, se elige un tipo de paso de tiempo *Direct cyclic*. Dentro de las opciones que presenta hay que modificar algunas para adaptarlas a las condiciones de la simulación que se está configurando.

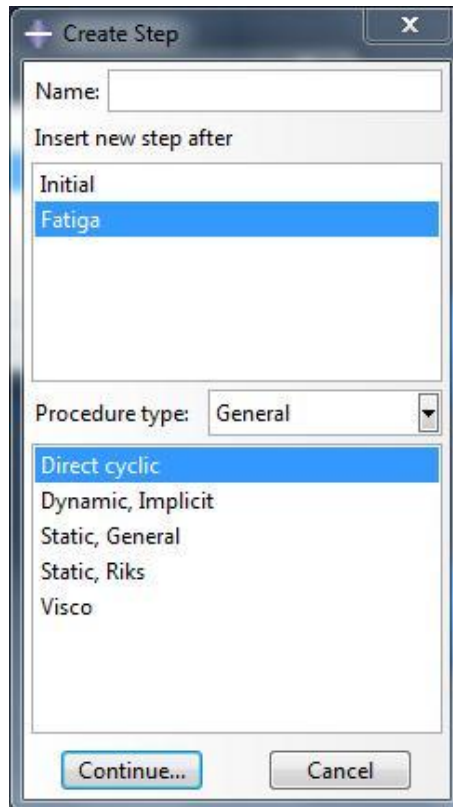


Ilustración 50. Tipo de Step creado en fatiga

En la opción *Basic* el periodo de tiempo (*Cycle time period*) es de 0.04 s, que es el tiempo de duración de un ciclo (Ilustración 51). Este valor se obtiene a partir de la frecuencia como:

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{25} = 0.04 \text{ s} \quad 21)$$

Siendo T el periodo.

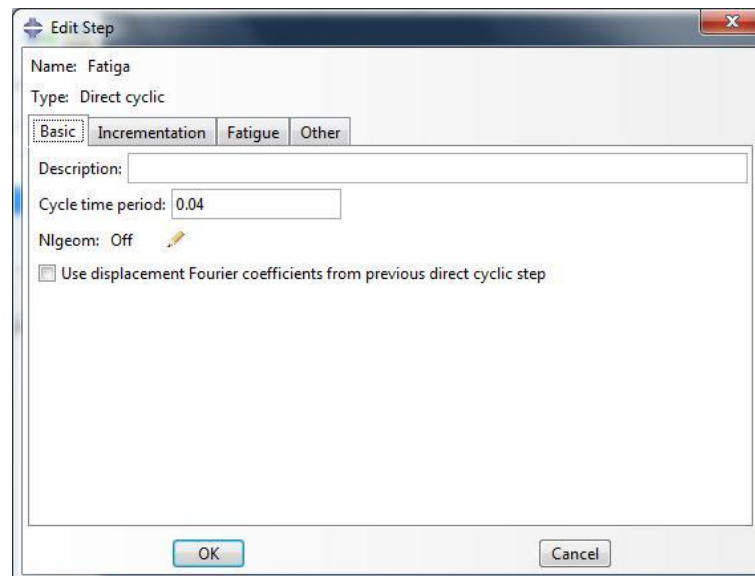


Ilustración 51. Configuración del periodo de tiempo

En la pestaña *Incrementation* se fija el tamaño del incremento (*increment size*) con el valor mínimo en que se desee dividir un ciclo. En este caso, se ha elegido 0.005, es decir, que el periodo quedará dividido en 10 partes iguales. La simulación calculará datos en cada uno de esos 10 puntos del ciclo.

Los términos de Fourier van de 0 a 100 y se establecen en la mitad con un incremento de 5.

En cuanto al número de iteraciones, se establecerá en 2, ya que puede ser que en 1 iteración no encuentre la solución (Ilustración 52).

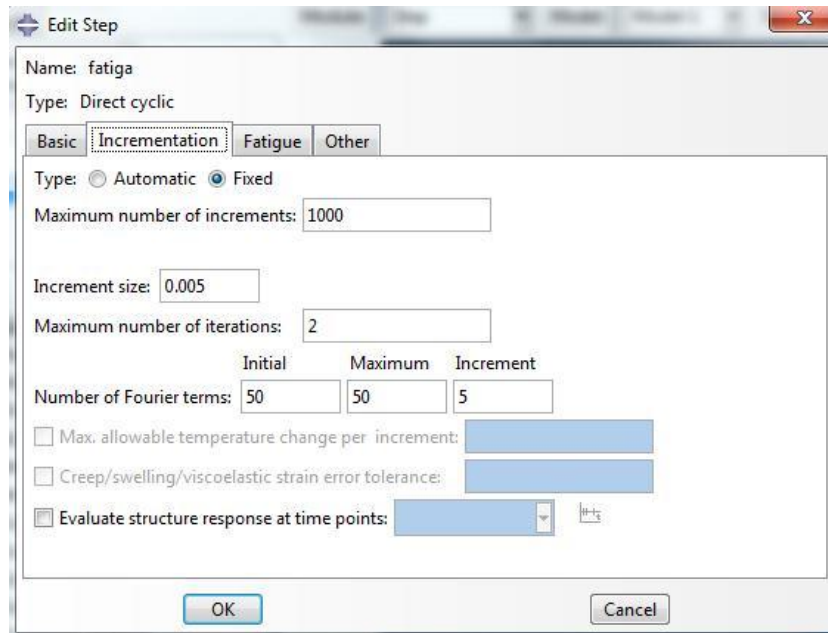


Ilustración 52. Configuración de la división del periodo de tiempo

En la configuración de fatiga (*Fatigue*), el tamaño máximo del incremento de ciclos define cada cuanto tiempo la simulación comprobará si se producen cambios en el ciclo. Esto quiere decir que, si se fija el valor en 5000, por ejemplo, la simulación considera que desde el segundo ciclo hasta el ciclo 5000, todos son iguales que el primero y, que desde el 5001 hasta el 10000, en ese intervalo de ciclos, todos son iguales que el ciclo 5000, y así sucesivamente hasta el número de ciclos del ensayo (apartado 1.2.3.1). También comentar que *Abaqus 6.13* analiza por defecto la mitad de ciclos impuestos en este apartado.

Para el máximo número de ciclos (*maximum number of cycles*) se fijará el de la norma ($1 \cdot 10^5$).

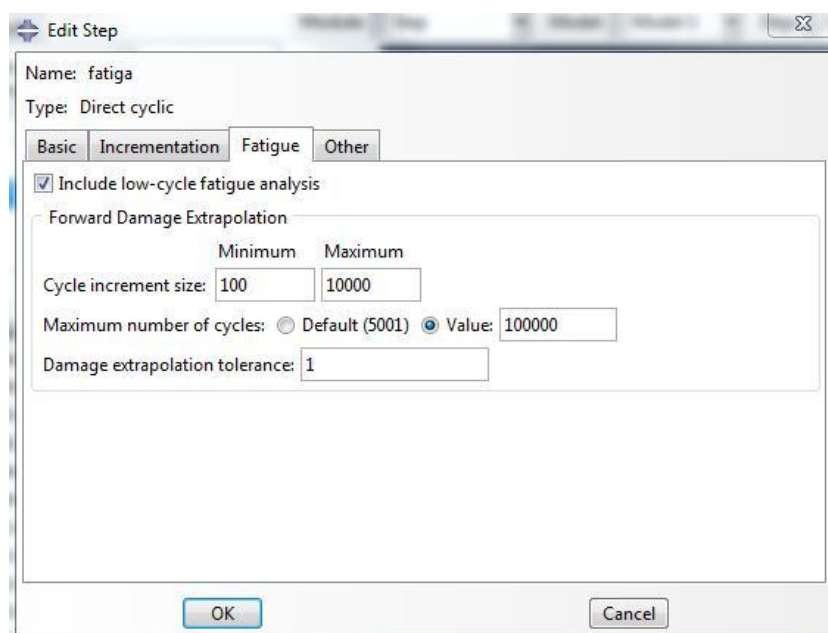


Ilustración 53. Determinación del número de ciclos

Como es obvio, antes de este paso se crea automáticamente otro, que es el paso inicial, es decir, el tiempo justo en el instante anterior de que comience la simulación ($t=0$).

Dentro de este módulo también se elige qué variables se quieren calcular *History Output Requests* (Ilustración 54) y cuáles se desean mostrar *Field Output Requests* en el post-procesado, tal y como se comentó en el pre-procesado de la simulación del ensayo estático de flexión (apartado 4.1.1). Sin embargo, aquí no se elige el modelo completo, sino simplemente el set creado como punto.

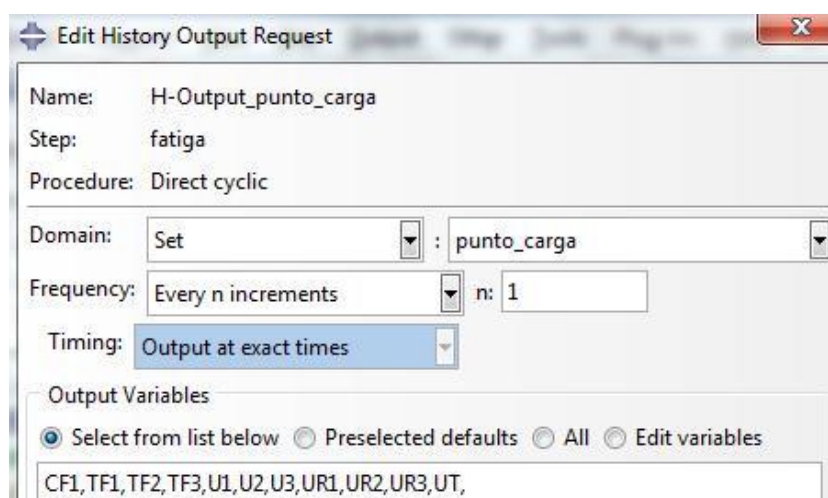


Ilustración 54. Determinación para que los cálculos sean sobre el Set

En la opción *Field Output Request* se hace exactamente igual que en la opción *History Output Request*.

Puesto que sólo existe un único cuerpo en el ensamblaje, no existirá ningún tipo de interacción a definir.

En cuanto a la configuración de la carga en esta simulación, difiere del resto debido a que hay que definir una amplitud, la cual establecerá un ciclo de carga que es lo que caracteriza al ensayo de fatiga.

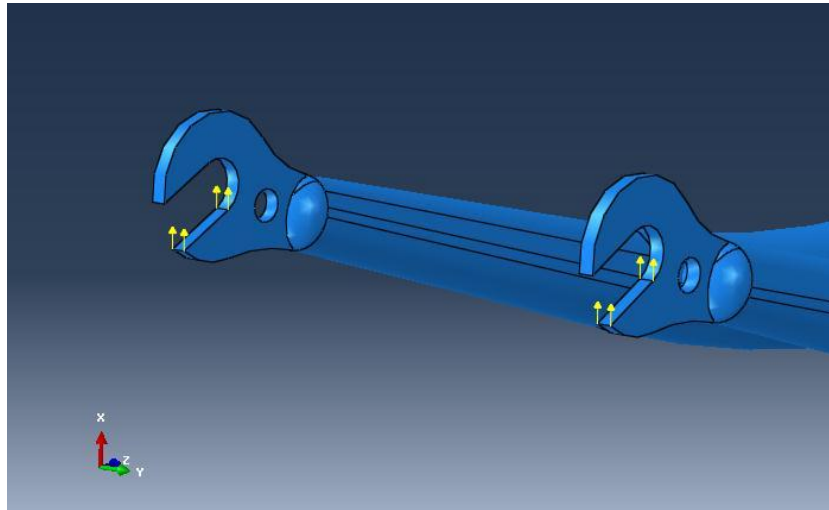


Ilustración 55. Carga impuesta en ensayo de fatiga

Tal y como se muestra en la Ilustración 55, la carga está aplicada en el eje OX, sin embargo, resulta indiferente el sentido de la misma, puesto que irá variando dependiendo de la amplitud establecida, es decir, que da igual si la horquilla comienza el ciclado hacia arriba o hacia abajo.

De igual modo que en la configuración de la simulación del ensayo de flexión estática, hay que imponer la carga teniendo en cuenta que el valor impuesto es el de una sola de las 8 que aparecen en la imagen.

Dicha carga se definirá en el apartado *Edit Load* (Ilustración 56), cuyo valor será el correspondiente dependiendo de si es para horquilla destinada a bicicleta de paseo o de montaña.

Es muy importante seleccionar en el apartado *Amplitude* de la configuración de la carga la amplitud creada, ya que sino la simulación sería como un ensayo estático de flexión simple.

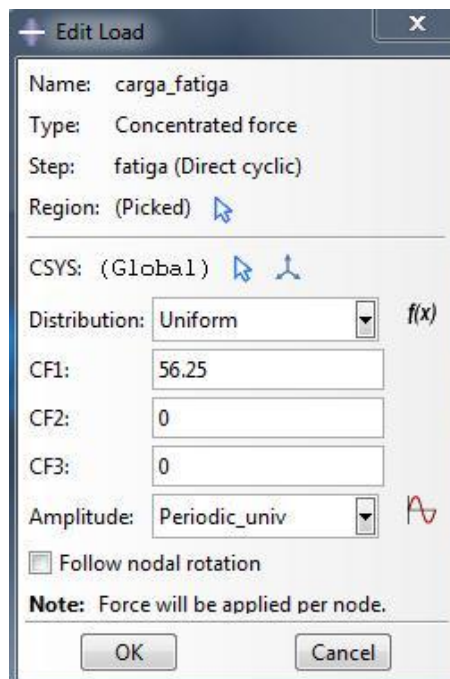


Ilustración 56. Imposición del valor de la carga y de la amplitud

La amplitud seguirá una función seno debido a que es la función que mejor se adapta a una aplicación progresiva y cíclica de la carga, ya que tiene muy poco ruido y, como consecuencia, no existe un cambio brusco de la carga a lo largo del ciclo (Ilustración 57).

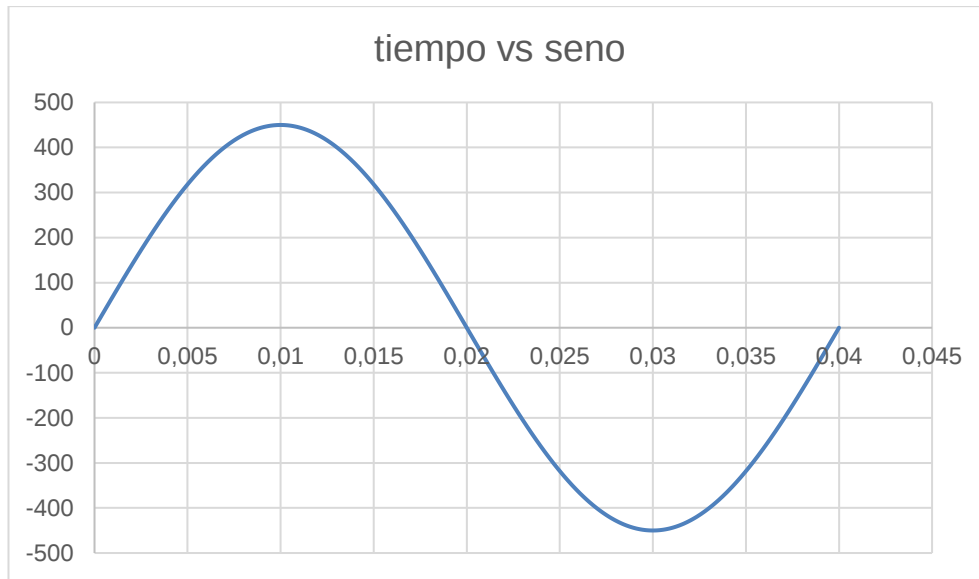


Ilustración 57. Gráfica de carga senoidal respecto del tiempo

El tipo de amplitud tiene que ser *Periodic* (Ilustración 58), ya que se han hecho pruebas con amplitudes diferentes y los resultados obtenidos no han sido buenos, debido a que se obtenían unas deformaciones por debajo de las de en un ensayo estático de flexión para la misma carga y, como mínimo, en el ensayo de fatiga, se deberían alcanzar esas deformaciones, incluso mayores debido a que ahora afecta el hecho de que la carga se está aplicando cíclicamente, lo cual, aumenta el daño a la pieza y, con ello, la deformación.

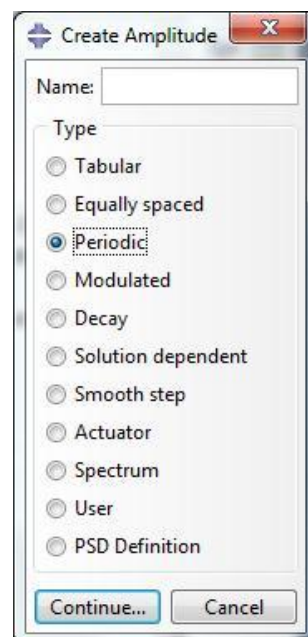


Ilustración 58. Tipo de amplitud

Una vez elegido el tipo de amplitud, hay que configurarla (Ilustración 59).

	A	B
1	0	1

Ilustración 59. Configuración de la amplitud

Los datos que aparecen en las columnas *A* y *B* corresponden al coseno y al seno, respectivamente, ya que se trata de series de Fourier. Como se está definiendo una onda senoidal, por esta razón *A* es nulo y *B* es 1. [11].

También es muy importante introducir la frecuencia en *Circular frequency* dentro de la configuración de la amplitud (Ilustración 59). Ese valor de frecuencia se da de introducir en [rad/s], es decir:

$$\omega = 2\pi f \quad 22)$$

Siendo f [Hz] la frecuencia impuesta por el ensayo (apartado 1.2.3.2).

Tanto el tiempo inicial del ciclo como la carga son nulos, ya que la horquilla no está precargada cuando comienza el ensayo.

Las condiciones de contorno de este problema son las mismas que en el caso de la simulación de flexión, simplemente un empotramiento total en el eje de dirección (Ilustración 18).

Las características a definir de dicha condición de contorno se hacen tal y como se vio en la configuración de la simulación del ensayo de flexión (apartado 4.1.1).

Por último, antes de ejecutar la simulación, hay que configurar el paso más importante, la malla. Este paso también es idéntico al de la simulación del ensayo de flexión (apartado 4.1.1) ya que el sólido es el mismo y, por ende, habrá que mallarlo de igual forma para que se adapte bien a todas las zonas.

Todo lo explicado anteriormente de cómo se debe configurar una simulación de este tipo ha sido para la horquilla de paseo, a la cual hay que aplicar una carga de $\pm 450\text{ N}$ como ya se comentó anteriormente (apartado 1.2.3.1).

En el caso de una bicicleta de montaña, la configuración es exactamente la misma. La única diferencia es que a la hora de imponer la carga en el apartado *Edit Load* ésta será de $\pm 650\text{ N}$, es decir, será un ensayo más restrictivo.

En cuanto a la gráfica de la función seno (Ilustración 57) la única diferencia sería el límite de la carga, que en vez de 450 N sería de 650 N .

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizados todos los análisis, se compararán para los distintos materiales (acero, aluminio y titanio) y para las distintas geometrías (sección circular y elíptica) con el fin de determinar si cumplen o no las especificaciones impuestas por la normativa.

5.1. Análisis estático de flexión

Este ensayo viene explicado con todo lujo de detalles en el (apartado 1.2). Tanto en las horquillas destinadas a bicicletas de paseo como de montaña, la deformación permanente no debe sobrepasar los 5 milímetros.

Se comprobará si existen diferencias entre hacer las simulaciones con y sin propiedades plásticas del material, así como de si se aplica la carga en puntos o se aplica como carga de presión sobre una superficie.

A continuación, se detallan todos y cada uno de los ensayos.

ACERO

- ***Carga puntual en horquilla circular de acero para bicicletas de montaña sin propiedades plásticas.***

En este caso, la deformación de la horquilla ante una carga puntual de 1500 N repartida simétricamente entre los dos brazos de la misma (Ilustración 1) es de -5.62 mm en el eje OX (dirección de la carga aplicada) tal y como se muestra en la Ilustración 60, ya que el desplazamiento en los ejes OY, OZ no es de interés, puesto que prácticamente son 0. También existe una deformación de $1.016 \cdot 10^{-2}$ mm en la zona cercana al tubo de dirección debido a la conservación de la cantidad de movimiento angular.

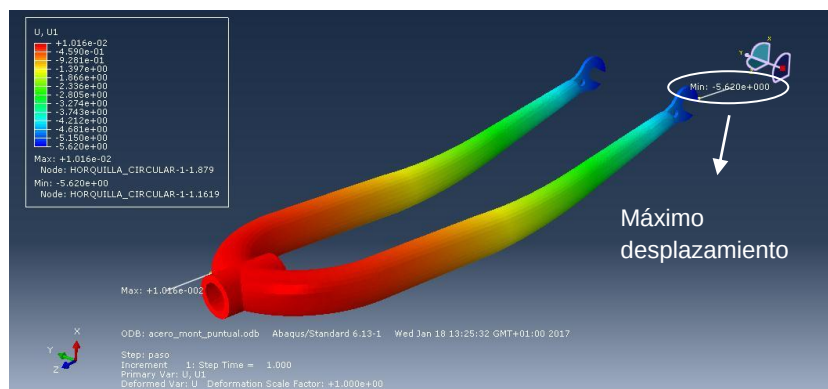


Ilustración 60. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga puntual

En cuanto a la tensión, se obtiene una tensión máxima de 412.2 MPa (Ilustración 61). Teniendo en cuenta que el acero escogido tiene un límite elástico de 200.2 MPa, plastificará, por lo tanto, habrá que hacer la simulación de este ensayo teniendo en cuenta las propiedades plásticas, tal y como se comentó anteriormente, para ver si existen diferencias. De esta forma, al no definir las propiedades plásticas del material, el análisis rigidiza el componente, haciendo por tanto que el valor de la tensión en el empotramiento supere en gran medida al del límite de fluencia (algo más del doble).

Es evidente que las tensiones máximas se van a dar en las zonas cercanas al empotramiento, ya que es donde menos libertad de movimiento tiene la horquilla y, por tanto, donde menos tensiones puede liberar, es decir, la zona con mayores desplazamientos será la de menor tensión y viceversa. Además, es la zona más alejada de aplicación de la carga, por lo que el momento es mayor.

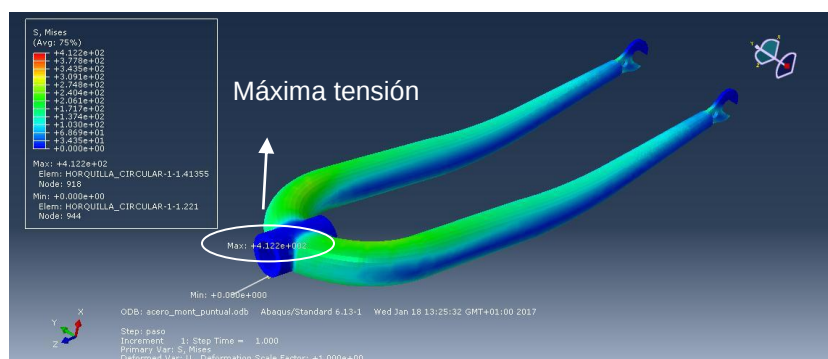


Ilustración 61. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga puntual

- ***Carga de presión en horquilla circular de acero para bicicletas de montaña sin propiedades plásticas.***

En esta simulación se obtiene un desplazamiento máximo de -5.437 mm en las cogidas (Ilustración 62), por lo que no cumple las exigencias de la normativa (apartado 1.2.1.1). También existe un desplazamiento de $9.888 \cdot 10^{-3}$ mm en las zonas cercanas al empotramiento.

Esta simulación es exactamente igual que la anterior. Sólo existe una diferencia y es el método de aplicación de la carga. Ahora no es una carga puntual, sino que se distribuye sobre la superficie de contacto de las cogidas con el rodillo o eje. Se ve claramente como los resultados obtenidos son prácticamente idénticos. La diferencia observada es tan solo de 0.183 mm.

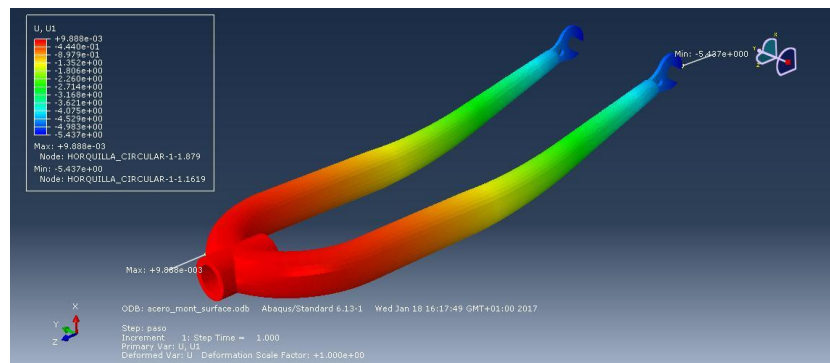


Ilustración 62. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga superficial

Las tensiones obtenidas también son muy parecidas. En este caso, las máximas se dan en las mismas zonas y tienen un valor de 403.7 MPa (Ilustración 63). Por tanto, los resultados son similares a los obtenidos en el caso de la aplicación de la carga como fuerzas puntuales.

Según los resultados obtenidos en lo que respecta al desplazamiento máximo en el extremo de la horquilla y la tensión en el empotramiento, la carga marcada por la normativa puede ser aplicada tanto de forma puntual como de forma superficial.

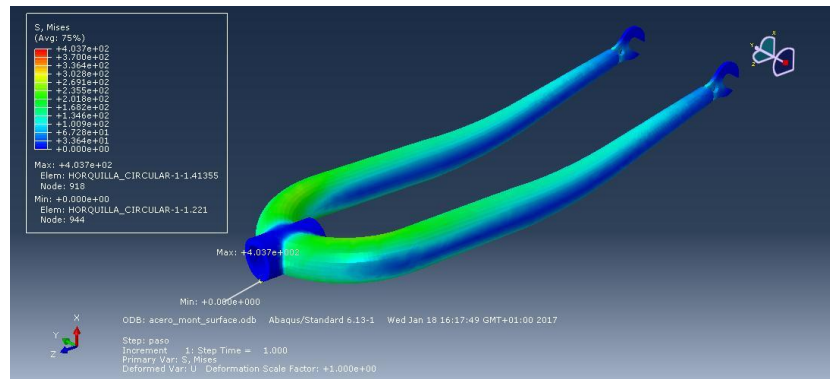


Ilustración 63. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, sólo propiedades elásticas y carga superficial

- ***Carga superficie en horquilla circular de acero para bicicletas de montaña con propiedades plásticas.***

Ahora se llevará a cabo la simulación teniendo en cuenta las propiedades plásticas del material para ver si difiere mucho del caso elástico.

En cuanto al desplazamiento máximo que sufre la horquilla en las cogidas, existe diferencia (Ilustración 64). En este caso es de -6.05 mm. Tiene sentido que el desplazamiento sea mayor, ya que, al considerar propiedades plásticas, se está teniendo en cuenta la fluencia del material en la cual sufre grandes deformaciones, aunque las tensiones que se apliquen sean pequeñas.

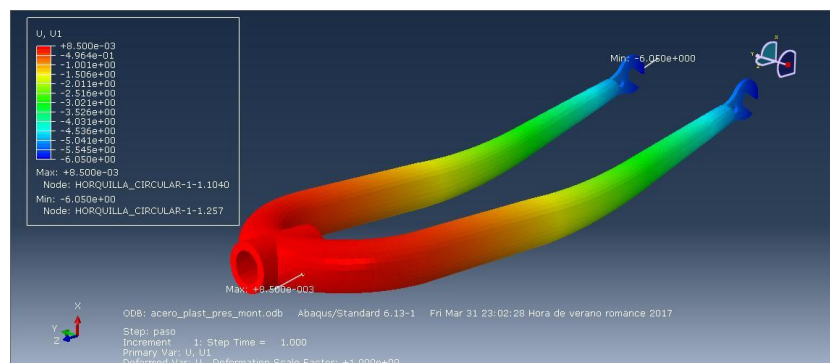


Ilustración 64. Deformaciones en horquilla circular, acero, montaña, con propiedades plásticas y carga superficial

Se comparará ahora la tensión máxima de este caso con el caso elástico.

En la tensión las diferencias son incluso mayores. Cuando el material se considera con propiedades plásticas la máxima tensión, también en la zona cercana al empotramiento, es de 204.5 MPa (Ilustración 65). Aquí se puede comprobar que tan sólo supera al límite elástico en 4.3 MPa, es decir, es mucho menor que la tensión que se obtenía en la simulación del caso elástico. Esto también tiene sentido, ya que al permitir al material que plastifique, éste liberará tensiones, hasta el punto de disminuirlas en más de 200 MPa.

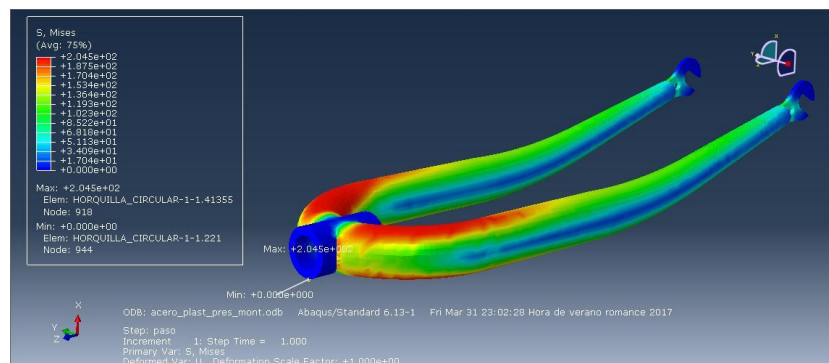


Ilustración 65. Tensiones en horquilla circular, acero, montaña, con propiedades plásticas y carga superficial

Finalmente se concluye que esta horquilla sin suspensión no sería apta, con este material, para una bicicleta de montaña. Es por esta razón que la mayoría de las bicicletas de montaña no utilizan este tipo de horquillas, sino que utilizan horquillas de suspensión con el fin de obtener una mejor adaptación a las irregularidades que presenta el terreno de montaña (Ilustración 66).



Ilustración 66. Bicicleta de montaña

De aquí en adelante, para el resto de simulaciones de este tipo (flexión estática), se incluirán en la configuración de las mismas las propiedades plásticas y, puesto que ya se ha demostrado que con las cargas puntuales se obtienen resultados que no difieren apenas de las simulaciones con cargas sobre la superficie, también se incluirán fuerzas distribuidas sobre la superficie de contacto entre las cogidas y el eje o rodillo (presión).

El hecho de considerar lo comentado en el párrafo anterior es debido a que los materiales definidos y la aplicación de la carga se asemejan más a la realidad y, de esta forma, los resultados obtenidos de las simulaciones deberían ser más parecidos a los obtenidos empíricamente.

- ***Carga en horquilla circular de acero para bicicletas de paseo.***

En el caso de bicicletas de paseo, se obtiene un desplazamiento de -3.627 mm (Ilustración 67), el cual es menor de 5 mm, por lo tanto, esta horquilla construida con este material cumple las especificaciones exigidas por la normativa para bicicletas de paseo en el (apartado 1.2.1.1).

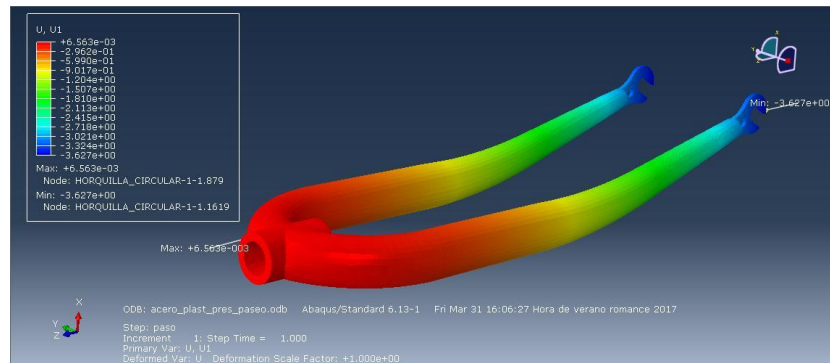


Ilustración 67. Deformaciones en horquilla circular, acero, paseo

Es lógico, ya que la mayoría de las bicicletas de paseo (Ilustración 68) no utilizan horquillas de suspensión.



Ilustración 68. Bicicleta de paseo

La tensión máxima obtenida en esta simulación es de 200.9 MPa (Ilustración 69). Si se compara esta tensión con la obtenida en el ensayo para horquillas de montaña, se tiene que la tensión es prácticamente la misma, sin embargo, sí que hay diferencia en los desplazamientos. Esto es debido a la fluencia ya comentada anteriormente, quedando demostrado que, para pequeñas variaciones de tensión, incluso hay ocasiones en las que es constante, se obtienen grandes deformaciones.

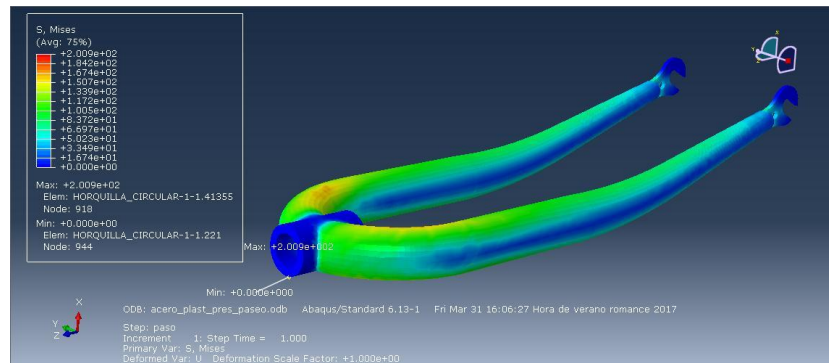


Ilustración 69. Tensiones en horquilla circular, acero, paseo

- ***Carga en horquilla elíptica de acero para bicicletas de montaña.***

En este caso la deformación es de -68.62 mm (Ilustración 70), del orden de 10 veces las deformaciones en el caso de sección circular. Esto puede ser debido al gran intervalo de fluencia que presenta el acero, aunque también sería lógico pensar que la simulación no convergió en unos resultados correctos.

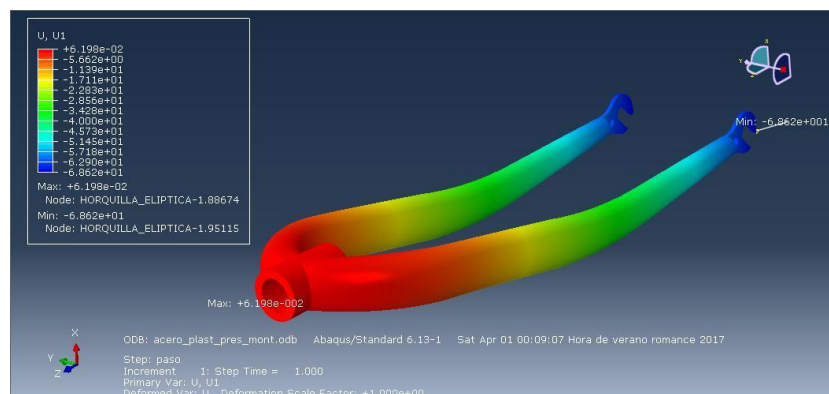


Ilustración 70. Deformaciones en horquilla elíptica, acero, montaña

La tensión máxima es de 486.2 MPa (Ilustración 71), la cual está por encima de la tensión de rotura.

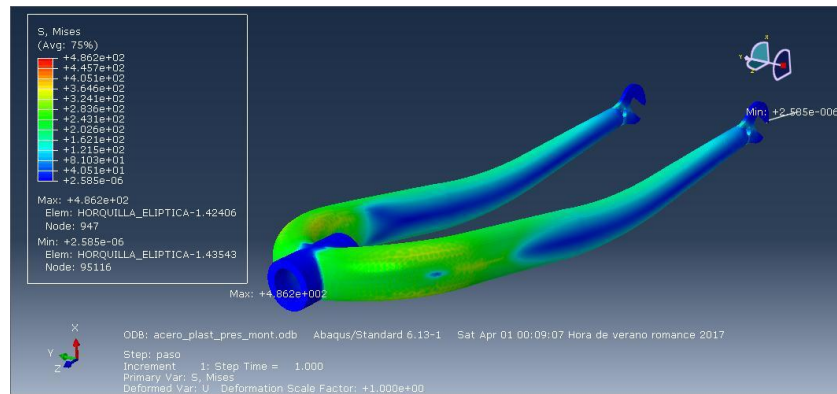


Ilustración 71. Tensiones en horquilla elíptica, acero, montaña

- ***Carga en horquilla elíptica de acero para bicicletas de paseo.***

En este caso la deformación es de -5.101 mm (Ilustración 72), por lo tanto, no es apta para bicicletas de paseo por muy poco.

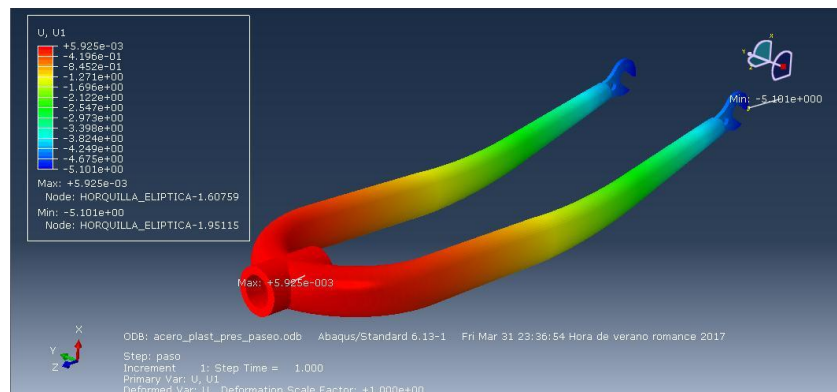


Ilustración 72. Deformaciones en horquilla elíptica, acero, paseo

La tensión máxima es de 368.4 MPa (Ilustración 73). Los resultados obtenidos ahora no coincidirán con un ensayo sólo con propiedades elásticas, ya que esta vez, se supera la tensión de límite elástico y, por lo tanto, la horquilla plastificará sufriendo deformaciones permanentes, no llegando al límite de rotura.

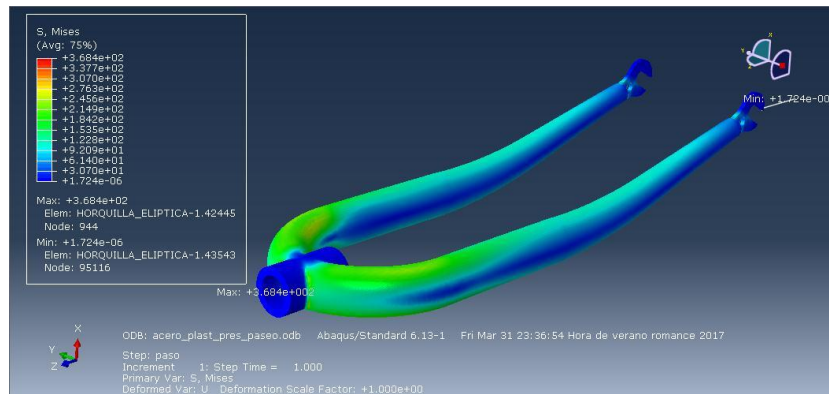


Ilustración 73. Tensiones en horquilla elíptica, acero, paseo

La conclusión a la que se llega con respecto a la comparación entre horquillas de sección circular y de sección elíptica es que las de sección circular sufren menores deformaciones, así como menores tensiones. Esto se puede deber a que la sección circular permite una distribución de los esfuerzos más uniforme que la elíptica. Además, la circunferencia debido a su geometría presenta mejores propiedades en términos de inercia que las correspondientes a una geometría elíptica. Por lo tanto, parece más conveniente emplear una sección circular.

ALUMINIO

• *Carga en horquilla circular de aluminio para bicicletas de montaña.*

El aluminio es un material bastante menos pesado que el acero. Sin embargo, según los resultados de las simulaciones, no tiene suficiente resistencia mecánica y rigidez como para que una horquilla, tanto para una bicicleta de montaña como para una de paseo, cumpla las especificaciones exigidas por la normativa. Simplemente comparando el módulo de Young del acero y del aluminio, 210000 MPa y 70000 MPa, respectivamente, se observa que el del acero es del orden de 3 veces mayor que el del aluminio.

Cuando un material no tiene fluencia quiere decir que justo después de alcanzar el límite elástico, necesita grandes tensiones para poder deformarse. Al contrario que el acero, en el cual después de alcanzar el límite elástico aparece un intervalo de fluencia, hasta que alcanza el endurecimiento, a partir del cual ya hay

que aplicar grandes tensiones para deformar, en el aluminio no existe dicho intervalo.

Se obtiene una deformación de las cogidas de -16.34 mm (Ilustración 74). Obviamente queda muy lejos de la deformación máxima a superar de 5 mm.

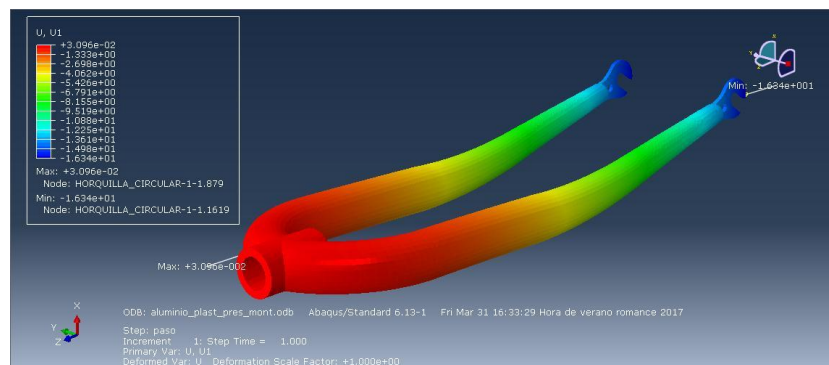


Ilustración 74. Deformaciones en horquilla circular, aluminio, montaña

La tensión máxima que se produce en la horquilla se da, igual que en todos los casos, en zonas cercanas al empotramiento. El valor de ésta es de 302.6 MPa (Ilustración 75).

A diferencia del acero, la tensión supera en 12.6 MPa al límite elástico, por lo tanto, se justifica que se ha alcanzado la zona plástica de endurecimiento por deformación, ya que, según el diagrama tensión-deformación del aluminio no existe zona de fluencia del material.

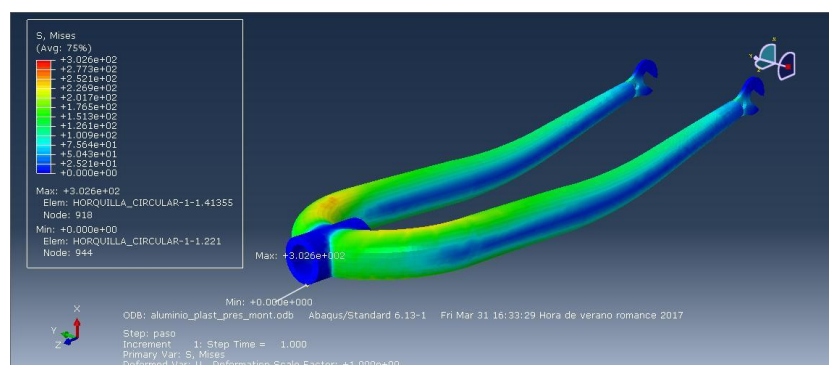


Ilustración 75. Tensiones en horquilla circular, aluminio, montaña

- **Carga en horquilla circular de aluminio para bicicletas de paseo.**

Puesto que ahora la carga es de 1000 N, obviamente la deformación será menor, concretamente de -10.89 mm (Ilustración 76), también lejos de los 5 mm impuestos por la norma.

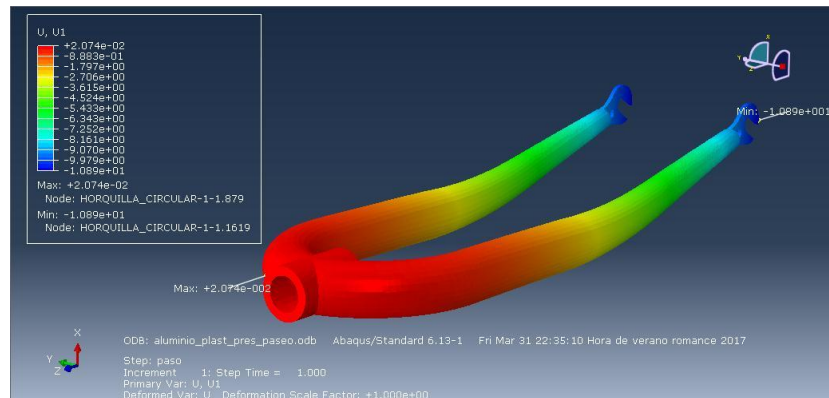


Ilustración 76. Deformaciones en horquilla circular, aluminio, paseo

En cuanto a la tensión es de 266.2 MPa (Ilustración 77) en las mismas zonas comentadas anteriormente.

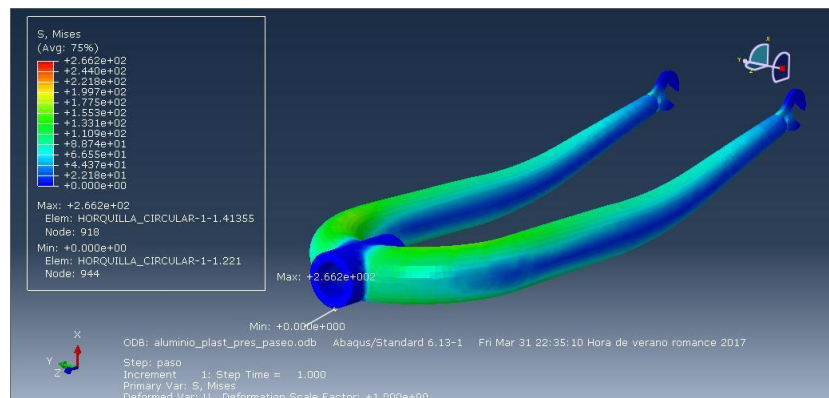


Ilustración 77. Tensiones en horquilla circular, aluminio, paseo

Se obtienen exactamente los mismos resultados que si la simulación se hubiese hecho sin tener en cuenta las propiedades plásticas, ya que la horquilla no ha sobrepasado el límite elástico. Debido a esto, cuando cese la carga, la horquilla volverá a su posición inicial.

Aunque no supere el ensayo, puede ser un caso interesante a evaluar debido a que la horquilla no sufrirá ninguna deformación permanente.

- ***Carga en horquilla elíptica de aluminio para bicicletas de montaña.***

La deformación máxima se da en las cogidas y es de -23.1 mm (Ilustración 78). Cuando el material es aluminio la deformación es relativamente notable y es donde se pone de manifiesto el hecho de que el Módulo de Young del aluminio es del orden de 3 veces inferior al del acero.

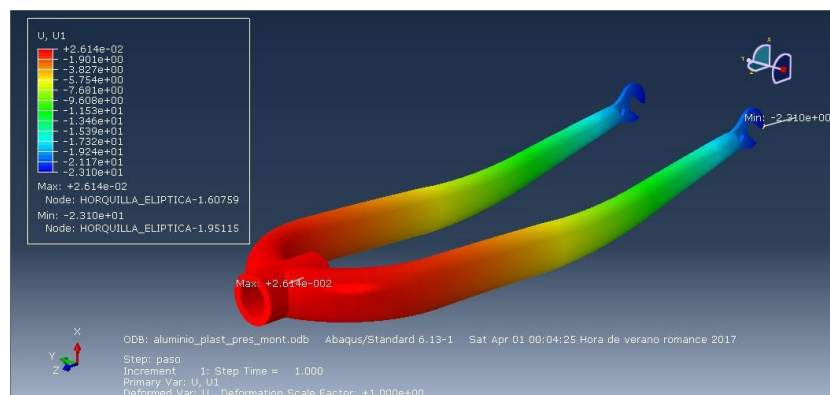


Ilustración 78. Deformaciones en horquilla elíptica, aluminio, montaña

En cuanto a la tensión máxima es de 528.1 MPa (Ilustración 79). Mientras que en la simulación con una horquilla circular la tensión superaba el límite elástico en unos 12 MPa, aquí, supera en más de 200 MPa, por lo tanto, se vuelve a demostrar que una horquilla de sección elíptica es peor elección que una de sección circular.

Además, la tensión que se obtiene es mayor que la tensión de rotura, por lo tanto, al contrario que cuando la horquilla era de sección circular, la horquilla rompería. No aparece rota en la imagen porque no se han impuesto condiciones de separación de material en la configuración de la simulación.

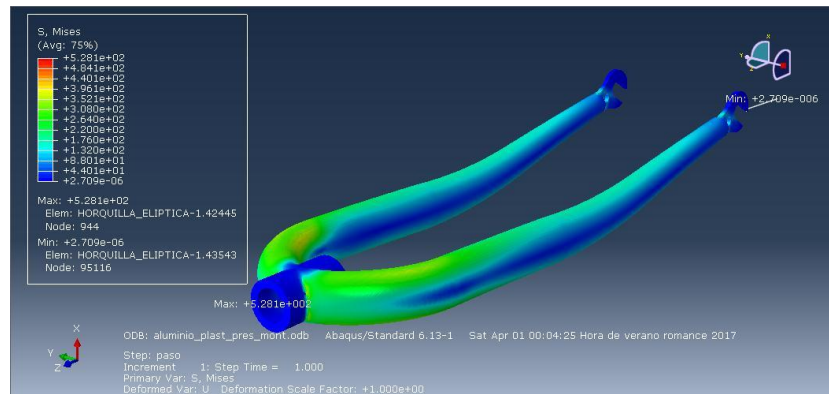


Ilustración 79. Tensiones en horquilla elíptica, aluminio, montaña

- ***Carga en horquilla elíptica de aluminio para bicicletas de paseo.***

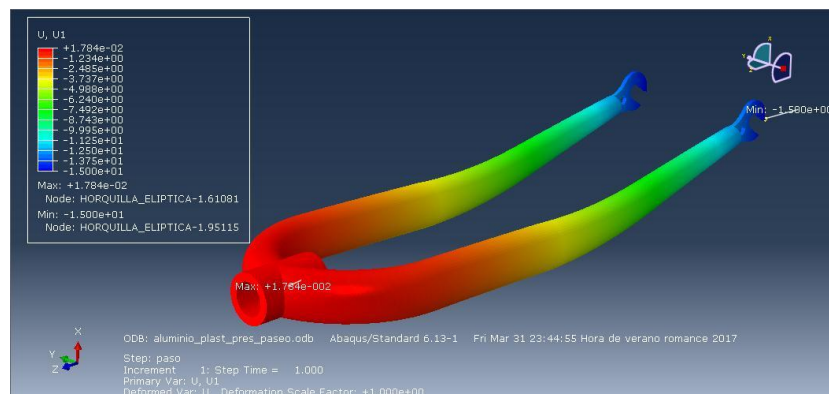


Ilustración 80. Deformaciones en horquilla elíptica, aluminio, paseo

Deformación máxima de -15 mm (Ilustración 80) y tensión máxima de 469.3 MPa (Ilustración 81). Las conclusiones a las que se llegan son que al disminuir la carga por ser para bicicletas de paseo disminuye, como es obvio, la deformación y la tensión, pero sigue estando en régimen plástico, sin embargo, ahora no alcanza el límite de rotura.

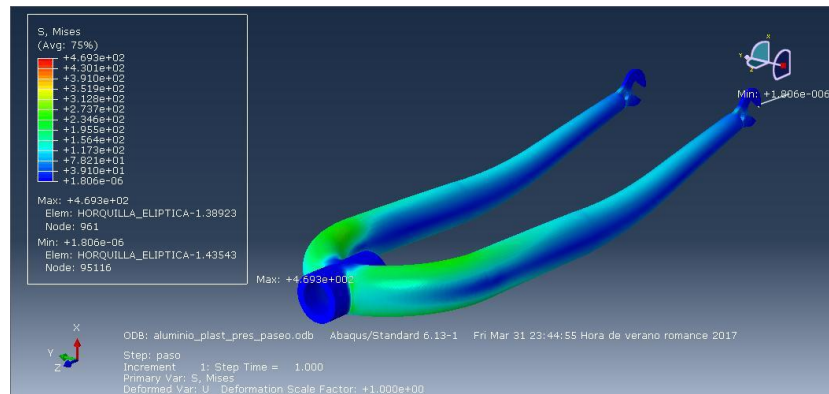


Ilustración 81. Tensiones en horquilla elíptica, aluminio, paseo

TITANIO

- ***Carga en horquilla circular de titanio para bicicletas de montaña.***

Deformación máxima de -10.69 mm (Ilustración 82) y tensión máxima de 397.8 MPa (Ilustración 83). En este caso tampoco supera el límite elástico, por lo tanto, los resultados serán los mismos que en una simulación sin tener en cuenta propiedades plásticas.

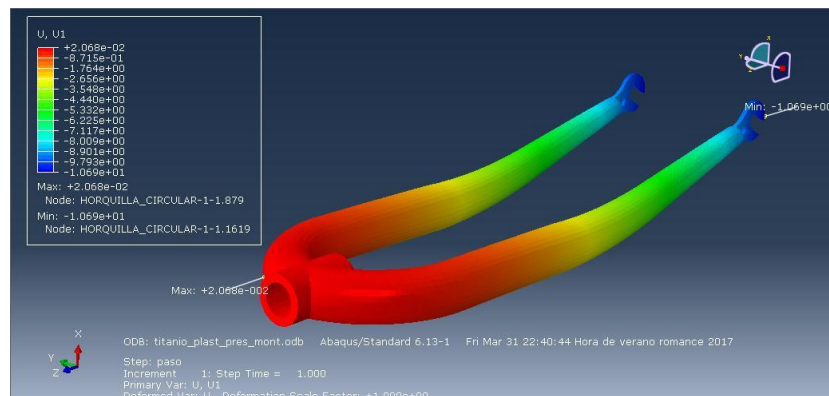


Ilustración 82. Deformaciones en horquilla circular, titanio, montaña

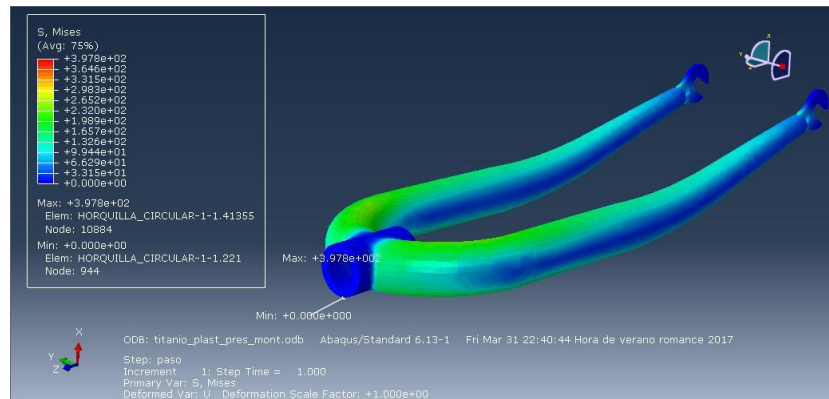
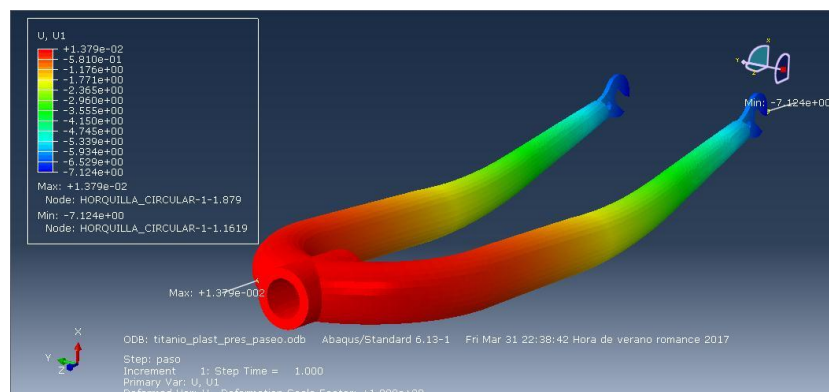


Ilustración 83. Tensiones en horquilla circular, titanio, montaña

- **Carga en horquilla circular de titanio para bicicletas de paseo.**

Deformación máxima de -7.124 mm (Ilustración 84) y tensión máxima de 265.2 MPa (Ilustración 85). Dentro de las condiciones elásticas.



- **Carga en horquilla elíptica de titanio para bicicletas de montaña.**

En el caso del titanio, la deformación es de -14.73 mm (Ilustración 86), mayor que cuando la sección era circular

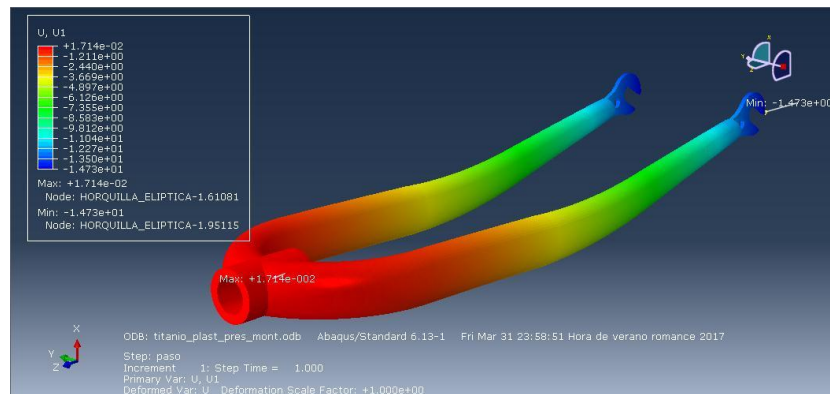


Ilustración 86. Deformaciones en horquilla elíptica, titanio, montaña

Además, la tensión es de 674.4 MPa (Ilustración 87), superando en gran medida el límite de rotura, por lo tanto, mientras que para horquillas de sección circular no lo supera, es decir, no rompía, para horquillas de sección elíptica sí que rompe. Con lo cual una sección elíptica concentra mucho más la tensión.

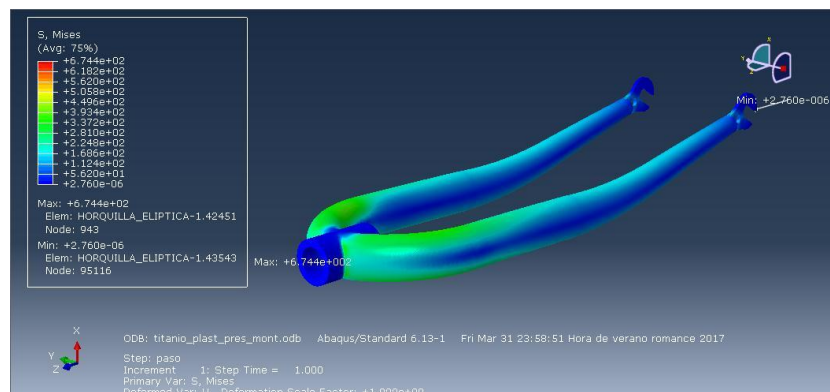


Ilustración 87. Tensiones en horquilla elíptica, titanio, montaña

- **Carga en horquilla elíptica de titanio para bicicletas de paseo.**

El desplazamiento máximo es de -9.812 mm (Ilustración 88).

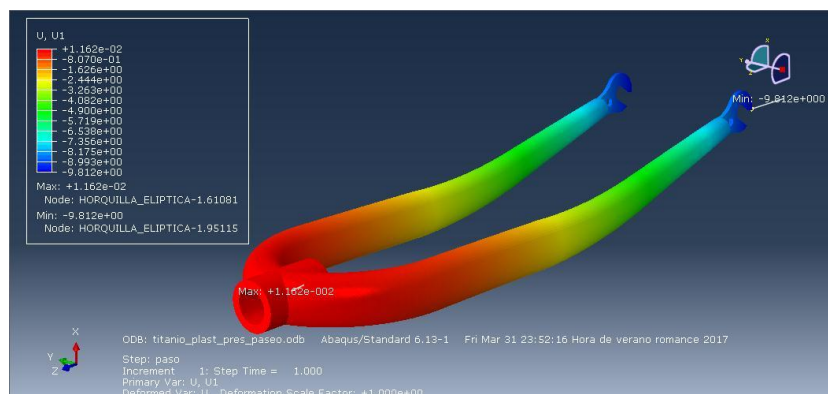


Ilustración 88. Deformaciones en horquilla elíptica, titanio, paseo

Tensión máxima de 475.8 MPa (Ilustración 89). Incluso en el caso de horquillas destinadas a bicicletas de paseo, rompe.

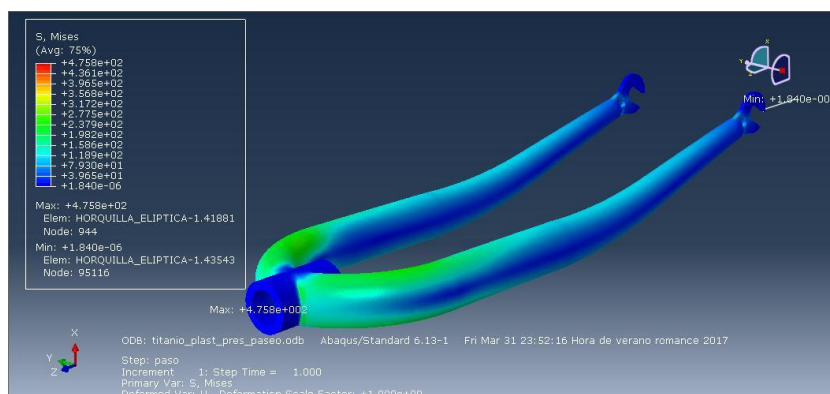


Ilustración 89. Tensiones en horquilla elíptica, titanio, paseo

A continuación, se muestran todos los resultados obtenidos de las simulaciones en una tabla para una mejor apreciación de los mismos.

		Acero			Aluminio			Titanio		
		Deformación (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)		Deformación (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)		Deformación (mm)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	
Horquilla circular	Paseo	3.627	200.9	✓	10.89	266.2	✗	7.124	265.2	✗
	Montaña	6.05	204.5	✗	16.34	302.6	✗	10.69	397.8	✗
Horquilla elíptica	Paseo	5.101	368.4	✗	15	469.3	✗	9.812	475.8	✗
	Montaña	68.62	486.2	✗	23.1	528.1	✗	14.73	674.4	✗

Tabla 3. Datos tensión-deformación para ensayo estático de flexión

El único ensayo apto para los materiales escogidos es el de la horquilla circular destinada a bicicletas de paseo. El resto no cumplen, o bien porque superan los 5

mm exigidos por la norma, o porque las tensiones que se alcanzan superan las de rotura y, como consecuencia, rompen.

5.2. Análisis dinámico de impacto

En este ensayo, debido a la complejidad de la configuración de su simulación y a un tiempo elevado de cálculo (del orden de días), no hay distinciones entre materiales plásticos y elásticos. Directamente se han simulado los casos que más se acercan a la realidad, es decir, los no lineales (plásticos).

Las simulaciones han sido 3 para cada tipo de horquilla (de sección circular y de sección elíptica), cada una de ellas con uno de los materiales utilizados (acero, aluminio y titanio).

Hay que recordar que independientemente de si la horquilla es para bicicleta de paseo o de montaña, la deflexión máxima permitida en el golpe es de 45 mm (apartado 1.2.2).

- **Ensayo de choque en horquilla circular de acero para bicicletas de montaña.**

En este caso, al ser una horquilla destinada a una bicicleta de montaña, la altura de caída del percutor es de 360 mm. Con esta altura, aplicando las leyes de conservación de la energía, se obtiene una velocidad e impacto de -2657 mm/s.

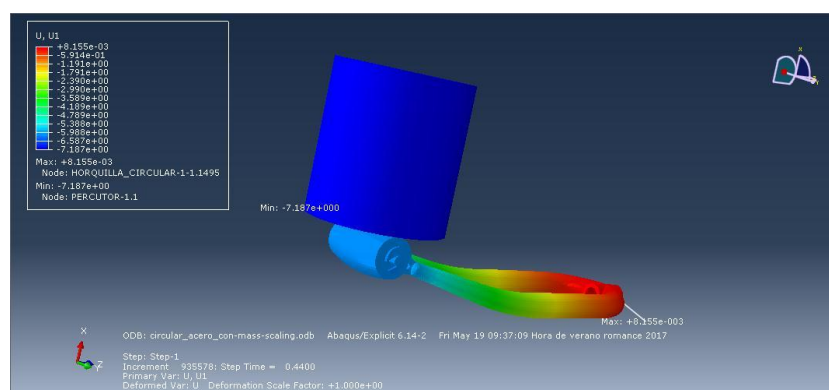


Ilustración 90. Desplazamientos horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque

En este caso la deformación máxima que sufre la horquilla es de -7.187 mm (Ilustración 90).

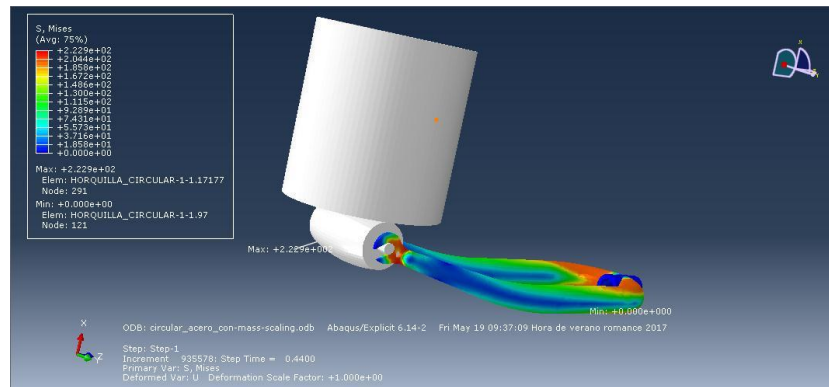


Ilustración 91. Tensiones horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque

En el mismo instante de tiempo, como es lógico, se producen las tensiones máximas del material. Éstas son muy grandes tanto en las cogidas como en el empotramiento, aunque ligeramente superiores en las primeras. Esto es debido a que el golpe es recibido casi directamente por las mismas.

La tensión máxima que soportan las cogidas es de 222.9 MPa (Ilustración 91), superior al límite elástico, por lo tanto, plastificará.

El instante de tiempo en el que se producen los valores máximos de tensión y de deformación en la horquilla es de 0.44 segundos. La simulación acaba pasados 2 segundos, es decir, los resultados buscados aparecen mucho antes de los 2 segundos, sin embargo, ese tiempo extra es para que el sistema se estabilice tras el impacto.

Para comprobar si los resultados de la simulación son correctos o no, hay que ver si la energía cinética de percutor se transforma en energía de deformación en la horquilla, ya que la energía ni se crea ni se destruye.

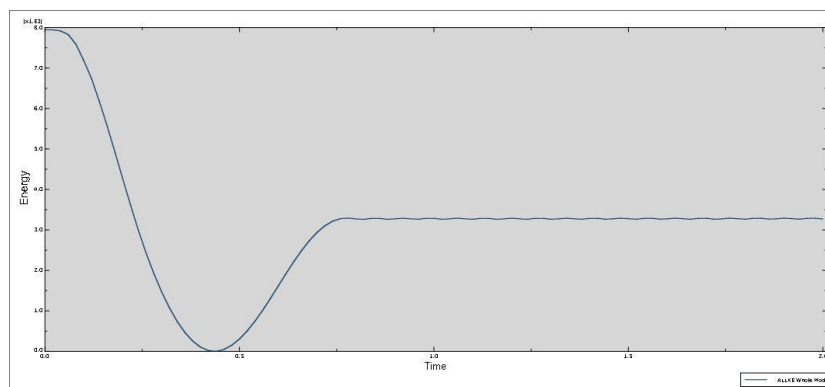


Ilustración 92. Variación de energía cinética, horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque

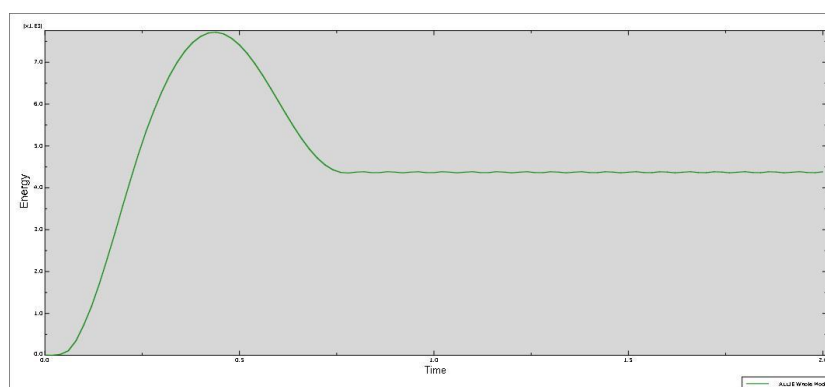


Ilustración 93. Variación de energía interna, horquilla circular, acero, montaña, ensayo choque

Se puede comprobar que ambas imágenes son simétricas. Es evidente que cuando la energía cinética del percutor es máxima, la energía interna de la horquilla es nula, ya que aún no se ha producido ninguna transferencia de la misma por contacto. Cuando la energía cinética del percutor es mínima, es decir, está parado debido a la rigidez de la horquilla, la energía interna de la misma es máxima, ya que es el punto en el que absorbe toda la energía y aún no ha disipado nada por efectos elásticos. También coincide con que en ese punto las tensiones son máximas, como es lógico. Finalmente, la energía interna de la horquilla empieza a disminuir debido a la disipación de efectos elásticos y por pérdida de calor, la cual será mínima en comparación con el resto de pérdidas de energía, debida al efecto Joule.

Otras gráficas de interés son, por ejemplo, el desplazamiento de la horquilla con el tiempo (Ilustración 94).

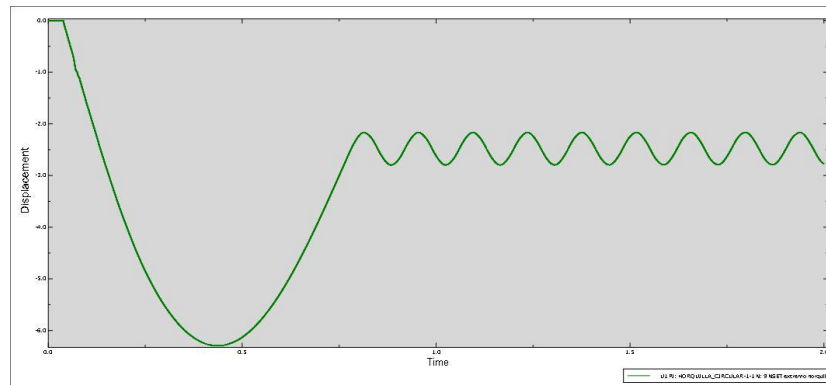


Ilustración 94. Desplazamiento de horquilla circular, acero, montaña, ensayo de choque

La parte superior del eje OY es el 0 y hacia abajo es negativo. Viendo la gráfica, el comportamiento de la horquilla es que primero baja debido al golpe del percutor y, cuando este rebota y se va separando, la horquilla recupera parte de su estado inicial debido a los efectos elásticos de la misma. Esa recuperación coincide con la pérdida de energía interna de la misma, precisamente por dichos efectos elásticos.

- **Ensayo de choque en horquilla circular de aluminio para bicicletas de montaña.**

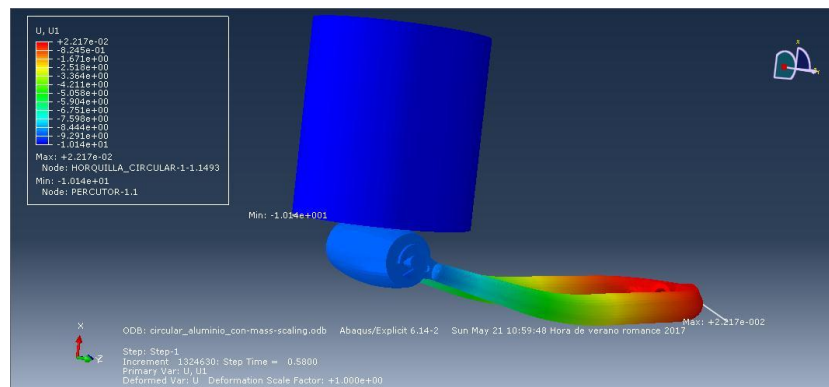


Ilustración 95. Desplazamientos horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque

El desplazamiento máximo es de -10.14 mm (Ilustración 95) y la tensión máxima, también dada en las cogidas, como en el caso del acero, es de 344.6 MPa.

Esta tensión es mayor que el límite elástico del aluminio, por lo tanto, plastificará.

De nuevo, en los siguientes gráficos se muestran las energías, cinética del percutor e interna de la horquilla, y el desplazamiento del extremo de la misma a lo largo del análisis.

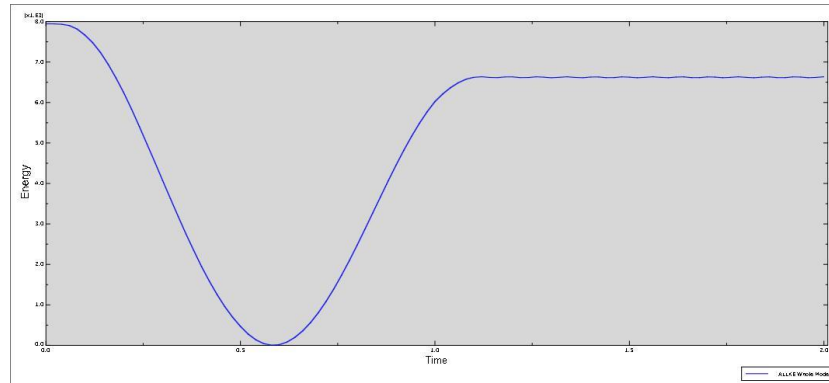


Ilustración 96. Variación de energía cinética, horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque

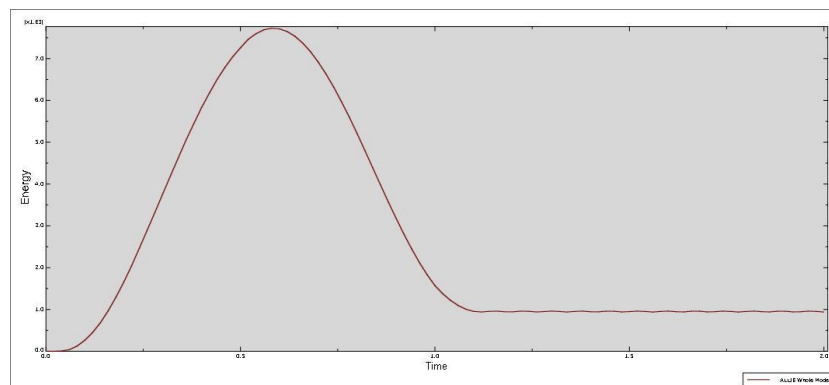


Ilustración 97. Variación de energía interna, horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo choque

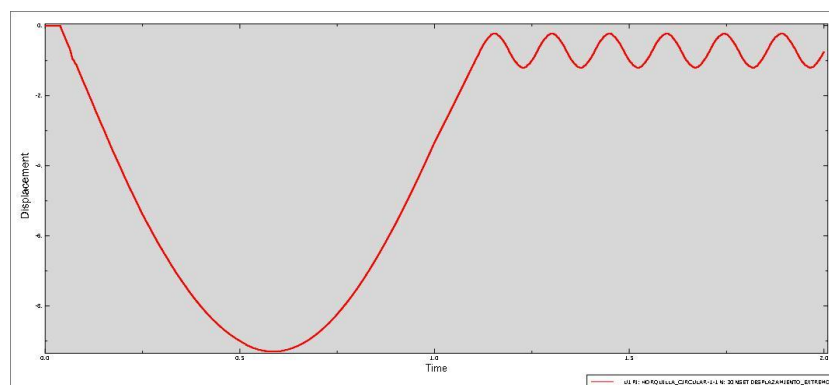


Ilustración 98. Desplazamiento de horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo de choque

Los resultados obtenidos gráficamente son coherentes a lo que ocurre realmente.

Si se comparan las gráficas del desplazamiento de la horquilla con el tiempo cuando el material es acero y cuando es aluminio se observa que, en el caso del aluminio, la horquilla recupera casi el estado inicial, mientras que cuando el material es acero, ésta se queda a la mitad. Esto se debe a que el aluminio es más elástico que el acero y tiene mayor capacidad de disipar energía y volver a su estado inicial. Para comprobar esto sólo hay que comparar ambos límites elásticos, de los cuales es mayor el del aluminio, lógicamente, y también comparar los módulos de Young de cada uno. Es tres veces superior es del acero frente al del aluminio, por lo que será más costoso que el acero disipe energía elástica.

- ***Ensayo de choque en horquilla circular de titanio para bicicletas de montaña.***

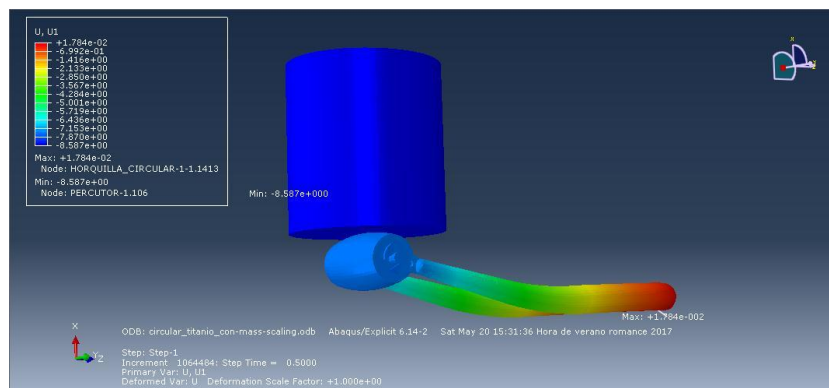


Ilustración 99. Desplazamientos horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque

El desplazamiento máximo de la horquilla para este material es de -8.587 mm. En cuanto a la tensión máxima, su valor es 407.6 MPa y también se da en las cogidas.

En lo que respecta a las energías y desplazamiento de la horquilla, su evolución a lo largo del tiempo se muestra en las siguientes figuras.

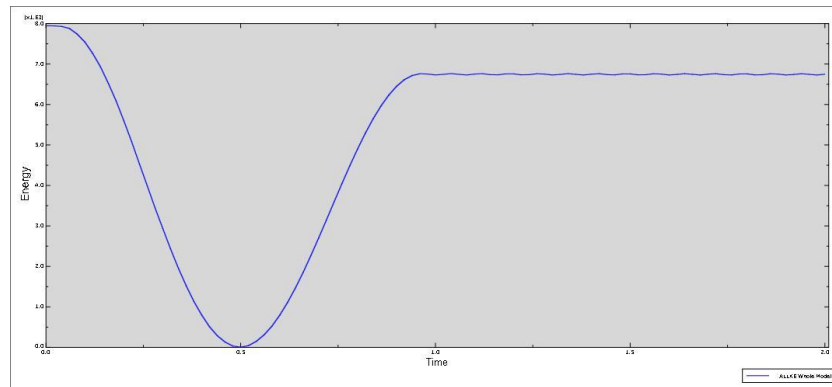


Ilustración 100. Variación de energía cinética, horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque

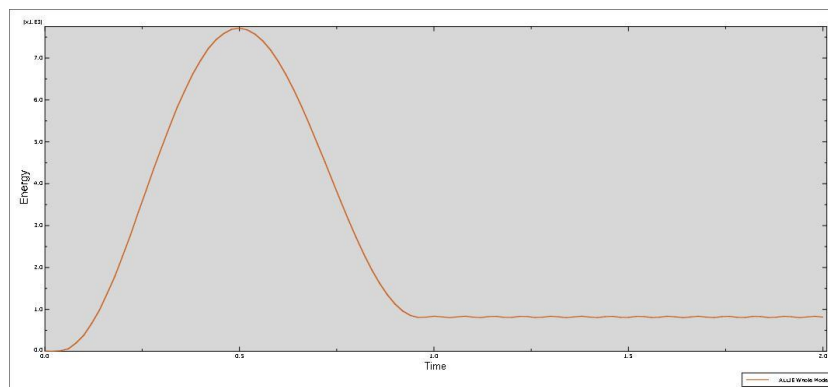


Ilustración 101. Variación de energía interna, horquilla circular, titanio, montaña, ensayo choque

Si se echa un vistazo a las gráficas, también se cumple que la disminución de energía cinética coincide con el aumento de energía interna de la horquilla. Así como que la disminución de la energía interna de la horquilla coincide con la disipación de energía de la misma debido a efectos elásticos.

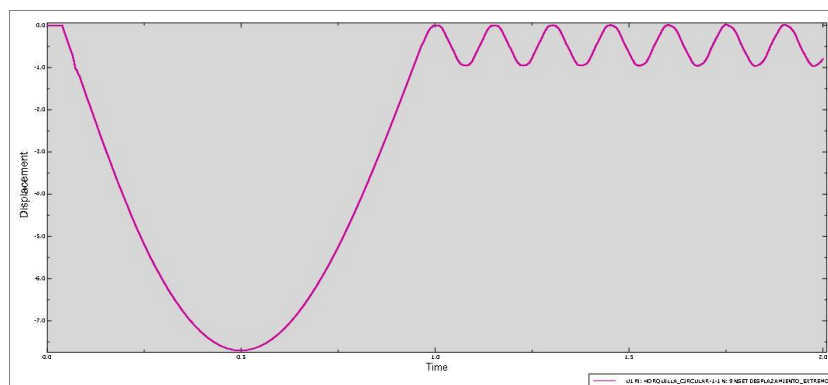


Ilustración 102. Desplazamiento de horquilla circular, titanio, montaña, ensayo de choque

En el caso del titanio, el límite elástico es considerablemente mayor al de los otros dos materiales. Es esta la razón por la que alcanza, en algunas partes de la oscilación, el estado inicial que tenía la horquilla al principio, es decir, que disipa toda la energía. Esto quiere decir que en algunas zonas no se alcanza el límite plástico.

No se han mostrado datos de los casos de las horquillas destinadas a bicicletas de paseo porque es evidente que, si el ensayo es superado para una horquilla destinada a una bicicleta de montaña, también será superado para una destinada a una bicicleta de paseo, ya que el material y la geometría son los mismos y, sin embargo, la distancia desde la que cae el percutor es menor.

A continuación, se mostrará una tabla resumen en la cual aparecen los desplazamientos en los distintos ensayos y, con ello, en que casos se superan.

Acero			
		Deformación (mm)	
Horquilla circular	Paseo	4.086	✓
	Montaña	7.187	✓
Horquilla elíptica	Paseo	5.1428	✓
	Montaña	7.973	✓

Tabla 4. Resultados ensayo de choque, acero

Aluminio			
		Deformación (mm)	
Horquilla circular	Paseo	6.5678	✓
	Montaña	10.14	✓
Horquilla elíptica	Paseo	7.6348	✓
	Montaña	11.153	✓

Tabla 5. Resultados ensayo de choque, aluminio

Titanio			
		Deformación (mm)	
Horquilla circular	Paseo	5.3	✓
	Montaña	8.587	✓
Horquilla elíptica	Paseo	6.163	✓
	Montaña	9.062	✓

Tabla 6. Resultados ensayo de choque, titanio

Se puede comprobar que cumplen todos los ensayos simulados, es decir, que en ninguno la horquilla supera los 45 mm de deflexión, por lo tanto, la conclusión es que los materiales escogidos son muy resistentes.

5.3. Análisis de fatiga

Una vez realizadas todas las simulaciones, se compararán para los distintos materiales (acero, aluminio y titanio) y para las distintas geometrías (sección circular y elíptica) con el fin de determinar si cumplen o no las especificaciones impuestas por la normativa (apartado 1.2.3.1).

- ***Ensayo a fatiga en horquilla circular de acero para bicicletas de montaña.***

En los resultados de la simulación de este ensayo se obtiene un desplazamiento de la horquilla igual que si se le aplicara la misma carga y actuase como estática de flexión. Esto podría ser consecuencia, o bien de que la simulación esté mal configurada, o bien de que este material, junto con la geometría de la horquilla, no sufre daño a fatiga en las condiciones impuestas por el ensayo.

Para poder descartar que la simulación esté mal configurada, se ha lanzado otra en la cual se han inventado los valores de carga y el número de ciclos. Se han impuesto valores muy altos tanto para el número de ciclos como para la carga, con el mismo material y la misma horquilla, con el fin de observar si al final ésta sufre mayores deformaciones debido al incremento de daño provocado por la fatiga. Los resultados han sido los esperados y a partir de unos 165000 ciclos y para una carga total de 1600 N se han observado que los desplazamientos de las cogidas eran cada vez mayores a medida que iban aumentando los ciclos.

Los resultados de esta simulación no se incluyen en la memoria porque no es objeto de estudio en este TFG, simplemente ha sido una prueba y se ha comentado como tal.

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que la simulación está bien configurada, sin embargo, las condiciones impuestas por la norma (apartado 1.2.3.2) no son suficientes para hacer que esta horquilla con este material sufra a fatiga.

La consecuencia de esto es que, evidentemente, la deformación a fatiga no está por encima del 20% de la deformación que provocaría la misma carga actuando como estática, ya que es la misma, por lo tanto, el acero supera este ensayo para bicicletas de montaña.

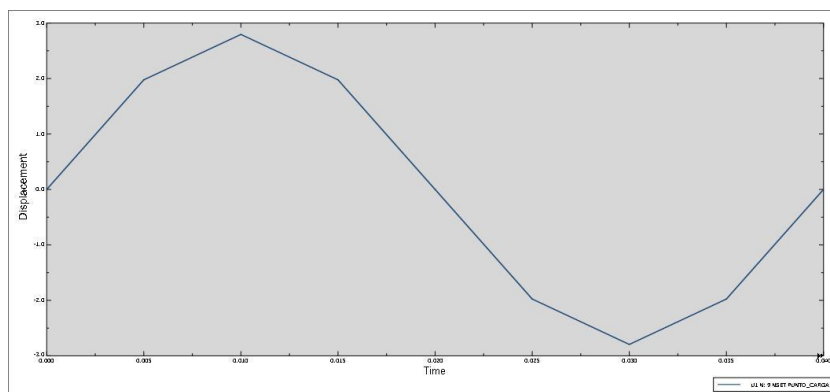


Ilustración 103. Desplazamiento periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga

En esta gráfica (Ilustración 103) se ve perfectamente como el desplazamiento que sufre el set creado como punto oscila como una senoidal, tal y como se deseaba.

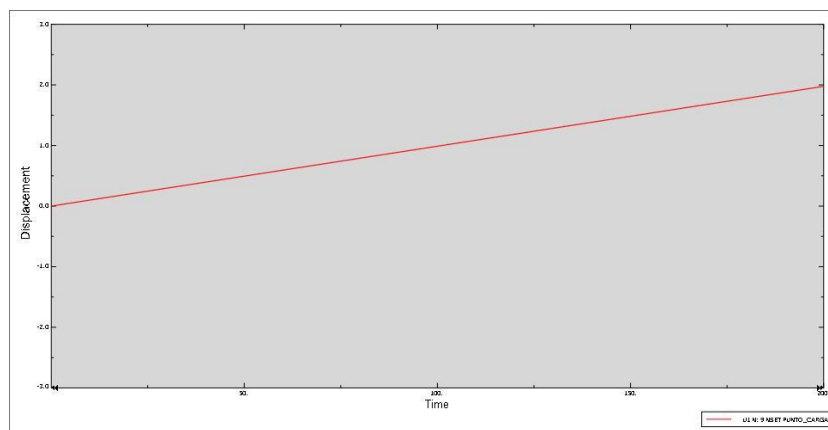


Ilustración 104. Desplazamiento entre periodo y periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga

También se observa (Ilustración 104) que desde 0.04 s hasta 200, no aparecen oscilaciones senoidales. Esto se debe a lo que se comentó de que el software va comprobando si se producen cambios de 5000 en 5000 ciclos, que es lo que se le impuso (apartado 4.3). Lo mismo ocurrirá entre 200.04 s y 400 y así sucesivamente

hasta 4000 s que es el tiempo que se tarda en que se lleven a cabo los 100000 ciclos impuestos por la norma con una frecuencia de 25 Hz.

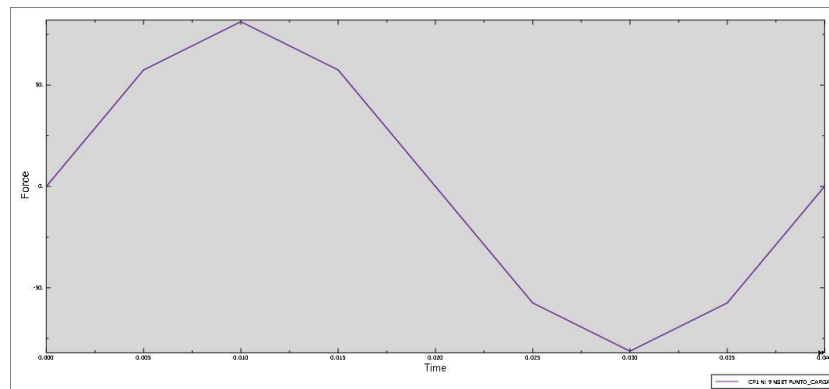


Ilustración 105. Fuerza periodo en horquilla circular, acero, montaña, ensayo de fatiga

A partir de la Ilustración 105, se observa que la carga está bien impuesta debido a que, si se hace un seguimiento del set creado, se ve como alcanza el máximo y el mínimo para una carga de 81.25 N, que son los 650 N divididos entre los 8 puntos donde se impone la carga total para el ensayo en una horquilla destinada a bicicletas de montaña.

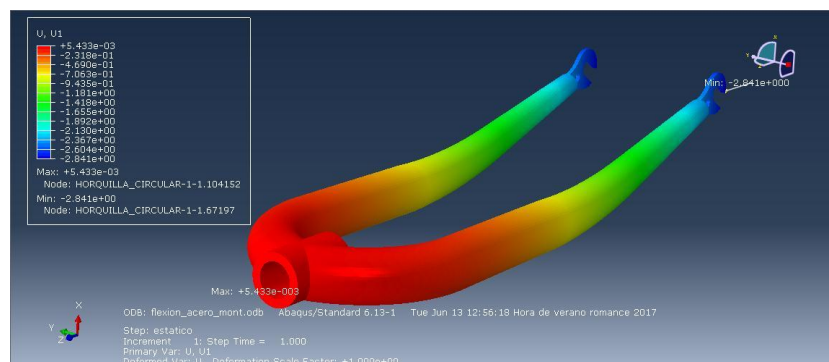


Ilustración 106. Desplazamiento horquilla circular, acero, montaña, ensayo de flexión estática

Las cogidas sufren un desplazamiento de 2.841 mm en el ensayo estático de flexión, mismo desplazamiento que en caso del ensayo de fatiga, por lo tanto, como se ha comentado ya anteriormente, esta horquilla con este material supera el ensayo de fatiga.

- **Ensayo a fatiga en horquilla circular de aluminio para bicicletas de paseo.**

Para aluminio, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

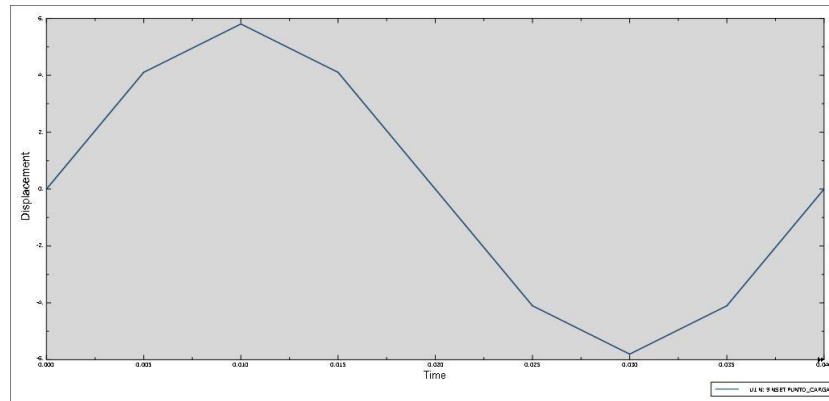


Ilustración 107. Desplazamiento periodo horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo de fatiga

El desplazamiento del set como punto varía con la aplicación de la carga, igual que ocurría en el caso anterior.

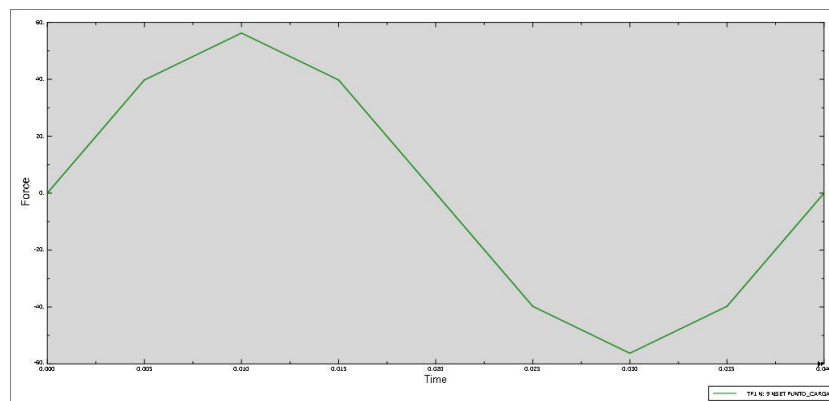


Ilustración 108. Fuerza periodo horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo de fatiga

Tal y como se puede comprobar observando la imagen (Ilustración 108), la carga en este caso también actúa correctamente de forma cíclica, por lo tanto, se puede confiar en los resultados obtenidos en la simulación de este ensayo.

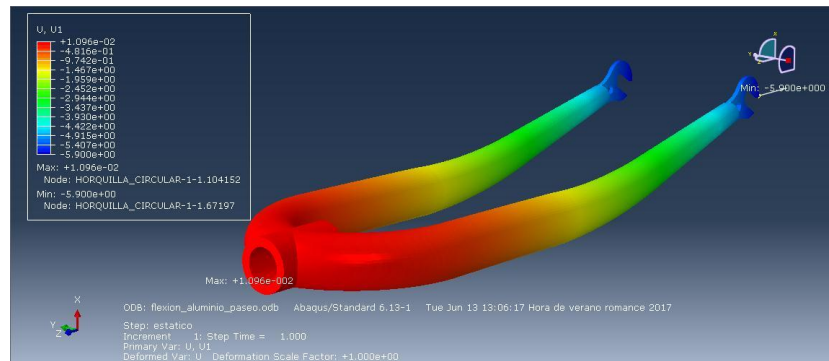


Ilustración 109. Desplazamiento horquilla circular, aluminio, paseo, ensayo estático de flexión

El desplazamiento de las cogidas en el análisis de flexión estática es de 5.90 mm, de modo, que igual que para el caso anterior, una horquilla circular de aluminio para bicicletas de paseo también cumple los requisitos establecidos por la norma para superar el ensayo de fatiga.

- **Ensayo a fatiga en horquilla circular de aluminio para bicicletas de montaña.**

Este ensayo difiere poco de los anteriores.

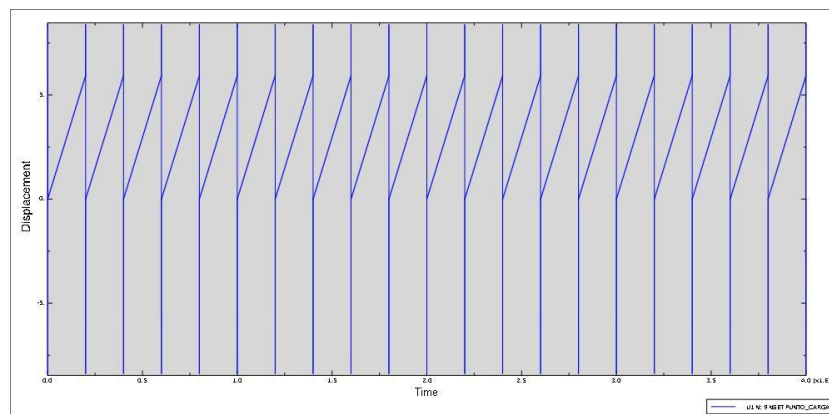


Ilustración 110. Desplazamiento total horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo de fatiga

En la imagen anterior (Ilustración 110) se muestra el desplazamiento del set como punto a lo largo del tiempo que duran los 100000 ciclos establecidos por la norma. Cada una de las líneas verticales es una oscilación y entre línea y línea se representa el espacio de tiempo o número de ciclos en los que *Abaqus* no analiza

los resultados, tal y como ya se comentó en el pre-procesado de esta simulación (apartado 4.3).

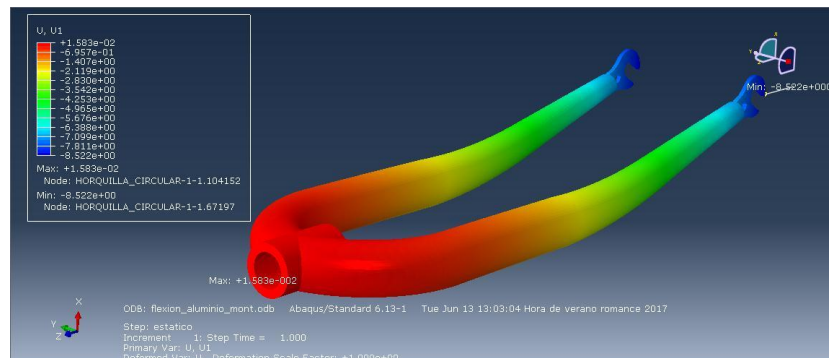


Ilustración 111. Desplazamiento horquilla circular, aluminio, montaña, ensayo estático de flexión

Desplazamiento de las cogidas de 8.522 mm en el ensayo de flexión estático, por lo tanto, se llega a la misma conclusión que en las simulaciones anteriores, también cumple lo exigido por la normativa para superar el ensayo.

- ***Ensayo a fatiga en horquilla circular de titanio para bicicletas de paseo.***

El desplazamiento de las cogidas en la simulación estática de flexión es de 3.859 mm, igual que en la simulación del ensayo de fatiga, por tanto, al igual que en los casos anteriores, en este caso también se superará dicho ensayo.

- ***Ensayo a fatiga en horquilla circular de titanio para bicicletas de montaña.***

Desplazamiento de las cogidas de 5.574 mm en la simulación estática de flexión. Es el mismo desplazamiento que en el caso de fatiga durante todo el tiempo de ciclismo, por lo tanto, las soluciones serán idénticas a las anteriores y, por ende, superará el ensayo.

Una vez analizada la horquilla de sección circular, se procederá al análisis de la horquilla de sección elíptica. Se llevará a cabo exactamente igual que el anterior.

Para evitar repetir lo mismo en la memoria, en el caso de las simulaciones de la horquilla de sección elíptica también superan, todas, el ensayo de fatiga, ya que los desplazamientos de set creado como punto son los mismos en dicho ensayo y en el de flexión estática con la misma carga. Evidentemente éstos son diferentes a los de las simulaciones de la horquilla de sección circular.

A continuación, se exponen unas tablas resumen de los desplazamientos para ver en que casos se supera el ensayo.

Acero				
		Deformación estática (mm)	Deformación fatiga (mm)	
Horquilla circular	Paseo	1.967	1.967	✓
	Montaña	2.841	2.841	✓
Horquilla elíptica	Paseo	2.308	2.308	✓
	Montaña	3.334	3.334	✓

Tabla 7. Resultados ensayo de fatiga, acero

Aluminio				
		Deformación estática (mm)	Deformación fatiga (mm)	
Horquilla circular	Paseo	5.9	5.9	✓
	Montaña	8.522	8.522	✓
Horquilla elíptica	Paseo	6.927	6.927	✓
	Montaña	10.01	10.01	✓

Tabla 8. Resultados ensayo de fatiga, aluminio

Titanio				
		Deformación estática (mm)	Deformación fatiga (mm)	
Horquilla circular	Paseo	3.859	3.859	✓
	Montaña	5.574	5.574	✓
Horquilla elíptica	Paseo	4.532	4.532	✓
	Montaña	6.546	6.546	✓

Tabla 9. Resultados ensayo de fatiga, titanio

Se puede comprobar que cumplen todos. De esto se llega a la misma conclusión que se llegó en el caso de los ensayos de choque o impacto, que los materiales escogidos son muy resistentes.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Una conclusión importante es que, frente a lo esperado, la horquilla de sección circular parece tener mejor comportamiento en cuanto a deformación y a distribución de tensiones que la horquilla de sección elíptica.

El acero ha resultado ser el material que mejor ha soportado los esfuerzos generados al componente mecánico (horquilla) en todas las simulaciones de los ensayos, siendo el titanio el siguiente y, por último, el aluminio. Estos resultados eran de esperar.

El programa o software utilizado para hacer las simulaciones (*Abaqus 6.13*) ha dado muchos problemas por el hecho de que a veces los resultados de las simulaciones ejecutadas no eran coherentes y, si las mismas, sin ninguna modificación, se ejecutaban en otro momento, pasados días, se obtenían resultados válidos y con criterio y lógica. Éste ha sido el principal problema por el cual no se han podido ejecutar todos los casos de simulaciones del ensayo de impacto o choque, ya que cada simulación requeriría de días para poder completarse.

En cuanto a los resultados de las simulaciones de los ensayos de fatiga hay que tener en cuenta que no se han tomado en consideración las curvas S-N de los materiales.

Los materiales escogidos han resultado ser bastante resistentes en cuanto a los requerimientos de superación de los ensayos, ya que los han superado todos sobradamente excepto los del ensayo de flexión estática.

Para garantizar que los resultados de todas las simulaciones son correctos, habría que validar cada una de ellas con datos experimentales. Éste podría ser uno de los trabajos futuros, ya que, por falta de tiempo y material (no se disponía de varias horquillas para ser ensayadas) no se han podido validar.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR, *Bicicletas de paseo. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo*, Madrid, 2006.
- [2] AENOR, *Bicicletas de montaña. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo*, Madrid, 2006.
- [3] «Crecimiento del uso de la bicicleta en los últimos años,» 19 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.dalepedalescadenaser.es/crecimiento-del-uso-de-la-bicicleta-en-los-ultimos-anos/>.
- [4] A. Cadavid, «Formulación Lagrangiana y Euleriana,» 26 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://prezi.com/qiuvsvxbjy2/formulacion-lagrangiana-y-euleriana/>.
- [5] Wikipedia, «Abaqus,» 29 Junio 2014. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Abaqus>.
- [6] R. J. LeVeque, *Finite Difference Methods for differential Equations*, Washington, 2006.
- [7] A. Canicero López, «Introducción al método de los elementos finitos,» [En línea]. Available: https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf.
- [8] Á. J. M. Viedma, «Estudio mecánico mediante técnicas analíticas, computacionales y experimentales de componentes estructurales de una bicicleta de montaña,» Jaén, 2012.
- [9] Wikipedia, «Constantes elastoplásticas de diferentes materiales,» 26 Septiembre 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constantes_el%C3%A1stopl%C3%A1sticas_de_diferentes_materiales.
- [10] Valvias, «Densidad sólidos,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-solidos.php>.
- [11] D. Systemes, *Abaqus 6.11. Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*, 2011.