



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA



**ESTUDIO DE LOS ESFUERZOS INTERNOS
ORIGINADOS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES Y
MAQUINALES MEDIANTE EL MÉTODO
NUMÉRICO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.**

(Codigo: ID11/216)



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA



INDICE GENERAL

	Página
1.- Datos generales	3
2.- Objeto	4
3.- Desarrollo	7
4.- Problema 1 . Análisis de tensiones	8
5.- Problema 2 . Análisis de la estructura metálica del cuadro de una bicicleta de montaña.	67



1.- DATOS GENERALES DEL PROYECTO.

Título:

El método de los elementos finitos en la enseñanza de la ingeniería.
Aplicaciones

Ámbito de Aplicación:

- Implantación de metodología activa de aprendizaje.
- Organización de actividades prácticas internas o externas
- Ejecución de materiales docentes

Centro:

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE BÉJAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Titulación

Ingeniero Técnico Industrial Mecánico.

Profesor responsable

José Alejandro Reveriego Martín

alex@usal.es

Relación de miembros del Equipo

Carmen Blanco Herrera	cbh@usal.es
Pedro Antonio Gómez Sánchez	pedroant@usal.es
Miguel Angel Lorenzo	mlorenzo@usal.es
Francisco Martín Labajos	labajos@usal.es
Mario Matas Hernández	tili@usal.es
Pablo Moreno Pedraz	pmoreno@usal.es
Juan Carlos Pérez Cerdán	juha@usal.es



2.- OBJETO

El proyecto de innovación que se plantea es una segunda parte del proyecto de innovación que se desarrolló en la petición del curso pasado. Debido al buen resultado que ha tenido en el desarrollo del encargo docente, se pretende desarrollar esta segunda parte. Como podrá comprobar todos los resultados previstos, mejoras esperadas, impacto sobre la docencia son los mismos que en la petición anterior. El objetivo por tanto que se pretende desarrollar consiste en una profundización en los esfuerzos internos desarrollados en sistemas estructurales y maquinales.

Se plantea la solicitud de esta propuesta de innovación docente con la siguiente finalidad: Poner estas aplicaciones a disposición de los alumnos, en un documento docente en la plataforma Studium de enseñanza online. A la vez esta metodología se convierte en un sistema activo de tutorización de las mismas, con la inclusión de ejercicios prácticos que ayuden al alumno en la profundización de todos los conocimientos adquiridos.

Mediante la implantación de este sistema de enseñanza se pretende que se desarrollen los siguientes objetivos:

- a.- Un incremento de la interacción entre el profesor y el alumno.
- b.- Una herramienta de aprendizaje que haga que el alumno desde su domicilio o desde el propio Centro, en el mismo horario o en un horario diferente, pueda adquirir estas competencias. Es decir una mayor flexibilidad de horarios entre profesor y alumno
- c.- Potenciar la formación continua. Uno de los objetivos de la adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior a la formación continua de los alumnos en sus estudios superiores. Aquellos egresados que habiendo finalizado sus estudios superiores pueden disponer de una herramienta lo suficientemente adecuada que les permite recordar y actualizar sus conocimientos.
- d.- Añadir una forma más de presentar la información.
- e.- Coordinación entre las materias objeto de esta trabajo, que forman parte de la misma titulación, para que las prácticas sean totalmente complementarias.



Teniendo en cuenta los objetivos plateados este ha sido el resultado conseguido:

OBJETIVO	GRADO DE CUMPLIMIENTO
Mejor tasa de rendimiento de nuestros estudiantes.	La utilización de los problemas de simulación de los que dispone el Departamento, como muestra, ha conseguido este objetivo . Especialmente se ha conseguido en las materias de: <ul style="list-style-type: none">. Resistencia de Materiales. Teoría de Estructuras.. Proyecto fin de carrera Los alumnos han tenido durante varios meses la posibilidad de contar con esta herramienta y por tanto ha mejora ligeramente la tasa de rendimiento.
Herramienta que va ayudar a mejorar la adaptación al EEES de las materias anteriormente mencionadas.	Este objetivo ha sido parcialmente conseguido . Hemos propuesto varios ejemplos de cálculo para que los alumnos los utilizaran fuera del horario y el aprovechamiento ha sido escaso, especialmente para aquellos que desarrollan su proyecto fin de carrera. Quizás, sea por falta de costumbre en el uso de estas herramientas, o bien la falta de tiempo de los estudiantes.
Desarrollo de prácticas, con modelos por elementos finitos que acerquen la realidad a los estudiantes.	Este objetivo se ha podido cumplir . Se han realizado menos modelos pero mucho más aprovechados, en los cuales se ha intentado resumir los conceptos de las materias comunes a la rama industrial En concreto los estudiantes de resistencia de materiales, tanto en los graods como en



	<p>en el curso de adaptación han podido comprobar la mejora de comprensión en todos los conceptos teóricos explicados en clase</p>
<p>Herramientas que van a servir para nuestros egresados dentro del programa de formación continua .</p>	<p>Este objetivo se ha cumplido totalmente. La forma de presentar la información ha supuesto una herramienta para todos, tanto para los profesores, como para los estudiantes. Pensamos que la rentabilidad de la misma se podrá valorar más adelante con la implantación de los nuevos grados de ingeniería en nuestro Centro.</p> <p>Este hecho ha quedado reflejado en los estudiantes del Curso de Adaptación al grado en Ingeniería Mecánica. Estos estudiantes son, en su mayoría, egresados de nuestro centro que vuelven a estudiar después de años dedicados al trabajo profesional, por lo que en ellos se puede comprobar muy bien la eficacia de esta aplicación como un elemento de formación continua.</p>
<p>Este prototipo puede servir como base para que otros docentes lo pongan en práctica en sus propias materias, de otros estudios de ingeniería.</p>	<p>Este objetivo se ha conseguido, en esta edición de la convocatoria de Innovación Docente. La buena aceptación que ha tenido en nuestros estudiantes en el curso pasado, ha hecho que otros docentes hayan realizado sus prototipos en el desarrollo de esta herramienta en sus propias materias. Desde nuestro punto de vista es muy recomendable para la adquisición de competencias específicas en nuestras materias.</p>



3.- DESARROLLO

Como se ha comentado anteriormente el objetivo del presente programa de innovación corresponde con una segunda parte de la presentada el año anterior en la cual se pretende profundizar en el estudio de los campos de tensiones y de deformaciones aplicados al campo de máquinas y de las estructuras. Por tanto, el sistema de simulación a desarrollar ha llevado un desarrollo similar al del año anterior pero con un grado de aplicabilidad mayor. De este modo la metodología inicial que se ha planteado ha sido la propuesta en la memoria de solicitud:

- a) Descripción del concepto a desarrollar.
 - a.1) Concepto teórico.
 - a.2) Descripción de los objetivos específicos a cumplir.
 - a.3) Resolución del problema.
- b) Soporte informático.
 - b.1) Descripción del planteamiento por elementos finitos a desarrollar.
 - b.2) Planteamiento del procedimiento de cálculo (Standart/Explicit).
 - b.3) Preprocesado del problema:
 - b.3.1) Material.
 - b.3.2) Modelo constitutivo.
 - b.3.3.) Condiciones de contorno.
 - b.3.4) Sistema de mallado.
- c) Proceso de cálculo
 - c.1) Uso de la Herramienta de cálculo, por elementos finitos – ABAQUS.
 - c.2) Recopilación de los datos.

Todo este proceso metodológico ha sido desarrollado y ha tenido muy buena aceptación por parte de los estudiantes.



PROBLEMA 1

IMPACTO- ANALISIS DE TENSIONES

Dentro de los problemas que se plantean en este segundo curso el primero que se analiza es el campo de tensiones que se origina en un balón de fútbol cuando se golpea

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1.-Principio de impulso-momento

Considere un cuerpo rígido de masa m moviéndose en la dirección del eje x y sometido a una fuerza $F(t)$. Siguiendo la ley de Newton.

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

Integrando entre $t=0$ y $t=t^*$ da

$$\int_0^{t^*} F dt = \int_0^{t^*} \left(m \frac{dv}{dt} \right) dt \quad (2)$$

Dado que la masa permanece constante,

$$mv_i + I = mv_f \quad (3)$$

Donde el impulso I es definido como $I = \int_0^{t^*} F dt$ y v_i y v_f son las velocidades iniciales y finales respectivamente.



Ejemplo:

Un cuerpo rígido de masa m , libre para deslizarse en la dirección x , está en reposo y luego es sometido a un impulso en la dirección x . De la relación de impulso-momento (Ecuación. 3), la velocidad final es $v = I/m$ y la energía cinética es

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{I^2}{2m}$$

Por consiguiente, la energía cinética del cuerpo es inversamente proporcional a la masa m lo que indica que para un impulso dado, un cuerpo más pesado almacena menos energía cinética para disiparla más tarde.

1.2.- Conservación del momento para dos cuerpos impactando

Antes de continuar definiremos el concepto de coeficiente de restitución.

El **coeficiente de restitución** es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas.

En una colisión frontal alineada de dos esferas sólidas las velocidades después del choque están relacionadas con las velocidades antes del choque.

El coeficiente de restitución, que denominaremos con la letra “e” toma valores entre 0 y 1. El valor 1 se da en un choque perfectamente elástico, donde se conserva tanto el momento lineal como la energía cinética del sistema. El valor 0 se da en un choque perfectamente inelástico (o plástico) donde sólo se conserva el momento lineal, una porción de la energía cinética inicial de las partículas se “consume” durante el choque, convirtiéndose en energía de deformación plástica, energía sonora, calor, etcétera.

El coeficiente de restitución se puede definir como la velocidad relativa de alejamiento, dividido entre la velocidad relativa de acercamiento de las partículas.



Durante el impacto normal entre dos cuerpos una fuerza de contacto desarrolla en la región de contacto.

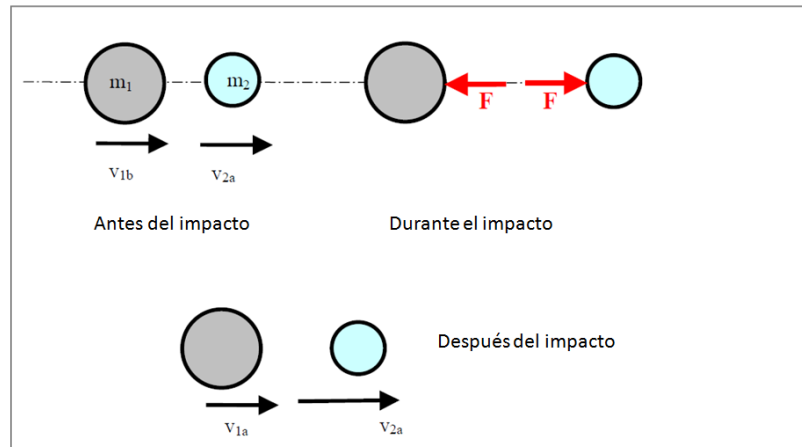


Figura 1: El impacto de dos cuerpos rígidos

Aplicándole el principio de impulso momento a cada cuerpo podemos escribir

$$m_1 v_{1b} - I = m_1 v_{1a} \quad m_2 v_{2b} + I = m_2 v_{2a} \quad (3a, b)$$

Sumando estas dos ecuaciones nos da

$$m_1 v_{1b} + m_2 v_{2b} = m_1 v_{1a} + m_2 v_{2a} \quad (4)$$

Que expresa la conservación de momento. En este caso el coeficiente de restitución es escrito como

$$e = \frac{(v_{2a} - v_{1a})}{(v_{1b} - v_{2b})} \quad (5)$$

Es la relación entre la velocidad de separación y la velocidad de acercamiento. Dando las condiciones iniciales, las ecuaciones (4), (5) pueden usarse para calcular las velocidades después del impacto



1.3.- Modelo de impacto normal

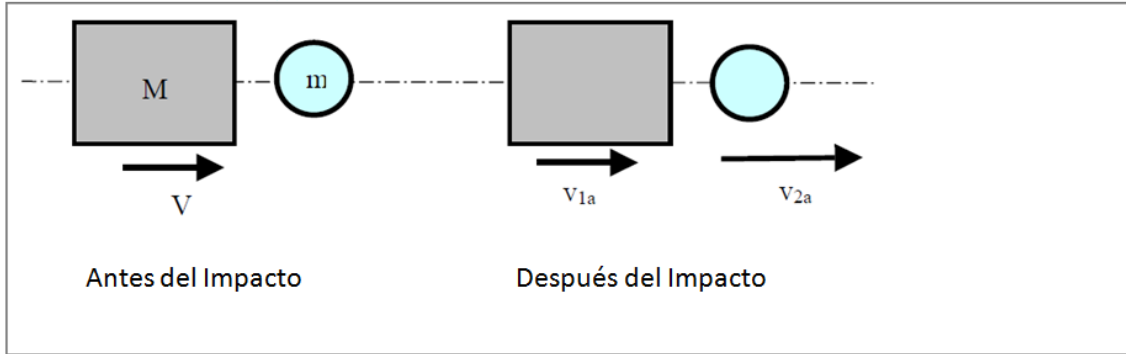


Figura 2: Impacto durante un swing de golf.

Para explicar este modelo considera el problema ilustrado en Fig. 2, se trata de un modelo simple del problema de impacto encontrado en el golf. La cabeza del palo de golf con una masa M se mueve con una velocidad inicial V hacia una pelota estacionaria de masa m . La conservación de ecuación de momento (Ec. 4) nos da:

$$MV = m_1 v_{1a} + m_2 v_{2a}$$

Y de Ec. 5, $e = \frac{(v_{2a} - v_{1a})}{V}$. Solucionando para las dos velocidades desconocidas,

$$V_{1a} = V \frac{M - em}{M + m} \quad V_{2a} = V \frac{M(1 + e)}{M + m} \quad (6a, b)$$

O, en forma no dimensional

$$\bar{v}_{1a} = \frac{v_{1a}}{V} = \frac{1 - ea}{1 + a} \quad \bar{v}_{2a} = \frac{v_{2a}}{V} = \frac{1 + e}{1 + a} \quad (7a, b)$$

donde $a = m/M$. La ecuación 7b señala que la velocidad final de la pelota aumenta cuando el coeficiente de restitución aumenta. Sin embargo, el valor de e es especificado muy precisamente por las reglas oficiales del juego que deja sólo un parámetro para variar: a . La ecuación 7b indica que a medida que la masa del palo aumenta, a se vuelve



más pequeño y la velocidad final de la pelota tiende al valor asintótico $v_{2a} = V(1+e)$. Esto sugiere que haciendo un swing con el palo más pesado la pelota llegará más lejos.

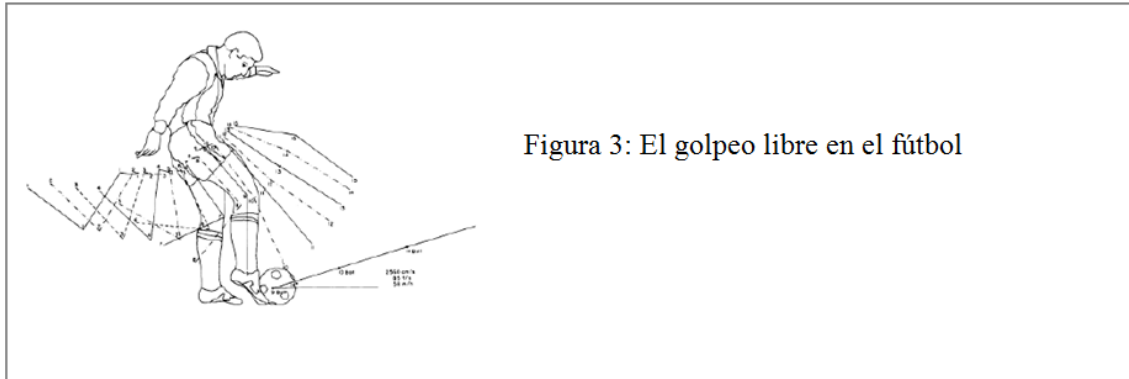
Sin Embargo, esto no tiene en cuenta el hecho que la velocidad V que el jugador puede generar dependa de la masa M como veremos en la siguiente sección.

La relación de la energía cinética de la pelota para la energía cinética inicial del palo de golf es

$$\overline{E_c} = \frac{\left(\frac{1}{2}mv_{2a}^2\right)}{\left(\frac{1}{2}MV^2\right)} = a \left(\frac{1+e}{1+a}\right)^2 \quad (8)$$

La fracción máxima de la energía cinética es transmitida a la pelota cuando $a=1$ como se muestra en la Fig.2. También puede demostrarse que la relación de la restitución de la energía (energía cinética después del impacto / energía cinética antes del impacto) es dada por $(1 + ae^2)/(1+a)$ y que esta proporción disminuye a medida que la relación de masa aumenta.

El modelo desarrollado en esta sección para el swing de golf es también aplicable al fútbol siendo M la masa del pie del jugador, V la velocidad con la que él o ella golpea el balón y m la masa del balón, y e es el coeficiente de restitución. Una pelota de tamaño normalizado está obligada a tener una masa comprendida entre 0.396 ± 0.453 kg, una circunferencia de 0.685 ± 0.711 m y una presión interna de 60.6 ± 111.1 kPa. El valor típico de $M/(M +m)$ es 0.8 y e tiene usualmente un valor aproximado de 0.5. Por consiguiente, según la ecuación 7b, la velocidad de la pelota es usualmente 1.2 veces la velocidad del pie. Desarrollaremos mejor este punto más adelante.



1.4.- FASE DE IMPACTO

1.4.1.- Pre-impacto. Biomecánica de aproximación al balón.

- Introducción

En este punto hacemos referencia a un estudio llevado a cabo por Saša Bubanj y otros, que tenía por objetivo determinar el rango en los valores de algunas variables cinemáticas que entran en juego y examinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los valores de las variables cinemáticas en los intentos de golpeo con precisión con el interior del pie en el fútbol, con posterioridad al acercamiento, en un ángulo de 0 grados y ángulos aproximados, en ángulos de 30 y 60 grados.

Estudios previos en la biomecánica que se centraron en el golpeo preciso en el fútbol indicaron la posible influencia de ciertas variables cinemáticas en la exactitud de golpeo hacia un objetivo. Estos estudios mostraron una disminución de la velocidad de aproximación del jugador de fútbol, así como de las velocidades de conjuntos lineales y angulares y velocidad del balón, en comparación con golpes potentes de balón.

En cuanto a los tiros con efecto curvo, los artículos muestran que el factor determinante en hacer girar un balón era el ángulo entre la dirección de la superficie de impacto del pie que realiza el golpeo y la dirección de giro. Por el contrario, si se golpea en el centro del balón seguirá una trayectoria casi recta y obtendrá la máxima velocidad posible con un mínimo de giro.



Las variables mencionadas que afectan a la precisión también se ven influenciadas por diversos factores, tales como el nivel de formación, es decir, futbolistas profesionales frente a los jugadores de fútbol amateur, género, pierna preferida y la fuerza muscular.

- Resultados

Todos los resultados experimentales recogidos por este estudio se recogen en la Tabla 1.

Variables	0 grados		30 grados		60 grados	
	Media	Des.Típica	Media	Des.Típica	Media	Des.Típica
Ángulo de ataque del balanceo del pie (grados)	74.77	11.34	72.45	8.11	66.94	16.46
Velocidad de aprox. del balanceo del pie (m/s)	12.56	1.66	13.12	1.76	14.03	1.78
Velocidad lineal balón después del tiro (en m/s)	16.37	2.51	15.79	2.25	16.09	2.23
Velocidad angular balón después golpeo(grados/s)	1511.55	772.81	1569.90	828.17	1865.19	872.48
Ángulo dirección balón después golpeo (grados)	19.31	11.64	24.77	11.53	27.66	8.35
Núm. rotaciones balón después de ser golpeado	4.20	2.15	4.36	2.30	5.18	2.42
Punto de impacto en el pie PCF (en%)	0.50	0.07	0.52	0.08	0.54	0.08
Duración contacto pie-balón (s)	0.0174	0.00	0.0173	0.00	0.0175	0.00

Observando la tabla podemos fijarnos en algunos valores más significativos. Por ejemplo, con respecto a los valores medios de la velocidad de aproximación de la oscilación del pie, el valor medio más alto se logró al golpear la pelota después de la aproximación de los sujetos en un ángulo de 60 grados (14,03 m/s), a continuación,



después del acercamiento en un ángulo de 30 grados (13,12 m/s) y, finalmente, después de la aproximación con un ángulo de 0 grados (12,59 m/s).

El mayor valor medio de la velocidad lineal del balón después del tiro libre se logró después del acercamiento de los sujetos en un ángulo de 0 grados (16,37 m/s), a continuación, después del acercamiento con un ángulo de 60 grados (16,09 m/s) y, finalmente, después de la aproximación con un ángulo de 30 grados (15,79 m/s).

Con respecto a la velocidad angular de la pelota después del saque, el valor medio más alto fue alcanzado al golpear la pelota después del acercamiento de los sujetos en un ángulo de 60 grados (1.865,19 grados/s), y después con la aproximación en un ángulo de 30 grados (1.569,90 grados/s) y, finalmente, después de la aproximación con un ángulo de 0 grados (1.511,55 grados/s).

En cuanto a los valores medios de la duración del contacto pie-balón, los valores medios alcanzados al golpear la pelota después del acercamiento de los sujetos en ángulos de 0, 30 y 60 grados, es casi igual (0.0174, 0.0173 y 0.0175 s, respectivamente).

- Conclusión

En este apartado hemos dedicamos un pequeño estudio para ver la validez de nuestra simulación. Se ha analizado otros puntos como puede ser la aproximación al balón en el momento del lanzamiento y su influencia en el golpeo de éste. Para ellos nos basamos en una investigación llevada a cabo para cuantificar el rango en los valores de las variables cinemáticas y examinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas.

Los resultados obtenidos nos indican que la relación entre los valores medios en diferentes ángulos de aproximación, era esperada, sin embargo el pequeño rango de valores medios del ángulo de ataque del pie (7,83 grados) indica que los sujetos de forma casi automática establecen su balanceo del pie en una posición casi idéntica antes de proceder a golpear al balón, sin tener en cuenta a los diferentes ángulos de aproximación (0, 30 y 60 grados).



En esta investigación, se determina que **no existe diferencia estadísticamente significativa en la velocidad lineal de la pelota después del golpeo y en el tiempo de contacto entre el pie y el balón, después de diferentes ángulos de aproximación**. El valor promedio de la velocidad lineal del balón después de ser golpeado osciló entre 15,79 m/s y 16,37 m/s y el valor medio del tiempo de contacto entre el pie y el balón osciló entre 0,0173 s y 0,0175 s.

Estas variables son importantes en nuestra simulación puesto que de ellas obtendremos la fuerza a aplicar a nuestro balón. Este estudio nos permite concluir que la simulación que haremos del golpeo de un balón de fútbol es válida.

1.5.-Impacto

1.5.1.- Ecuación de colisión

La velocidad del balón depende de la velocidad del pie (segmento distante del tronco) de impacto así como también la calidad de impacto entre el pie y el balón. El coeficiente de correlación entre la velocidad del balón y la velocidad del pie referido en este estudio suele ser generalmente alto, en torno a 0.8. Mientras más alta sea la velocidad del pie antes del impacto, más pequeño el contacto entre el balón y el pie y más alta la velocidad de la pelota. Por esta razón, la relación de la velocidad balón-pie ha sido considerada como un índice de éxito de un tiro. Para golpes de interior, la proporción de velocidad entre el balón y el pie suele situarse en torno a un rango entre 1.06 a 1.65 dependiendo del área del pie que haya sido usada para examinar velocidad del pie.

El mecanismo de colisión entre el pie y la pelota puede describirse por la siguiente ecuación:

$$V_{balón} = V_{pie} \frac{M(1+\ell)}{(M+m)} \quad (9)$$

donde $V_{balón}$ = la velocidad de la pelota, V_{pie} = velocidad del pie, M = la masa efectiva de golpeo de la pierna, m = masa del balón y ℓ = el coeficiente de restitución. El



término $(1 + \ell)$ está relacionado con la estabilidad del pie en el impacto y la proporción $M / (M + m)$ proporciona una indicación de la rigidez del pie y la pierna en el impacto.

Una ecuación diferente para describir la velocidad de la pelota después del impacto del pie fue desarrollada por Bull Andersen y otros:

$$V_{balón} = \frac{I \cdot V_{p,antes} \cdot (1 + \ell)}{I + m_{balón} \cdot r^2} \quad (10)$$

donde $V_{balón}$ = la velocidad de la pelota, I = el momento de inercia del segmento espinilla-pie sobre la articulación de la rodilla, $V_{p,antes}$ = la velocidad del pie antes del impacto, ℓ = el coeficiente de restitución, $m_{balón}$ = la masa del balón y r^2 = la distancia entre la articulación de la rodilla y el centro de la pelota así como también la distancia entre la articulación de la rodilla y el punto de contacto en el pie (la longitud r es la misma entre estos puntos).

1.5.1.1.- Coeficiente de Restitución

El coeficiente de restitución en un golpeo de un balón de fútbol podemos definirlo como:

$$\ell \cdot (V_{p,antes} - V_{balón,antes}) = -(V_{p,después} - V_{balón}) \quad (11)$$

donde $V_{p,antes}$, la velocidad del pie antes del impacto, $V_{p,después}$, la velocidad del pie después del impacto y $V_{balón}$ la velocidad de la pelota.

El coeficiente de restitución cuantifica la superficie para la cual una colisión perfecta es modificada por las propiedades del material de los objetos que colisionan. Una colisión elástica perfecta demuestra un $\ell = 1$. El coeficiente de restitución se extiende desde 0.463 a 0.681. Se ha determinado que un cambio en el coeficiente de restitución del 0.5 al 0.65 conduce a una subida de 10% en la velocidad de la pelota. El coeficiente



depende de las propiedades mecánicas de la pelota, la bota, el tobillo y el pie del impacto.

En el momento del contacto de la pelota el pie se mueve simultáneamente con el balón para una distancia igual a aproximadamente $2/3$ del diámetro de la pelota. Por otra parte, grandes deformaciones aparecen durante el impacto del balón que causan un incremento de fuerzas y liberación de energía. Consecuentemente, aparte de los fenómenos observados durante la fase de preimpacto, hay que comprender la importancia y los mecanismos durante la fase de colisión.

En particular, el coeficiente de restitución dependerá de la cantidad de deformación del pie y la pelota en el impacto. Mientras menos deformación en el pie, más alto será el coeficiente de restitución. La cantidad de deformación depende de la masa efectiva de golpeo que es el equivalente del objeto impactante (en este caso, el pie y la espinilla). La masa efectiva de golpeo aumenta a medida que la extremidad se vuelve más rígida por la activación muscular. Esto ocurre cuando el punto de contacto se encuentra más cerca del tobillo en lugar de los metatarsos.

Basada en la ecuación (10), la velocidad de la pelota también puede verse afectada por el momento de inercia del segmento espinilla-pie. Bull Andersen y otros demostrando que las alteraciones en el momento de inercia no afectan a la velocidad de la pelota. Parece, por tanto, que la rotación de toda la pierna en el momento del impacto induce a reducir la velocidad del pie y el balón. Si el objetivo de la patada es maximizar velocidad de la pelota, entonces esta técnica no se recomienda.

Los estudios anteriormente citados sugieren que la ejecución de golpeo cuyo objetivo sea maximizar velocidad del balón considerablemente depende de la velocidad alta del pie antes del impacto y de una pequeña deformación del pie en el impacto. Usando una metodología diferente, Tsaousidis y Zatsiorsky estimaron que más del 50% de la velocidad que se imparte al balón se hace sin contribución de la energía potencial de deformación de la pelota. Estos autores sugirieron que la velocidad de la pelota se ve afectada por dos factores. En primer lugar, la energía o el momento que es el resultado



del movimiento coordinado y del comportamiento mecánico del pie de antes del impacto y segundo lugar, la energía que es debida al trabajo muscular durante la fase de colisión. En general, esto está de acuerdo con estudios previos (Asami y Nolte, 1983; Bull Andersen y otros, 1999). Sin embargo, el trabajo de Tsaousidis y de Zatsiorsky (1996) enfatiza más en la contribución por el trabajo del músculo del tobillo en el impacto comparado con otros estudios mencionados. Esta diferencia podría ser debida a una perspectiva diferente usada: los primeros se centraron más en examinar la calidad de la interacción pie-balón durante un tiro libre en fútbol mientras que los otros prestaron más atención a examinar las condiciones necesarias para maximizar la velocidad del balón después del impacto.

1.5.1.2.- Distancia de desplazamiento o compensación

La distancia de compensación o desplazamiento entre el punto de impacto y el centro de la pelota parece jugar un papel importante para la trayectoria y la dirección de la pelota de después del impacto. Un incremento en la distancia de compensación disminuye la velocidad del balón pero aumenta giro de la pelota hasta que la distancia de compensación excede el radio de la pelota. El giro también se puede impartir al balón aún cuando el coeficiente de fricción es cero. Esto es porque hay una deformación local de la pelota durante el impacto que permite a la transmisión de las fuerzas al balón. Por consiguiente, parece que la distancia de desplazamiento del eje de la pelota tiene un efecto mucho mayor sobre la rotación que la variación del coeficiente de fricción (Asai y otros, 2002). Además, si la fricción entre bota y pelota es reducida, posiblemente causada por condiciones de humedad, se observará menos giro y menos duración del vuelo (Carre y otros, 2002).

De los estudios disponibles, se puede sugerir que un futbolista debe maximizar la velocidad del pie (la velocidad angular de la parte más baja de la pierna) y golpear el balón con la parte superior del pie (más cerca para el tobillo) para de esta forma maximizar la velocidad del balón. El papel de los músculos del tobillo durante el impacto no está claro; sólo podríamos especular que el trabajo del músculo se



produciría cuando el jugador tiene la intención de patear la pelota al máximo pero hacia una dirección específica o con un cierto giro.

1.5.1.3.- Tiempo de Contacto

Para establecer realizar una correcta simulación necesitamos conocer de antemano ciertos datos como puede ser el tiempo de contacto. Los datos que a continuación se exponen fueron realizados experimentalmente por Asai y otros (2002). El valor promedio de velocidad del balón para los sujetos fue de 25,44 m/s, mientras que el tiempo de contacto promedio fue de 9,12 ms. Otros estudios más antiguos como los llevados a cabo por Zernicke y Robert (1978) encontraron velocidades de 27,4 m/s en un estudio similar, mientras que Asami y Nolte (1983) encontraron tiempos de contacto de 12 ms. Las diferencias entre los resultados actuales y los datos anteriores se pueden explicar por diferencias en la velocidad de oscilación de las piernas y la diferencia biomecánica de los jugadores. Los datos de velocidad del pie se basan en la velocidad de un punto intermedio del pie observado

	Suj.	A	B	C	D	E	F	Media	σ (DT)
Velocidad Balón	(m/s)	25.17	25.21	24.46	25.96	26.98	25.21	25.44	0.76
Impulso	(Ns)	10.93	10.96	10.63	11.28	11.59	10.96	11.06	0.33
Tiempo contacto	(ms)	9.33	9.33	8.88	9.11	8.67	9.33	9.12	0.28
Distancia contacto	(m)	0.144	0.158	0.143	0.150	0.137	0.150	0.147	7.28
Velocidad pie	(m/s)	23.83	22.17	21.92	22.90	24.66	23.22	23.12	1.03

Tabla 1 Velocidad del balón, impulso, tiempo de contacto, distancia de contacto del pie y velocidad en el experimento



1.6.- El golpeo con efecto curvo en un balón de fútbol. Efecto de la distancia de compensación del punto de impacto.

- Introducción

En puntos anteriores hemos mencionado que los estudios previos de la técnica de golpeo de balón se han centrado en varios aspectos, en la pierna que realiza el golpeo, en la relación entre el movimiento de la pierna que golpea, la fuerza muscular y la masa segmental del músculo. También se ha tratado la posición de la pierna de apoyo y el ángulo de aproximación o ataque. Otros trabajos investigaron sobre la estrecha correlación que existe entre la velocidad de las articulaciones de los pies y la velocidad del balón antes del impacto.

Aunque la mayoría de los estudios realizados se han preocupado por golpes de empeine, en los últimos años la técnica de los golpes para girar la pelota y curvar la trayectoria es cada vez más utilizada. Aunque sobre esto ha habido algunos informes, sobre todo en la bola curva en el béisbol, existen pocos estudios sobre el golpeo curvo en el fútbol

Estos estudios señalaron que el movimiento de la pierna en el tiro libre con efecto curvo es más complejo que el de empeine. En este proyecto intentaremos aportar algo más a este tipo de golpeo mediante el análisis de elementos finitos y la comparación con resultados experimentales realizados en otros estudios.

- Distancia de desplazamiento, rotación del balón y velocidad

Caso	Distancia de desplazamiento (m)	Relación de giro (r/s)	Velocidad del Balón (m/s)
1	-0.16	-10.6	6.2
2	-0.14	-13.0	10.9
3	-0.12	-11.0	15.2



4	-0.10	-9.7	19.0
5	-0.08	-8.2	20.5
6	-0.06	-5.7	22.9
7	-0.04	-3.5	23.5
8	-0.02	-3.0	25.5
9	0	-1.9	26
10	0.02	0.8	25.9
11	0.04	4.0	23.1
12	0.06	6.9	20.7
13	0.08	10.5	18.5
14	0.10	14.6	15.1
15	0.12	16.2	11.2
16	0.14	9.7	4.5
17	0.16	0.0	0.0

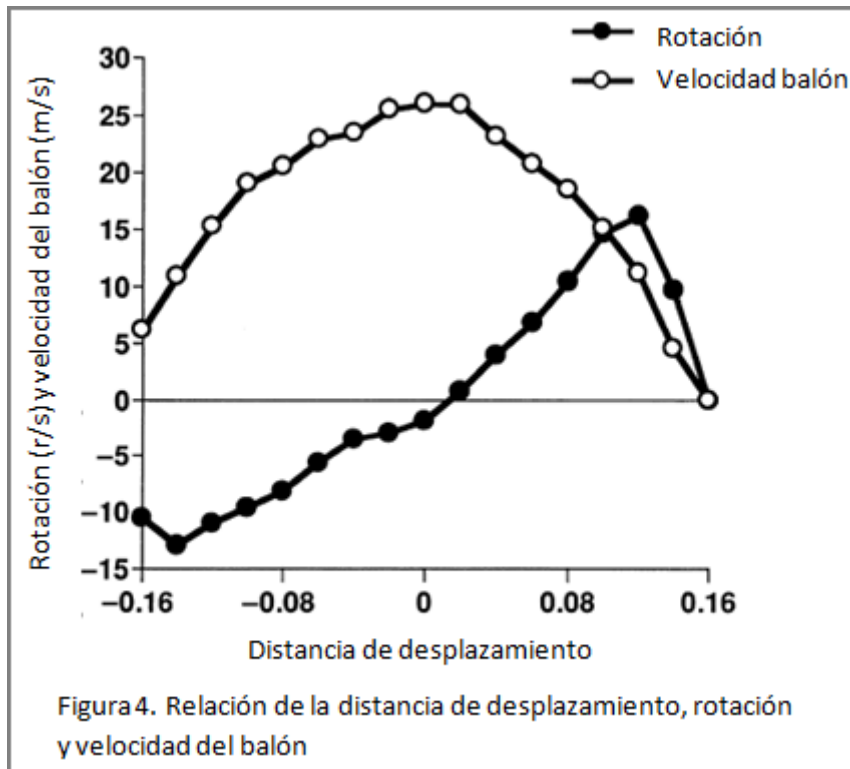
Tabla 1: Comparación de la distancia de desplazamiento, la relación de giro y velocidad del balón utilizando un modelo 3D digitalizado de un golpeo de empeine.

La relación entre la distancia de desplazamiento de la parte de impacto al centro del balón y el giro fue establecida por Asai (2002), mediante un modelo 3D digitalizado de un golpeo de empeine. Llevó a cabo simulaciones en las cuales movió el punto de impacto en cada dirección ± 0.16 metros a ambos lados con incrementos de 0,02 m del centro del balón y fijando el coeficiente de fricción en 0.4.

La figura 4 muestra que, aunque el giro aumenta de acuerdo con un aumento en la distancia de desplazamiento, disminuye rápidamente después de que la distancia de desplazamiento supera el radio del balón. Conviene aclarar que sigue habiendo contacto



el pie sigue impactando con la pelota, debido a su anchura. En comparación, la velocidad del balón disminuye con un aumento en la distancia de desplazamiento.



Estos resultados sugieren que en el caso de que la distancia de desplazamiento se acerca a la radio del balón, el área de contacto y el tiempo disminuyen rápidamente y la energía del impacto se transfiere ligeramente. Por lo tanto, esto nos indica que la rotación del balón y la velocidad de éste están relacionadas con un cambio de la distancia de desplazamiento, dentro del rango del radio del balón.

- Coeficiente de fricción y giro

La figura 6 obtenida de la investigación realizada por Asai y otros (2002), muestra la variación de la rotación con el coeficiente de fricción para los impactos a 40 y 80 mm



desde el eje del balón. Se puede observar que el giro se incrementa a medida que el coeficiente de fricción aumenta y que con la duplicación de la desviación del eje de la pelota aproximadamente se duplica el giro. Estos resultados intuitivamente son esperados porque un alto coeficiente de fricción impide que el pie resbale sobre la superficie de la pelota y un gran desplazamiento del punto de impacto del centro de masa permite que el pie de aplicar un momento mayor a la pelota. Es interesante notar que, incluso con el coeficiente de fricción a cero, se puede impartir giro todavía al balón. Esto se debe a la deformación local de la pelota durante el impacto alrededor del pie permitiendo que las fuerzas se transmitan a la pelota alrededor de su eje. Es evidente que el desplazamiento del eje de la bola tiene un efecto mucho más grande que una variación en el coeficiente de fricción.

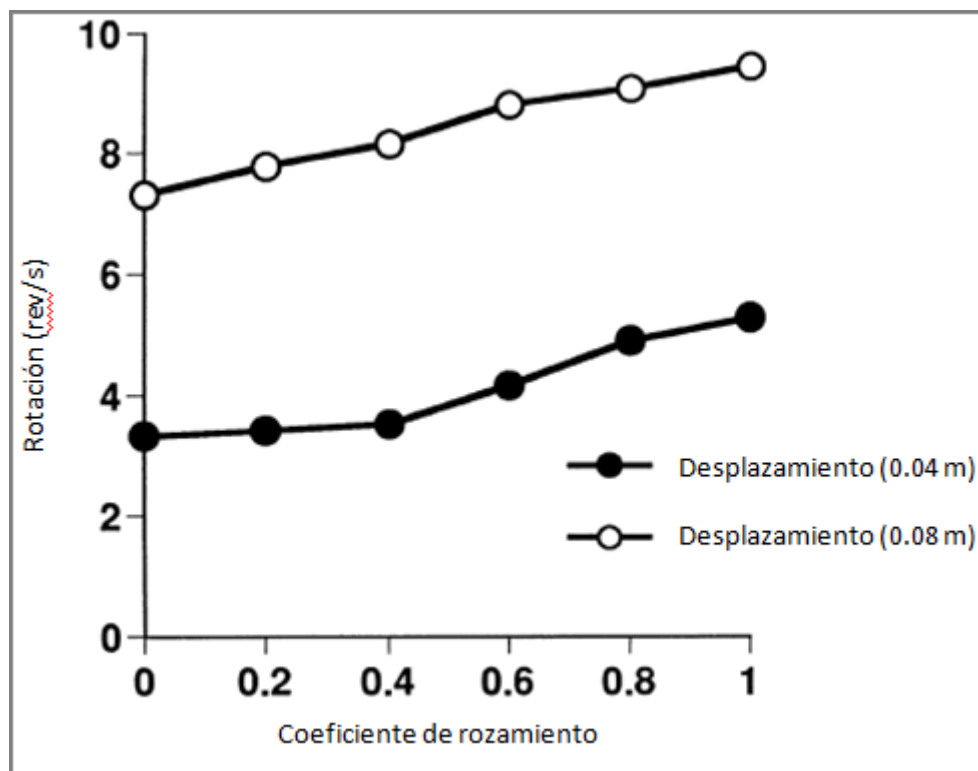


Figura 6. La relación de la relación de giro y el coeficiente de fricción.



- Conclusión

El propósito de este punto ha sido evaluar las características fundamentales que causan el giro en una pelota de fútbol en un golpeo de balón con efecto. La distancia de desplazamiento entre el pie y el eje del balón afecta más al giro que el coeficiente de fricción. Como se ha mencionado en un punto anterior la rotación de la pelota ocurre, incluso si el coeficiente de rozamiento cinético es igual a 0, debido a la deformación local que se produce en el balón alrededor del pie durante el impacto permitiendo que las fuerzas se transmitan a la pelota alrededor de su eje. Como ya sabemos la rotación del balón aumenta con la distancia de desplazamiento entre el pie y el eje de la pelota y con el incremento del coeficiente de rozamiento cinético. La distancia de desplazamiento entre el pie y el eje del balón afecta más al giro que el coeficiente de fricción. Algunos estudios denotan que variando el coeficiente de fricción de 0,0 a 1,0 produce un aumento en el giro de 13 rad/s como máximo. Se establece una relación de correspondencia entre la velocidad del balón y el giro para diferentes distancias de desplazamiento.

FORMAS DE DETERMINAR LA DENSIDAD DEL COMPUESTO DE POLIURETANO Y LA PRESIÓN A APLICAR EN EL BALÓN PARA SIMULAR EL GOLPEO

- Densidad Poliuretano

Utilizaremos dos métodos para determinar la densidad del compuesto de poliuretano con el que hemos implementado el balón.

- A partir de la densidad del aire:

Conociendo que la densidad del aire en C.N es $d_{\text{aire}} = 1.2 \text{ Kg/m}^3$, el espesor $e = 0.005 \text{ m}$, el diámetro del balón $\phi = 0.22\text{m}$, su peso $m_{\text{balón}} = 0.450 \text{ Kg}$ y la presión interna de éste $p_{\text{int}} = 1.1 \text{ atm}$:



Sabemos, gracias a la ecuación de los gases ideales, que la presión es directamente proporcional a la densidad. Al aumentar la presión lo hace también, y además de forma lineal, la densidad. De esta forma tenemos que la densidad el aire interior del balón es:

$$d_{AB} = 1.2 * 1.1 = 1.32 \text{ Kg/m}^3$$

El volumen del aire del balón lo podemos determinar, puesto que sabemos que el radio r de la esfera de aire es $r = R - e = 0.11 - 0.005 = 0.105 \text{ m}$, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{aire}} = \frac{4}{3} * \pi * r^3 = \frac{4}{3} * \pi * 0.105^3 = 4.849 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

$$d_{AB} = \frac{m_{\text{aire}}}{V_{\text{aire}}} \Rightarrow m_{\text{aire}} = 1.32 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 4.849 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 6.4 * 10^{-3} \text{ Kg}$$

El peso del compuesto de poliuretano será:

$$m_{\text{poliuretano}} = m_{\text{Total}} - m_{\text{aire}} = 0.450 - 6.4 * 10^{-3} = 0.4436 \text{ Kg}$$

Y su volumen:

$$V_{\text{poliuretano}} = \frac{4}{3} * \pi * (R^3 - r^3) = \frac{4}{3} * \pi * (0.11^3 - 0.105^3) = 7.262315 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

$$d_{\text{poliuretano}} = \frac{m_{\text{poliuretano}}}{V_{\text{poliuretano}}} = \frac{0.4436 \text{ Kg}}{7.262315 * 10^{-4} \text{ m}^3} = 610.8245 \text{ Kg/m}^3$$

Mediante este método determinamos que la densidad del compuesto de poliuretano que simulará nuestro balón será: $d_{\text{poliuretano}} = 611 \text{ Kg/m}^3$.



- A partir de su peso molecular:

Datos de partida: peso molecular aire = 0.0289 Kg/mol, espesor e 0.005 m, el diámetro del balón $\varnothing = 0.22\text{m}$, peso $m_{\text{balón}} = 0.450\text{ Kg}$ y la presión de éste $p_{\text{int}} = 1.1\text{ atm}$:

Determinamos el volumen del balón:

$$V_{\text{balón}} = \frac{4}{3} * \pi * R^3 = \frac{4}{3} * \pi * 0.11^3 = 5.57528 * 10^{-3} \text{m}^3$$

$$V_{\text{poliuretano}} = \frac{4}{3} * \pi * (R^3 - r^3) = \frac{4}{3} * \pi * (0.11^3 - 0.105^3) = 7.262315 * 10^{-4} \text{m}^3$$

Entonces:

$$V_{\text{aire}} = V_{\text{balón}} - V_{\text{poliuretano}} = 5.5753 * 10^{-3} - 7.26231 * 10^{-4} = 4.849 * 10^{-3} \text{m}^3$$

Según la ecuación de los gases ideales:

$$p * V = n * R * T$$

Sustituyendo:

$$1.1 * 10^5 * 4.849 * 10^{-3} = n * 8.314 * 295$$

$$n = \frac{1.1 * 10^5 * 4.849 * 10^{-3}}{8.314 * 295} = 0.217 \text{ mol}$$

Como conocemos el peso de un mol de aire: 0.0289 Kg/mol

$$m_{\text{aire}} = 0.217 \text{ mol} * 0.0289 \text{ Kg/mol} = 6.285 * 10^{-3} \text{Kg}$$

$$m_{\text{poliuretano}} = m_{\text{Total}} - m_{\text{aire}} = 0.450 - 6.285 * 10^{-3} = 0.4437 \text{ Kg}$$

Por lo tanto, la densidad del compuesto de poliuretano será:

$$d_{\text{poliuretano}} = \frac{m_{\text{poliuretano}}}{V_{\text{poliuretano}}} = \frac{0.4437 \text{ Kg}}{7.262315 * 10^{-4} \text{ m}^3} = 610.98 \text{ Kg/m}^3$$



Llegamos al mismo resultado que anteriormente. De esta forma podemos asignar, al compuesto de poliuretano que vamos a utilizar para definir en Abaqus, una densidad:

$$d_{\text{poliuretano}} = 611 \text{ Kg/m}^3$$

- **Fuerza aplicar en el balón**

Para determinar la fuerza a aplicar en el balón para simular un golpeo de éste, utilizaremos datos de estudios realizados experimentalmente y a los cuales hemos hecho referencia en este proyecto.

De esta forma, la velocidad media de salida del balón la hemos estimado en 26 m/s y el tiempo de contacto entre el pie y el balón en 10 ms.

Además de estos datos, conocemos también los inherentes al balón. Para este caso, recordamos que la masa del balón $m_{\text{balón}} = 0.450 \text{ Kg}$.

Mediante la segunda Ley de Newton podemos obtener fácilmente la expresión:

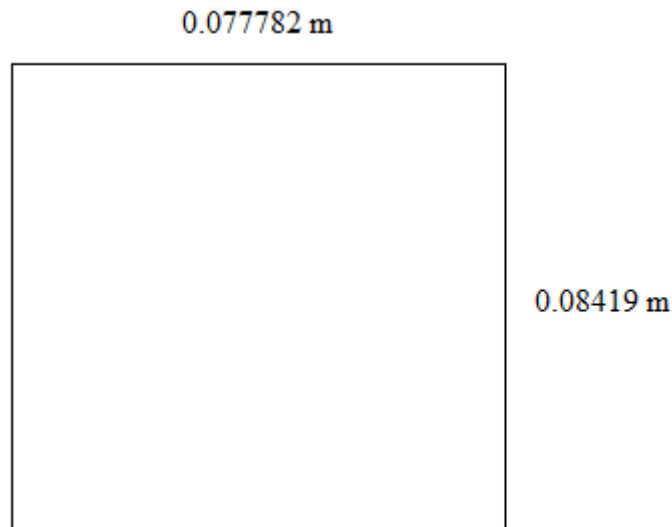
$$F * t = m * v$$

Despejando la fuerza:

$$F = \frac{m * v}{t} = \frac{0.450 * 26}{10 * 10^{-3}} = 1170 \text{ N}$$

Acabamos de calcular la fuerza necesaria para simular un golpeo de balón con las características que le hemos impuesto.

En nuestro ejemplo de Abaqus simulamos una fuerza superficial o presión sobre el balón que es más acorde con la realidad. La superficie de contacto la hemos estimado en cuatro de las particiones que se han realizado en la simulación y que tienen un área en proyección sobre plano tangente al centro de:



El área aproximada de contacto será:

$$A \approx 77.782 * 10^{-3} * 84.19 * 10^{-3} = 6.5485 * 10^{-3} m^2$$

Y por tanto, la fuerza superficial a introducir en Abaqus tendrá un valor:


$$F_{sup} = \frac{F}{A} = \frac{1170 N}{6.548 * 10^{-3} m^2} = 178680.51 N/m^2$$

Es decir, cuando implementemos las distintas condiciones de carga y de borde en Abaqus, la fuerza que simule el golpeo será una presión de valor:

$$F_{sup} = 178680 N/m^2$$

1.2.- IMPLEMENTACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

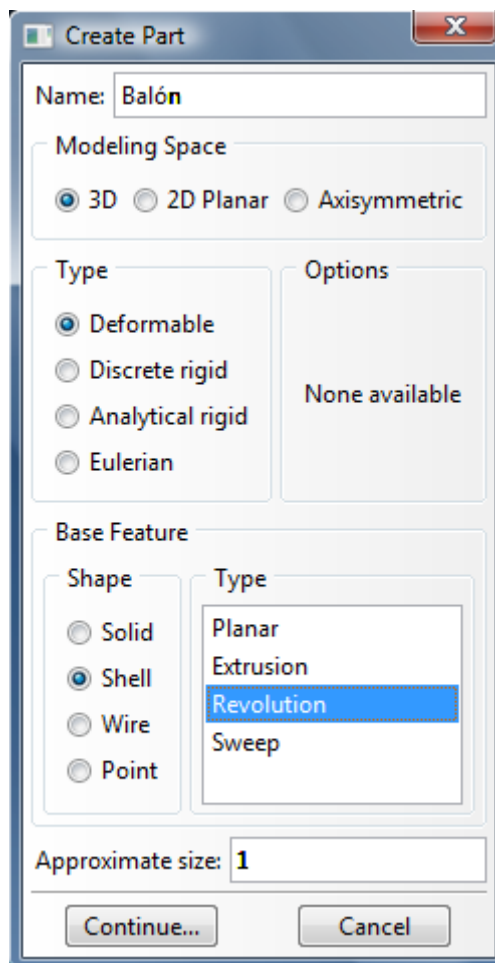
Implementaremos el comportamiento de un balón de fútbol cuando es golpeado. Vamos a comenzar creando las dos partes de las que constará nuestro estudio.

Al abrir Abaqus nos encontraremos en el módulo *Part*. Buscamos en el área de las herramientas y pulsamos “*Create Part*” , aparecerá una ventana emergente donde asignaremos el nombre **Balón** y un tamaño aproximado de **1**. Para el resto de valores introducimos:




- El valor de **3D** para *Modeling Space*.
- Tipo *Deformable*
- En el recuadro *Base Feature* marcaremos *Shell* y en *type*: **Revolution**.


De forma que el diálogo nos quedará como muestra la siguiente figura:




Pulsamos 


Se nos ha abierto el Sketch. Utilizamos la herramienta “*Create Circle*”  y damos los valores, en el área de aviso de, **(0,0)** para el centro y de un punto del perímetro, por

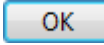


ejemplo **(0.11,0)**. Cancelamos el procedimiento pulsando  puesto que no queremos continuar haciendo círculos, pero no salimos del Sketch.

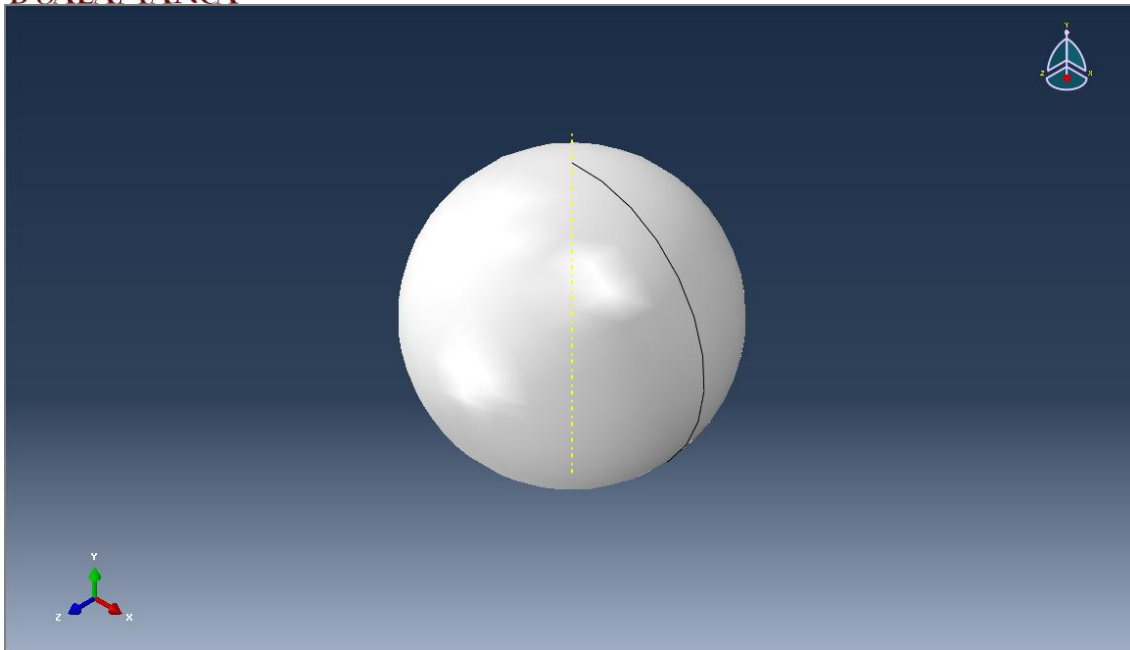
Trazaremos una línea vertical que pase por el centro de nuestro círculo y que dividirá la circunferencia en dos y nos servirá como eje de revolución. Nos vamos a la barra de herramientas y Pulsamos *Add* → *Construction* → *Vertical* e introducimos **(0.0)**.

A continuación, marcamos *Edit* → *Auto-Trim* y seleccionamos la parte izquierda de nuestra circunferencia para eliminarla. Cancelamos procedimiento .

Ya hemos definido nuestra sección de revolución. Presionamos  en el área de aviso y salimos del Sketch. Percibimos esto por el cambio en la zona de las herramientas.

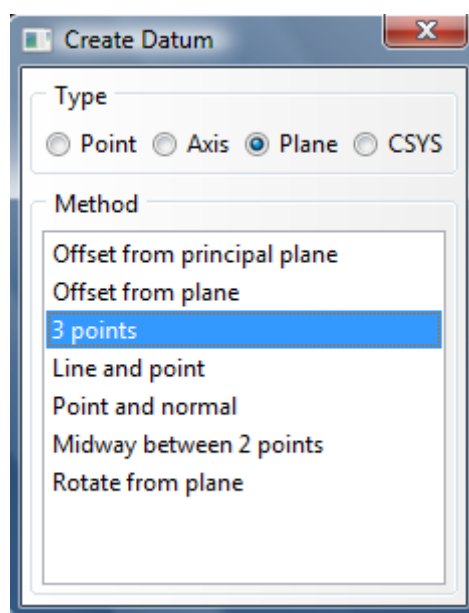
Marcamos la línea vertical que nos servirá con eje de revolución. Se abrirá la ventana *Edit Revolution* para que establezcamos parámetros de revolución y otras opciones relacionadas. Introducimos el valor del ángulo **360** y dejamos lo demás por defecto. Y pulsamos .

La pantalla nos mostrará la siguiente imagen:



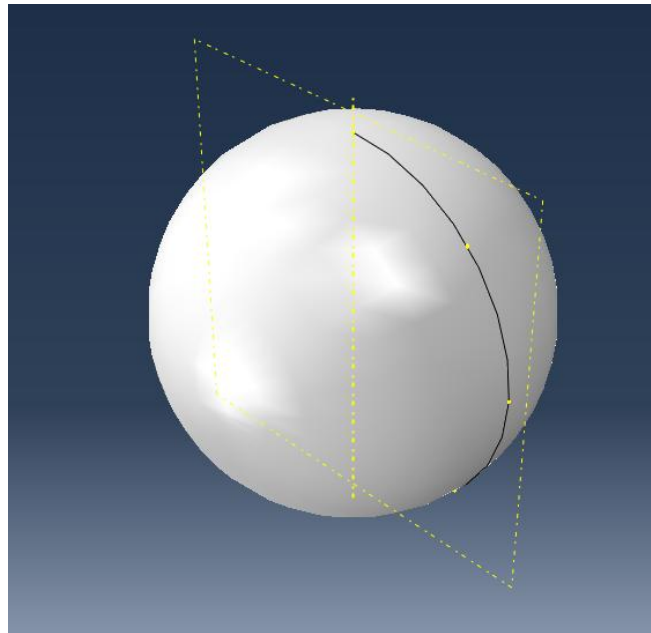
En el siguiente paso a realizar será la creación de distintos planos de datos. Éstos particionaran la superficie del balón y podrán definir, de esta manera, distintas zonas de impacto donde poder aplicar la fuerza.

Nos vamos a *Tools* → *Datum...* y abriremos la ventana *Create Datum*. Crearemos un plano mediante el método de los tres puntos. Marcamos **Plane** y en **Method 3 points**, como indica la figura:

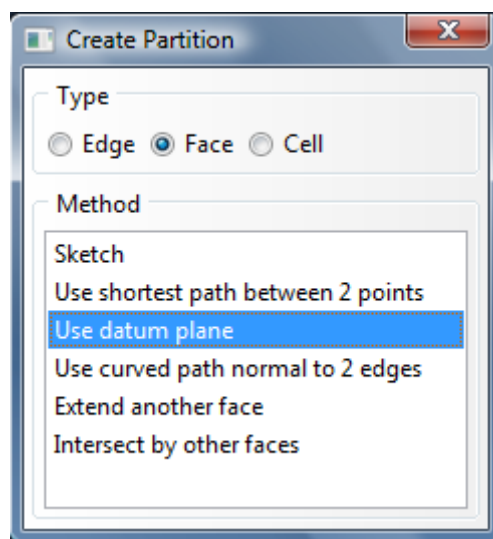




Seleccionamos tres puntos que nos aparecen en la pantalla iluminados en amarillo a lo largo de la línea fina que tenemos sobre la superficie de nuestro balón. De esta forma hemos creado un plano de datos.




Mediante *Tools* → *Partition...* y se abrirá la ventana *Create Partition* marcamos *Face* y el método *Use datum plane*.



Marcamos en la pantalla sobre el plano de datos que hemos creado anteriormente. De esta forma nos queda definida la partición, pulsamos **Create Partition**.

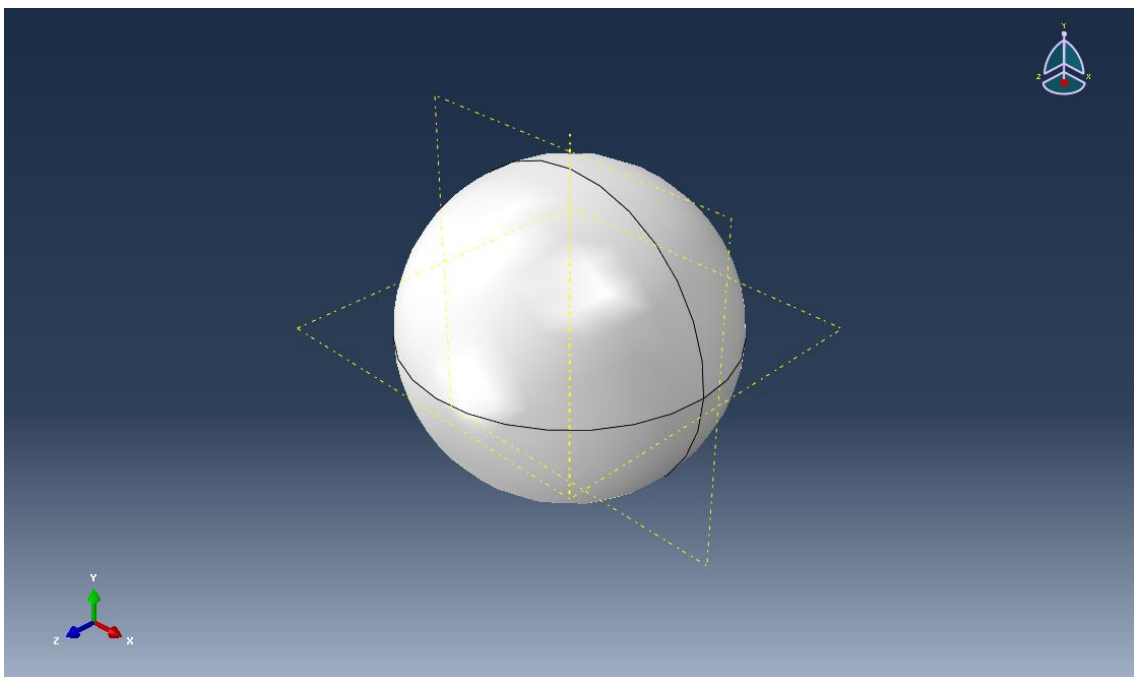


De nuevo, volvemos a utilizar la ventana *Create Datum...*, si la cerramos anteriormente repetimos la acción, nos vamos a *Tools* → *Datum...* y se abrirá. Marcamos **Plane**, pero esta vez, por el método **Midway between 2 points**. En la pantalla, elegimos los dos puntos de intersección del eje de revolución y el balón. De esta forma hemos creado un segundo plano de datos perpendicular al primero.


Nota: para poder marcar el punto inferior necesitaremos utilizar  “*Rotate View*”. La seleccionamos de la barra de herramientas y con la ayuda del ratón podremos girar la imagen tridimensional a nuestro antojo. De esta forma podremos acceder a todos los puntos que se encuentran “ocultos”, según el enfoque que se esté utilizando.

De forma análoga procedemos a la partición. *Tools* → *Partition...* y en *Create Partition* marcamos **Face** y el método **Use datum plane**. Marcamos las caras a partir, en este caso las dos semiesferas que existen, y pulsamos **Done**. Seleccionamos el plano de datos correspondiente **Create Partition**.

La pantalla mostrará la siguiente imagen:





Cada que hemos acabado uno de los pasos podemos cancelar el procedimiento , o seleccionar otra herramienta directamente.

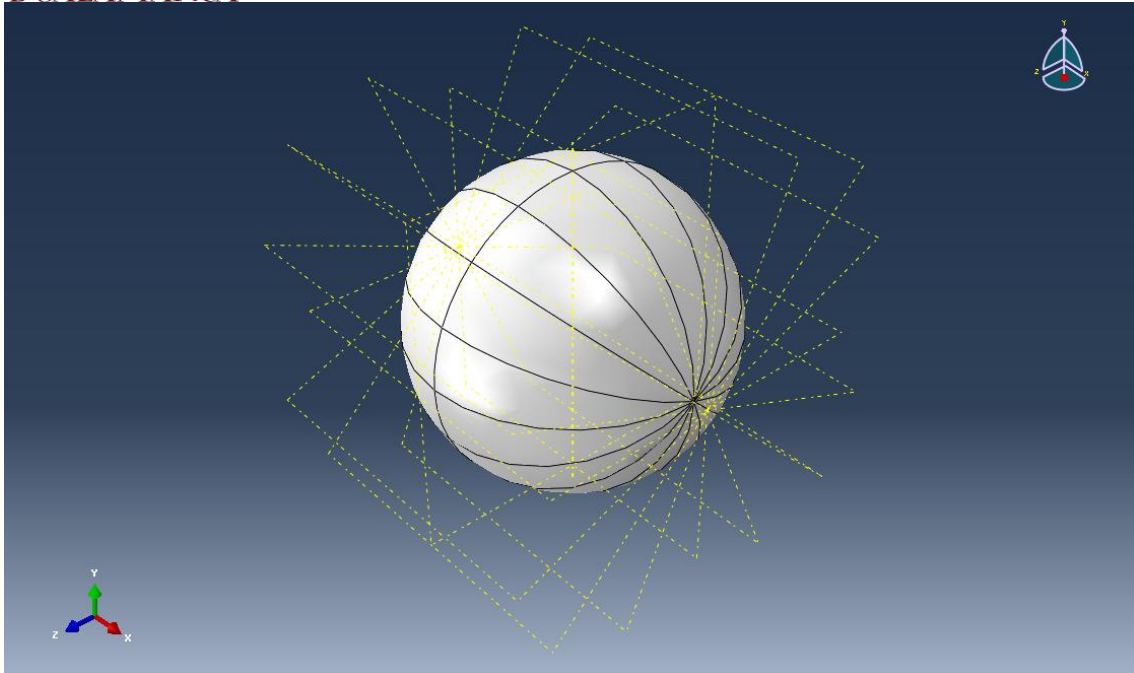
Es aconsejable que al realizar la selección de las caras o superficies que se van a particionar utilizar una ventana de selección para poder elegir las todas a la vez. Esto se realiza de la siguiente manera:

1. Hacemos click con el ratón en la pantalla en una zona fuera de la geometría de nuestra pieza.
2. Sin soltar arrastramos y cubrimos la totalidad de la pieza mediante una ventana que generamos.
3. Soltamos y podemos comprobar que hemos seleccionado completamente la geometría de la pieza en cuestión puesto que se tornará roja.

En nuestro estudio estimamos realizar más particiones para poder obtener, de esta forma, muchas más zonas de golpeo. Es decir, zonas donde poder ejercer la presión que simule el golpeo del balón.

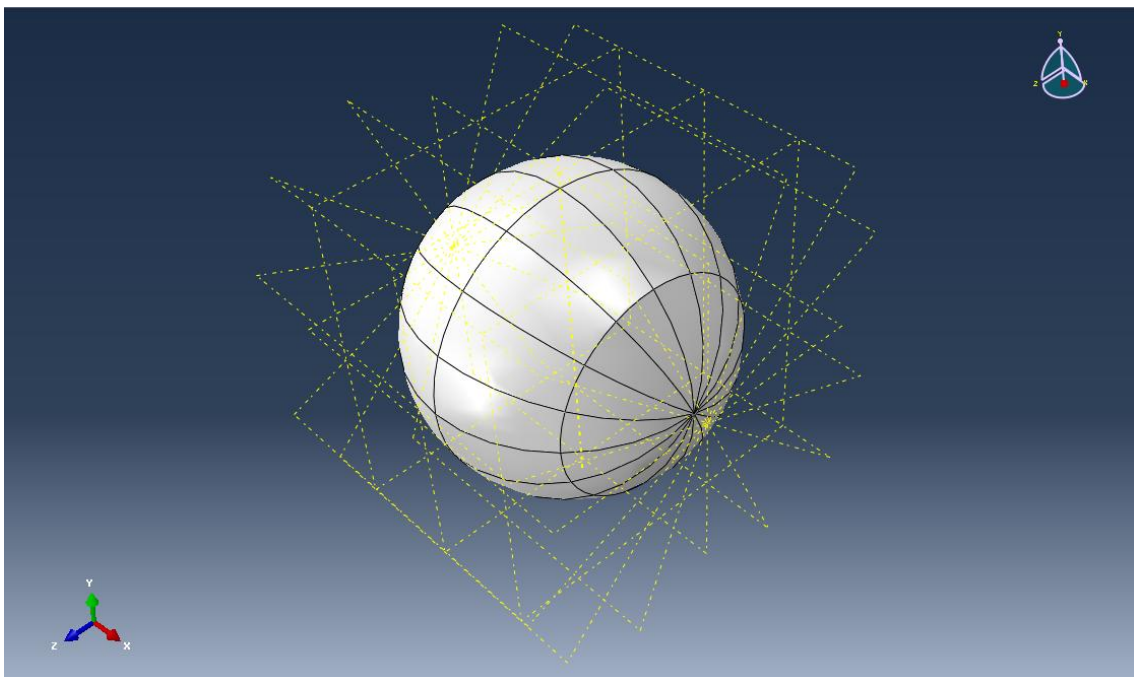
Por tanto, mediante el uso de las dos herramientas descritas anteriormente, pasaremos a dividir cada cuadrante de la figura a la mitad, mediante planos a 45° , y estos a su vez en dos. Sólo necesitamos crear planos de datos mediante el método *Midway between 2 points* e ir seleccionando los puntos correctamente y crear la partición.

De forma que tendremos:



Continuamos creando planos de datos, pero esta vez será paralelos al plano que contienen al eje de revolución, como si fueran dos casquetes polares. En *Create Datum* Marcamos **Plane** y en *Method 3 points*, y seleccionamos en la pantalla los tres puntos pertenecientes a este plano.

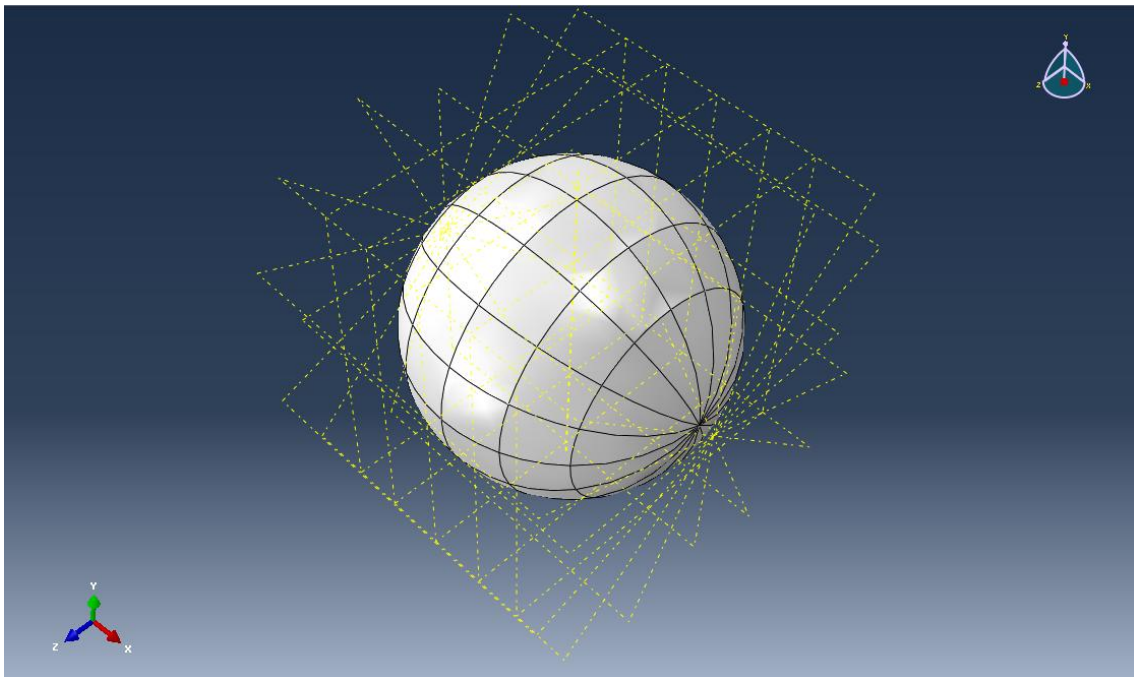
De forma análoga a la anterior creamos la partición y nos queda:





Por último, procedemos de la misma manera para particionar el balón mediante dos planos más, paralelos a estos últimos y que se encuentran entre estos y el plano que contiene al eje de rotación.

Particionamos y la pantalla nos mostrará la siguiente imagen:



Vamos a crear un conjunto que contenga todas las particiones que hemos creado y que nos servirá para poder definir las superficies internas y externas.

Buscamos en la barra de herramientas y desplegamos: *Tools* → *Set* → *Create...* Aparecerá la ventana emergente *Create Set*. Asignamos el nombre de **balon** (introducimos el nombre sin tilde para evitar errores que nos puede generar al modificar el Keyword en pasos más adelante)

Seleccionamos la geometría completa de nuestra figura y . Acabamos de crear el grupo o conjunto denominado balon que consta de 96 caras.

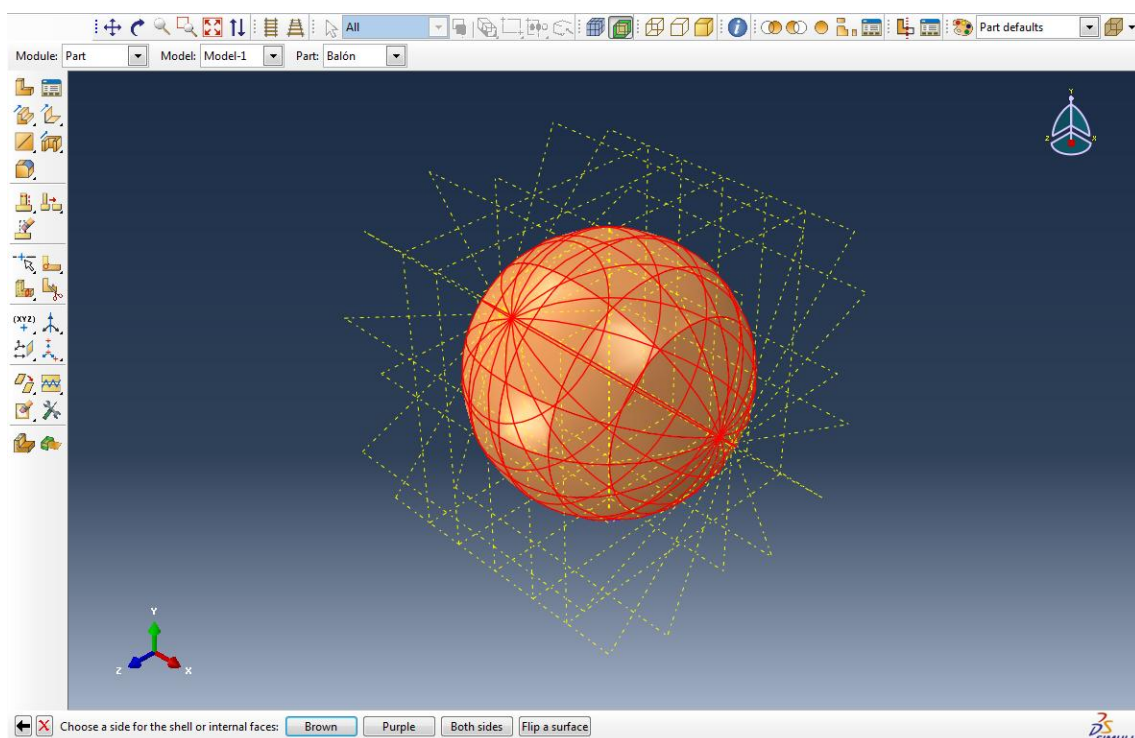


Definimos la superficie exterior de nuestro balón. Para ello *Tools* → *Surface-Create...* aparecerá la ventana *Create Surface* donde asignaremos el nombre de **sup-exterior** y

Continue...

Seleccionamos en la pantalla todas las regiones que nos definen la superficie completa.

Done . Nos debe quedar una figura como la siguiente:




Marcamos **Brown** en el área de aviso. De esta forma, hemos creado la superficie exterior.

Pasamos a definir la superficie interior. De forma análoga, *Tools* → *Surface-Create...* asignamos el nombre de **sup-exterior** **Continue...**

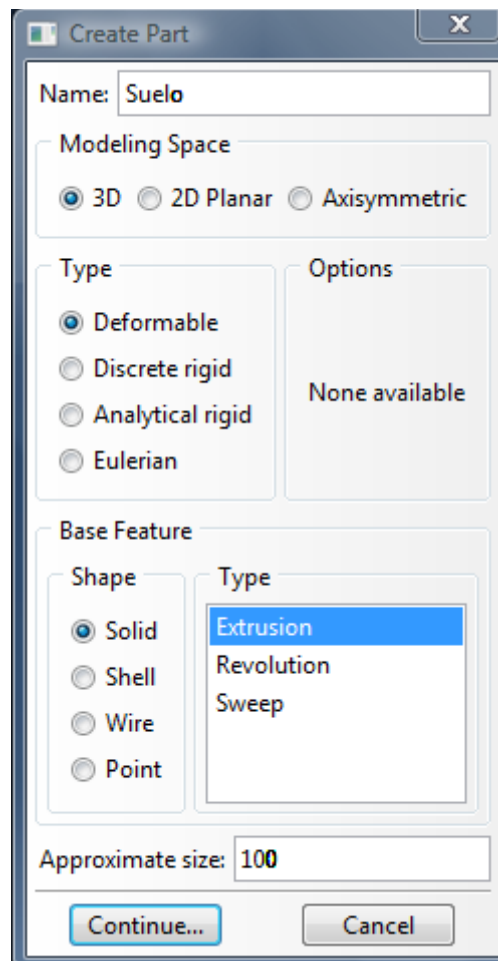
Seleccionamos todas las regiones que nos definan la superficie completa **Done** y eligiendo esta vez **Purple** . Creamos de esta manera la superficie interior. A continuación vamos a crear la segunda parte de nuestro estudio que será el suelo donde se apoyará nuestro balón.



Pulsamos de nuevo “*Create Part*” , aparecerá una ventana emergente donde asignaremos el nombre **Suelo** y un tamaño aproximado de **100**. El resto de valores los dejamos por defecto, comprobando que sean:



- El valor de **3D** para *Modeling Space*.
- Tipo **Deformable**
- En el recuadro *Base Feature Solid* y en *type*: **Extrusion**.



De forma que el diálogo nos quedará como muestra la siguiente figura:




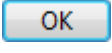
Pulsamos 



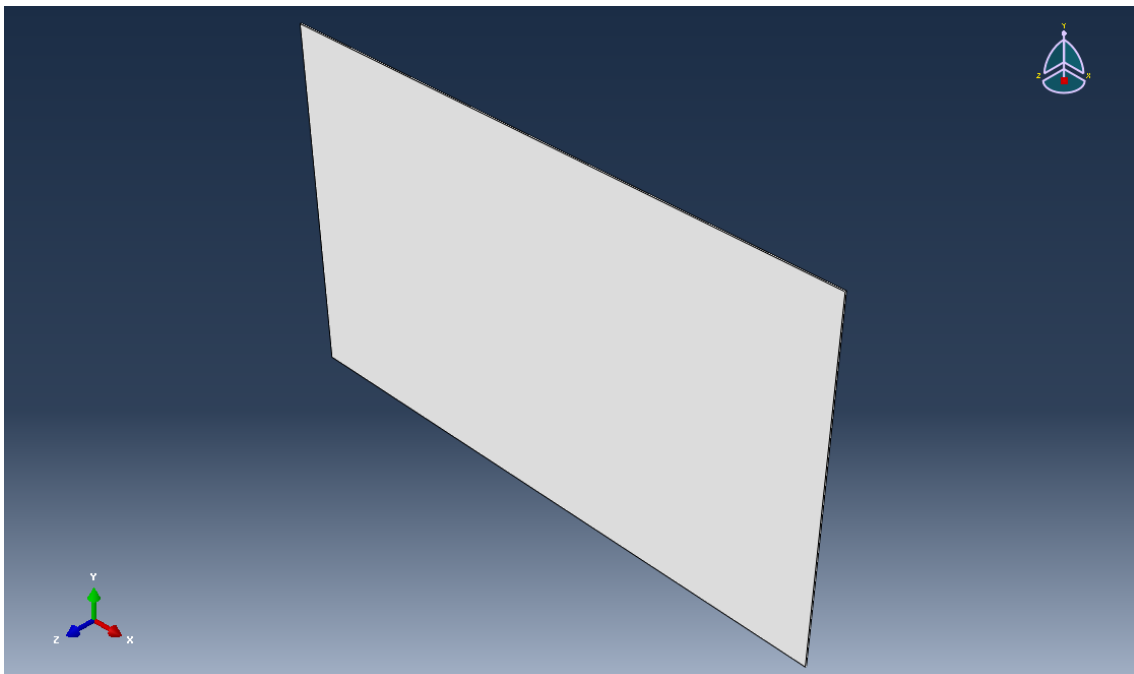
Cogemos la herramienta “Create Lines: Rectangle”  e introducimos los puntos (2,6) y (-18,-6) y cancelamos el procedimiento , de esta forma hemos dibujado un suelo de 12x20 metros.


Si queremos comprobarlo utilizamos la herramienta “Auto-Dimension”  y seleccionamos las dos aristas diferentes del rectángulo .

Una vez que nos hemos asegurado de las dimensiones, y que no tenemos seleccionada ninguna herramienta. .

Nos aparece la ventana *Edit Base Extrusion* donde debemos asignar un valor de profundidad para la extrusión. Para nuestro caso asignamos un valor de 5 cm, es decir, introducimos el valor **0.05**, aceptamos valores por defecto, por tanto, .

Aparecerá nuestro suelo:




Vamos a crear un punto sobre el suelo que nos indicará el lugar donde irá apoyado nuestro balón. Para ello emplearemos la herramienta  “Create Datum Point” e



introducimos las coordenadas **(0,0,0)**, pulsamos intro y tendremos nuestro punto de apoyo.


DEFINICIÓN MATERIALES


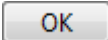
Proseguimos definiendo los materiales. En este caso habrá que definir tanto el material del balón, que lo consideraremos de poliuretano, como el suelo, que para nuestro caso será de cemento.

Cambiamos el módulo a *Property* y seleccionamos la herramienta  “*Create Material*”, nombramos al material **Cemento** y comenzamos a definirlo. Nos vamos a la fila de pestañas, *General* → *Density* e introducimos el valor **2500** kg/m³ en el recuadro de *Mass Density*. Cambiamos de pestaña y desplegamos: *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*, indicando como valores del módulo de Young **80e9** y Poisson **0.3** y dejando todas las opciones restantes por defecto, como indica la figura:




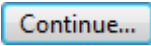
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	80e9	0.3

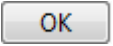
Aceptamos los valores .


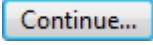
Repetimos para definir el material Poliuretano, pulsamos , le asignamos el nombre de **Poliuretano** y comenzamos a definirlo. Igual que anteriormente, en la fila de pestañas *General* → *Density* e introducimos el valor **861.28** kg/m³ en el recuadro de *Mass Density*. Seleccionamos después *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*, introducimos los valores del módulo de Young **690e6** y Poisson **0.5** aceptando las demás opciones por defecto y confirmamos .



DEFINIMOS LAS SECCIONES Y ASIGNAMOS SUS PROPIEDADES

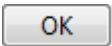
En la zona de las herramientas buscamos el icono  “*Create Section*” y lo elegimos. En el cuadro de diálogo le asignamos el nombre **seccion suelo** y comprobamos que, por defecto, tenemos en *category Solid* de tipo *Homogeneous* y pulsamos .

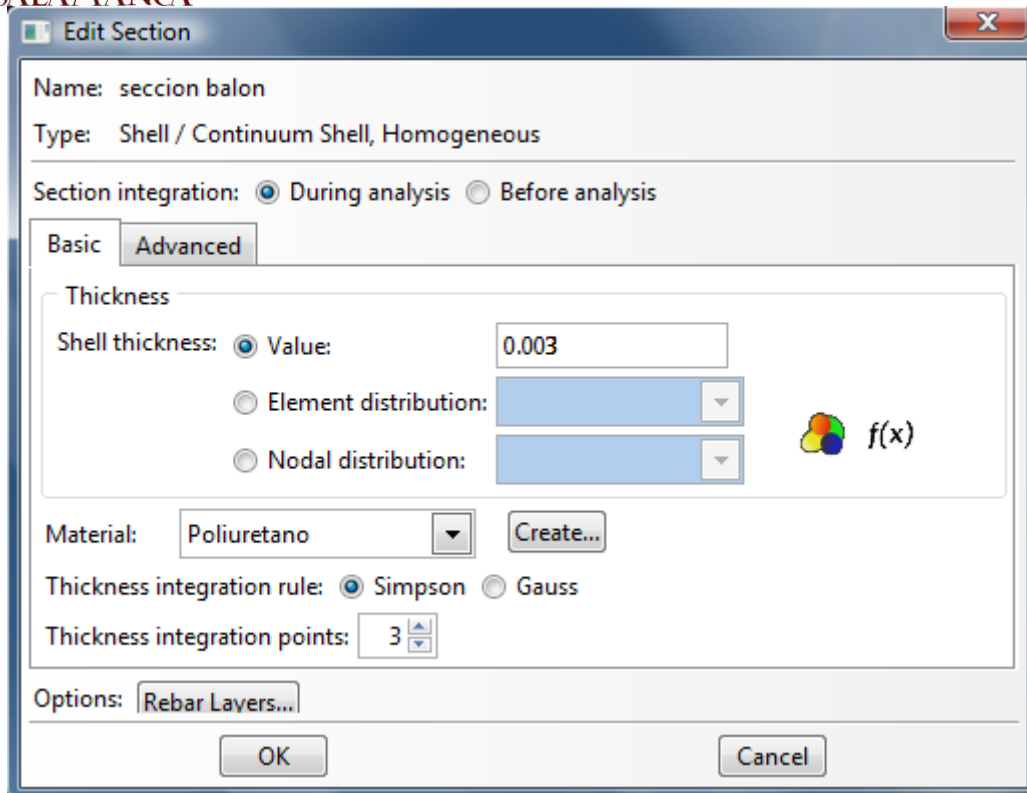
En la ventana *Edit Section*, seleccionamos el material *Cemento* y lo demás por defecto .

Repetimos para el balón, click en  y le damos el nombre de **seccion balon** y elegimos la categoría *Shell Homogeneous* y pulsamos .

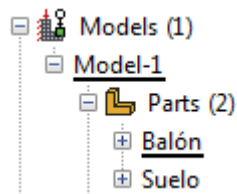
Se abrirá una ventana de diferente aspecto a la anterior pero denominada también *Edit Section*. Modificamos de forma que:

- *Section integration: During analysis.*
- En la pestaña *Basic* introducimos en *Shell thickness 0.003*.
- En el menú desplegable *Material* elegimos *Poliuretano*
- Cambiamos *Thickness integration points* a **3**.

Una vez realizados los cambios tendremos en la ventana en la siguiente figura. Comprobamos los valores antes de pulsar .




El siguiente paso será asignar las secciones que acabamos de definir a las distintas partes. A la izquierda de nuestra pantalla tendremos un “árbol” que podemos desplegar y ver las distintas partes de nuestro modelo, ver siguiente figura:



Expandimos las partes de nuestro proyecto pulsando “+” situado a la izquierda del nombre y seleccionamos Suelo o Balón, con doble click, según nos convenga que aparezca en la pantalla.

Comenzaremos por el suelo, si no lo tenemos en pantalla, aplicamos lo explicado en el párrafo anterior.

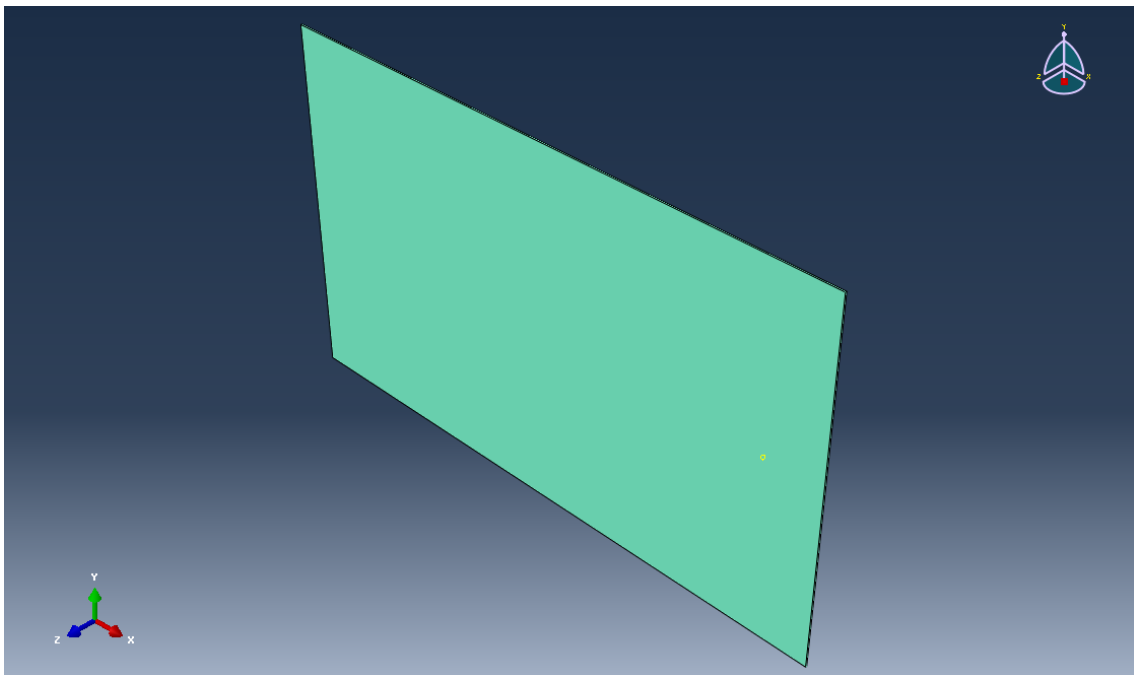
Seleccionamos “Assign Section” , marcamos sobre la pantalla la región a la que vamos a asignar la sección, es decir, click sobre el suelo. Done.




En la ventana emergente tiene un menú desplegable, elegimos *seccion suelo*.

OK

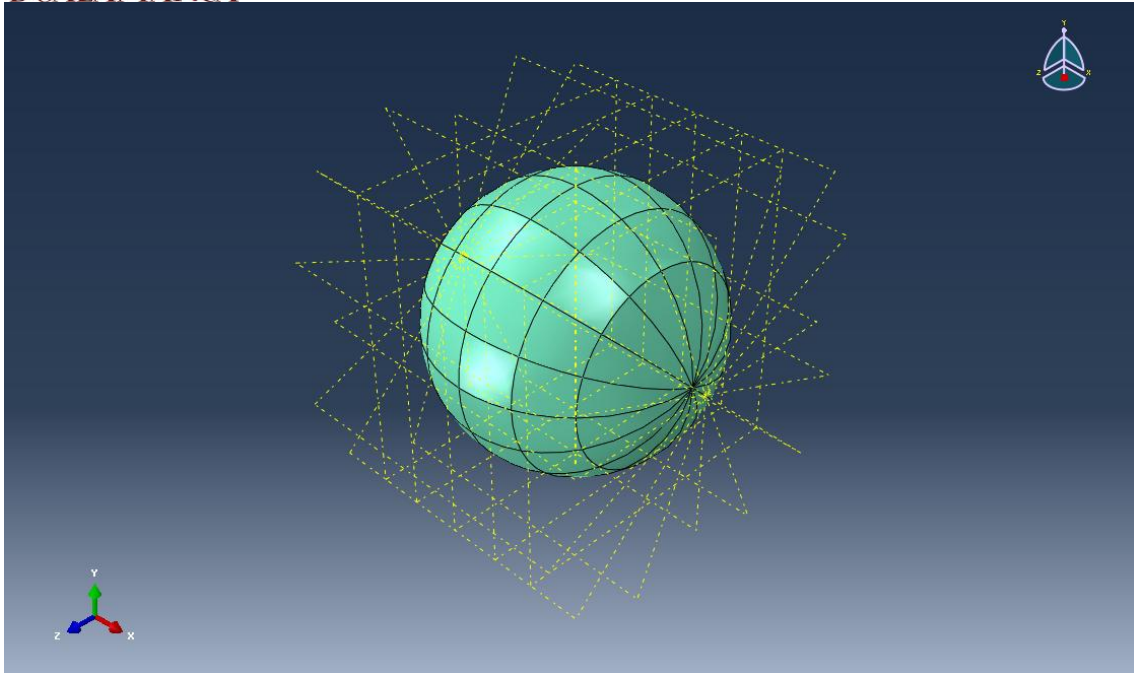
El suelo nos cambia de color y la pantalla mostrará:



De forma similar actuamos con el balón. En primer lugar hacemos que aparezca en pantalla. Posteriormente, click , marcamos la región a la que vamos a asignar la sección, todas las partes de las que consta el balón estarán en rojo


En la ventana emergente elegimos *seccion balon*, y comprobamos que los valores por defecto son en *Thickness From section* y en *Shell offset definition Middle surface*.

Pulsamos .

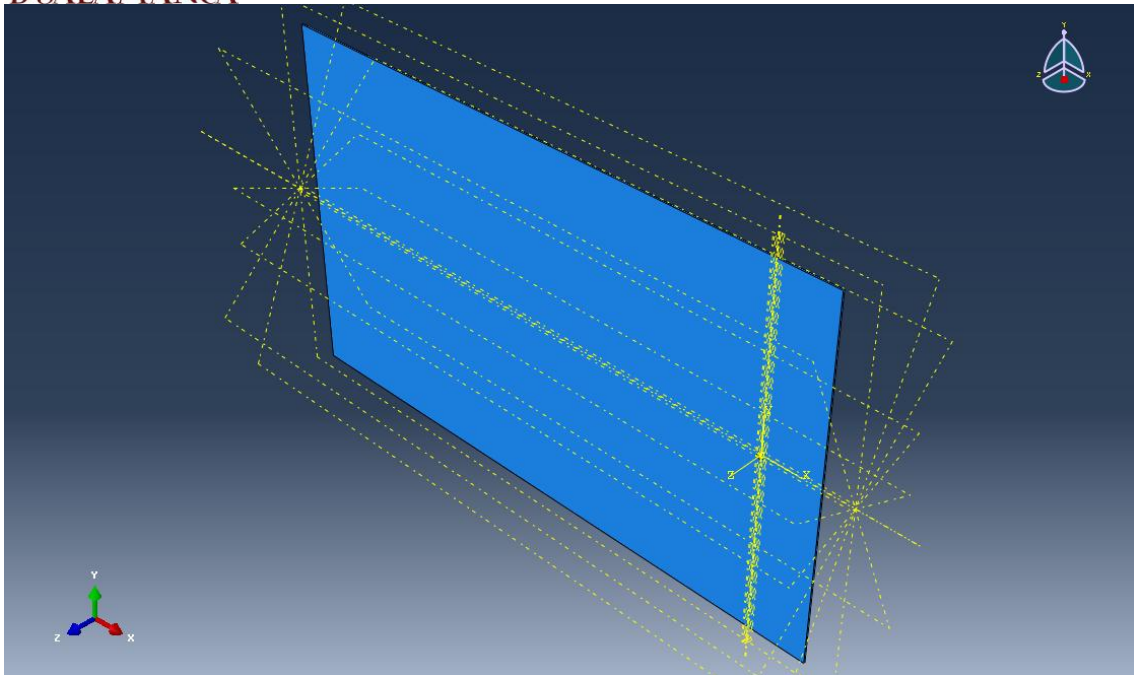


ASSEMBLY (ENSAMBLAJE)


Procedemos al ensamblaje que es la modelización y distribución geográfica de las partes de nuestro proyecto. Cambiamos el módulo a *Assembly*. Comenzamos.

Seleccionamos  “*Instance Part*”, en la ventana emergente Create Instance elegimos ***Balón*** y en el recuadro de *Instance Type* marcamos sobre ***Independent***.

Repetimos el proceso de forma idéntica pero elegimos esta vez **Suelo**. En la pantalla aparecerá ambas figuras en la forma que nos muestra la figura:




En el siguiente paso moveremos el suelo para colocarlo justamente debajo del balón. Para ello, lo primero que vamos a hacer es rotarlo.

Utilizamos la herramienta “*Rotate Instance*” , seleccionamos el suelo y .

En el área de aviso nos piden el punto inicial y final del eje de rotación. Como punto inicial podemos dar $(2, 0, 0)$ y como final $(-18, 0, 0)$. También podemos hacer clic directamente en la pantalla sobre los puntos medios de las aristas cortas que conforman el rectángulo que tenemos como suelo teniendo presente que pertenezcan a la misma cara. Concretamente vamos a hacer una rotación sobre el eje X que es el que hemos definido al introducir dichas coordenadas. Seguidamente introducimos el ángulo de rotación 90° , pulsamos intro y observamos como hemos girado el suelo.

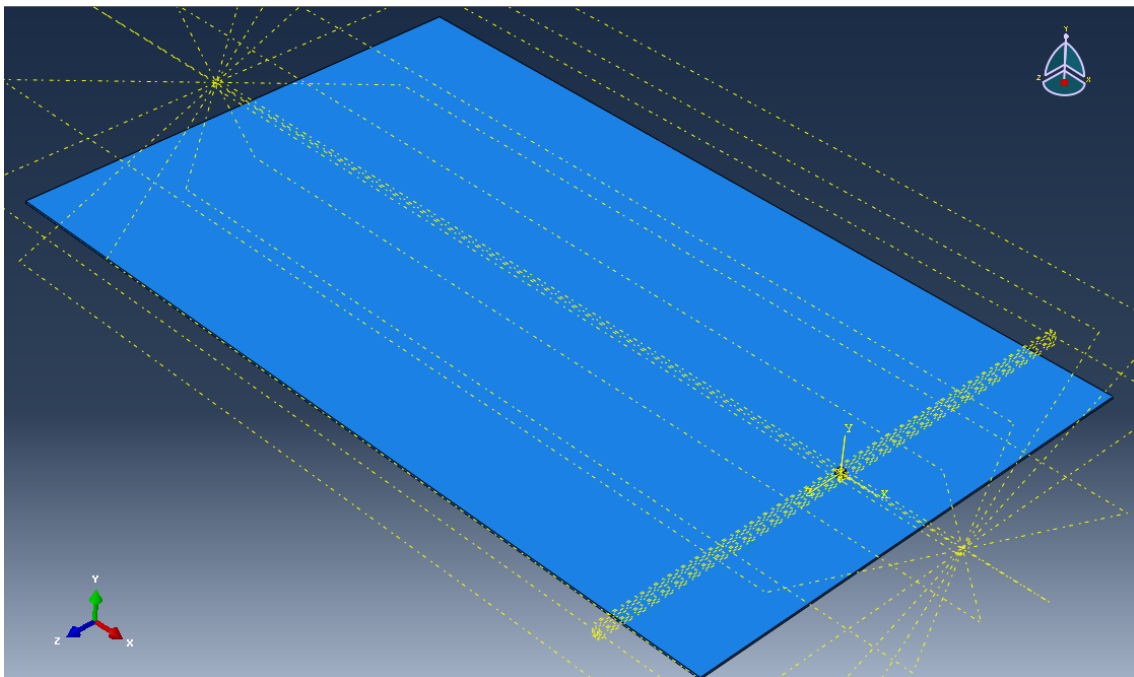
A continuación trasladaremos el suelo hasta que nos quede el balón apoyado en éste de forma que estén unidos mediante un punto de manera tangencial.

Seleccionamos la herramienta  “*Translate Instance*”. Marcamos en la pantalla el objeto a trasladar, en nuestro caso trasladaremos el suelo, .



Introducimos el punto inicial $(0, 0.05, 0)$ pulsamos intro y damos las coordenadas del punto final $(0, -0.11, 0)$, intro. Comprobamos que la posición es correcta y confirmamos con .

La pantalla mostrará una imagen similar a la siguiente figura:

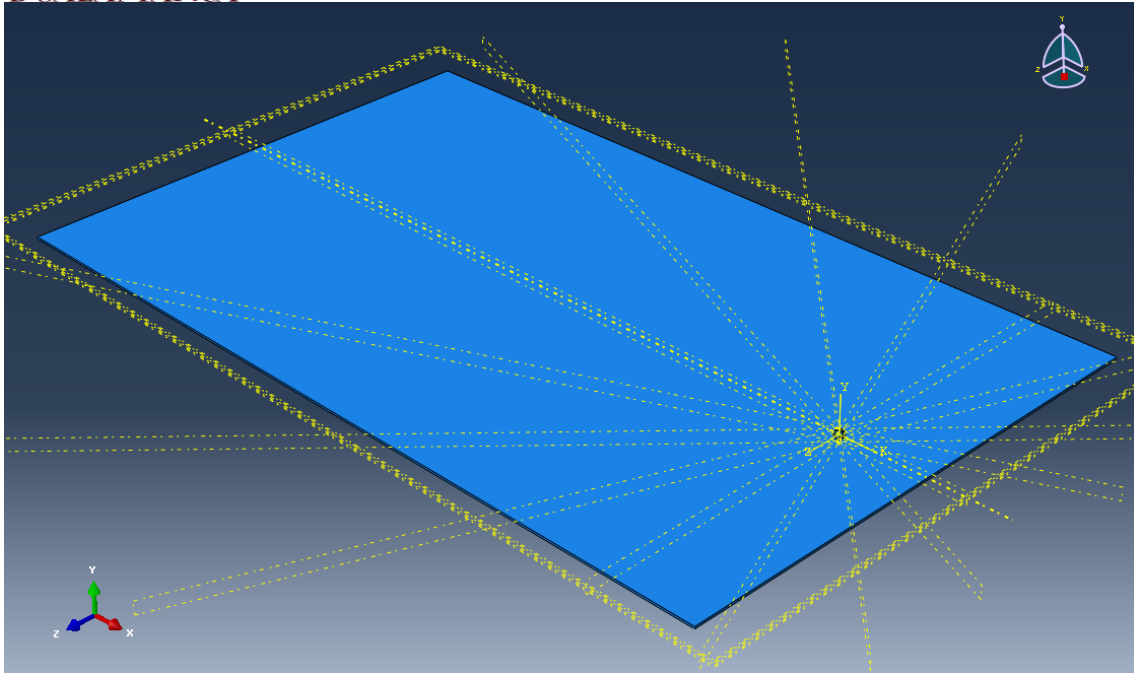


Para finalizar con el ensamblaje realizaremos una rotación del balón alrededor del eje Z. Esto tiene como fin disponer las distintas zonas de golpeo, que hemos considerado anteriormente cuando hemos hecho las particiones, en una posición adecuada.

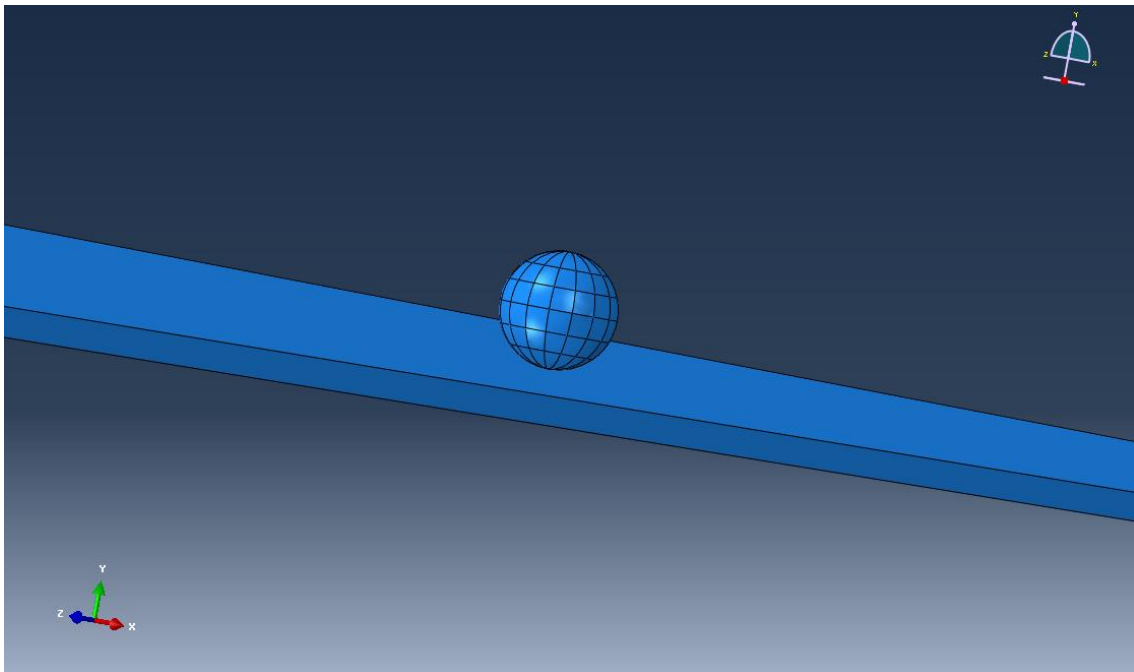
Con la misma herramienta empleada anteriormente , hacemos click esta vez sobre el balón y pulsamos .

Como queremos que sea una rotación sobre el eje Z, introducimos dos puntos cualesquiera pertenecientes a este eje, como por ejemplo $(0,0,0)$ y $(0,0,1)$. Seguidamente introducimos el ángulo de rotación 90° , pulsamos intro y observamos como hemos girado balón.

Ya hemos terminado de ensamblar nuestro modelo, la pantalla mostrará:




Limpiando un poco al pantalla de planos auxiliares y acercándonos un poco al balón tendremos la siguiente imagen:

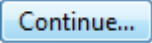




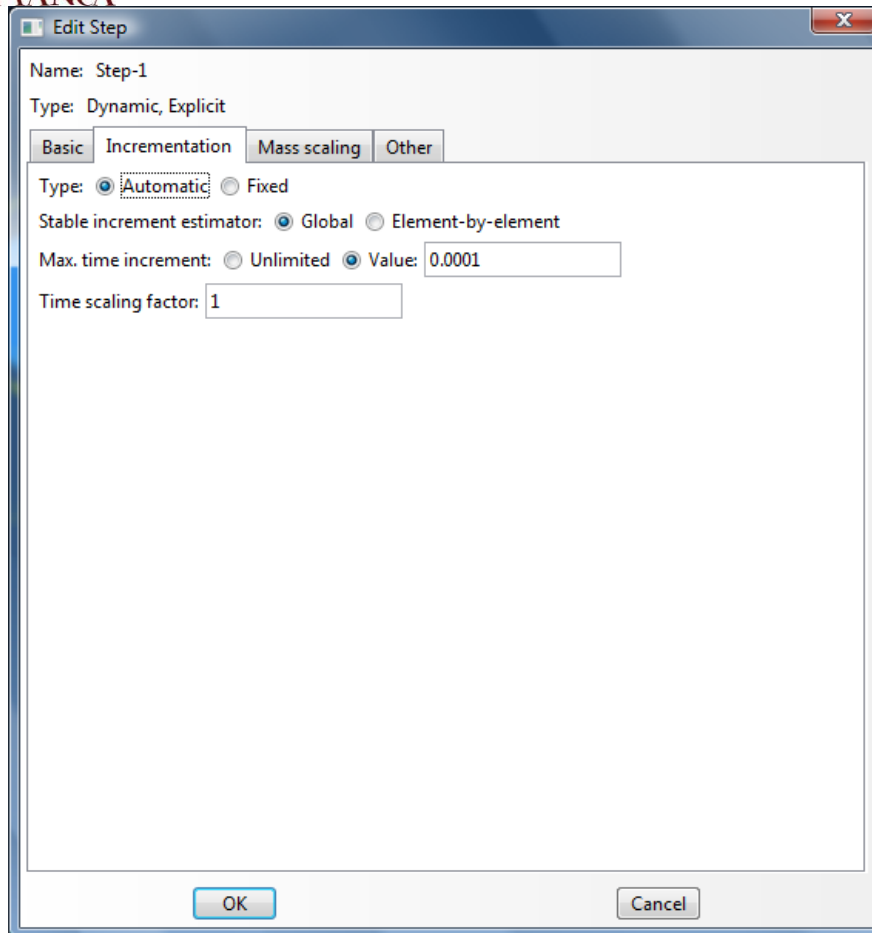
STEP

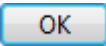
Cambiamos el módulo a Step y marcamos “*Create Step*” . En la ventana que nos aparece dejamos como nombre **Step-1** y completamos con los siguientes valores, algunos se encuentran designados por defecto:

- Insertar el nuevo paso después de *Initial*.
- En el menú desplegable Procedure type: *General*
- Y en el recuadro seleccionamos *Dynamic, Explicit*

Pulsamos 



En la ventana *Edit Step*, seleccionamos, dentro de la pestaña *Basic*, un valor de tiempo de **0.05s**. Cambiamos a la pestaña *Incrementation*, marcamos que sea de tipo *Automatic, Global*, con un incremento máximo de tiempo de **0.0001s**, y factor de escala de tiempo **1**. De forma que dicha pestaña nos quedará:



Pulsamos  para terminar de definir el Step.

INTERACTION

Proseguimos definiendo la interacción que habrá entre el suelo y el balón. Cambiamos el módulo a *Interaction*

Seleccionamos  “*Create Interaction*”. En la ventana emergente, asignamos el nombre **Suelo-balón** a la interacción, que se produzca en el *Step-1* y que sea de tipo *General contact (Explicit)*. .

En la ventana *Edit Interaction* dejamos los valores según aparecen y buscamos directamente la pestaña *Contact Properties*, que es donde se reflejan las propiedades del



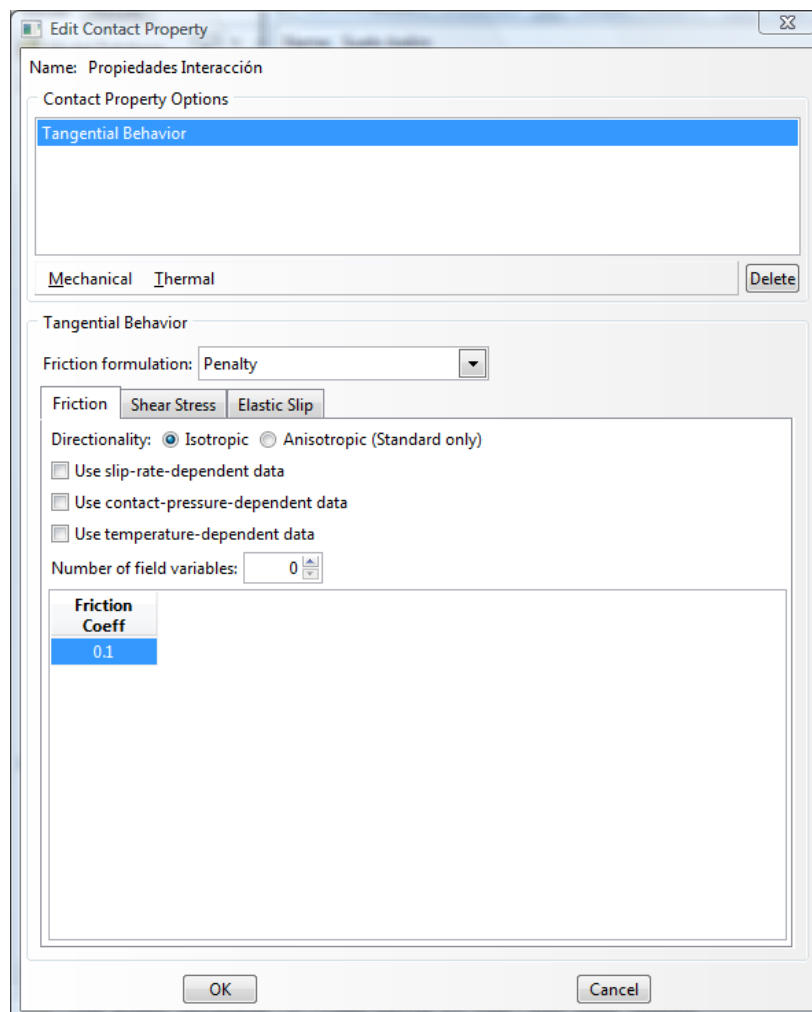
VNiVERSiDAD
D SALAMANCA



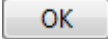
contacto. Como no existe ninguna definida tendremos que establecerlas o crearlas primeramente, pulsamos **Create...**

En el cuadro de diálogo, asignamos el nombre de **Propiedades Interacción** y elegimos de tipo **Contact**. **Continue...**

En la nueva ventana emergente marcamos en la pestaña *Mechanical* → *Tangential Behavior*. En el recuadro inferior como formulación desplegamos y elegimos **Penalty**. Al hacerlo aparecerán nuevas pestañas, en la primera establecemos el coeficiente de fricción al que le asignamos un valor **0.1**, dejando lo demás por defecto. La pestaña nos quedará como indica la siguiente figura. Aceptamos pulsando **OK**.






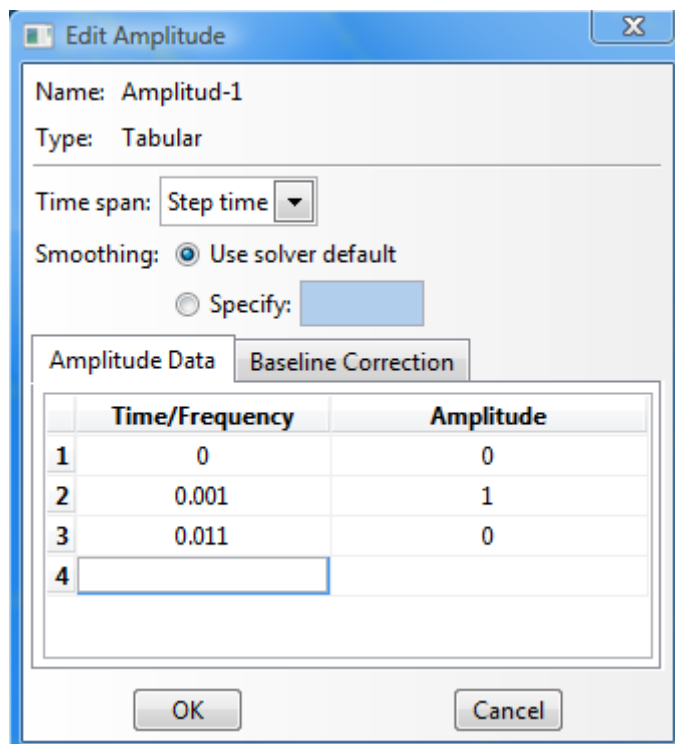
Volvemos a la pestaña *Edit Interaction* y si que podremos asignar el valor Propiedades Interacción que acabamos de generar. .

CARGA Y CONDICIONES DE BORDE

En este punto definiremos fuerzas y las condiciones de contorno que existen en nuestro sistema. Definiremos dos cargas la fuerza que ejerce la gravedad y la que simulará el golpeo sobre la pelota. Esta última será aplicada en el balón como una fuerza superficial o presión de corta duración, simulando un golpeo con el pie. El suelo lo fijaremos en las esquinas mediante empotramientos de forma que impida su movimiento. Comenzamos cambiando el módulo a *Load*. Antes de crear las cargas definiremos la amplitud que le asignaremos al golpeo. Hacemos doble click sobre el icono *Amplitudes*, que encontraremos en el “árbol” situado a la izquierda de la pantalla.

En la ventana Create Amplitude asignamos el nombre de **Amplitud-1** y marcamos que sea de tipo *Tabular* .



Introducimos los valores en la pestaña *Amplitude Data* como indica la siguiente figura:




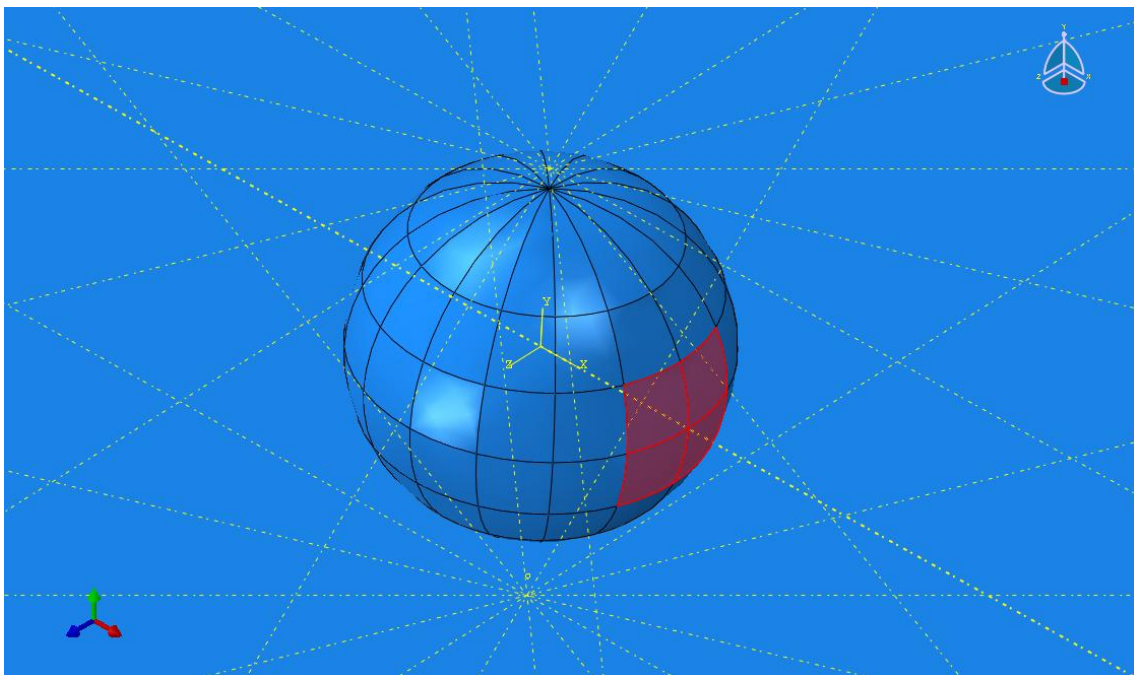
	Time/Frequency	Amplitude
1	0	0
2	0.001	1
3	0.011	0
4		

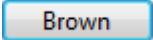
Aceptamos .



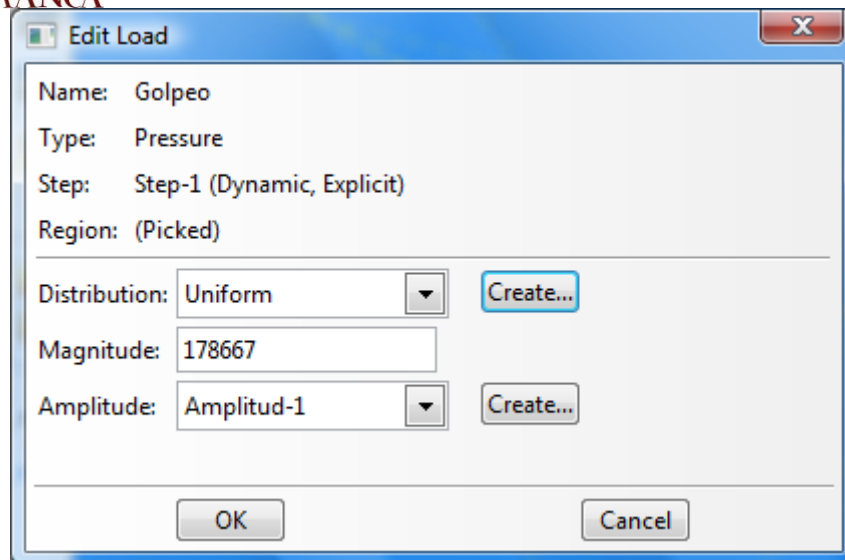
En la zona de las herramientas hacemos click sobre  “*Create Load*”, asignamos el nombre de **Golpeo**, en *Step-1*, de categoría *Mechanical* y elegimos que sea de tipo **Pressure**. 

Marcamos sobre el balón las cuatro superficies más centradas respecto a la orientación del eje X, como indica la siguiente figura, y pulsamos .



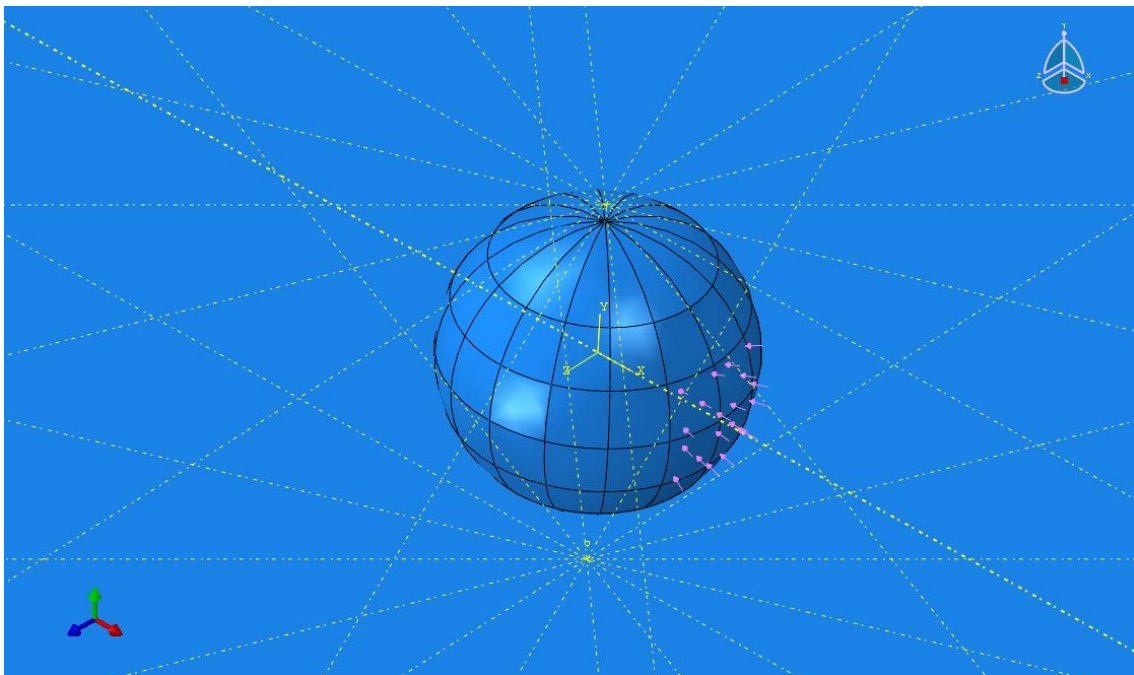
En el área de aviso nos indica en que superficie aplicar la carga marcamos  para indicarle a Abaqus que en la superficie exterior.

Surgirá la ventana *Edit Load* donde introduciremos en *Magnitude* el valor **178667** N/m². Y seleccionamos la *Amplitud-1* que hemos definido anteriormente.


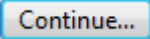


Comprobamos y .

La pantalla nos mostrará la carga que acabamos de definir:

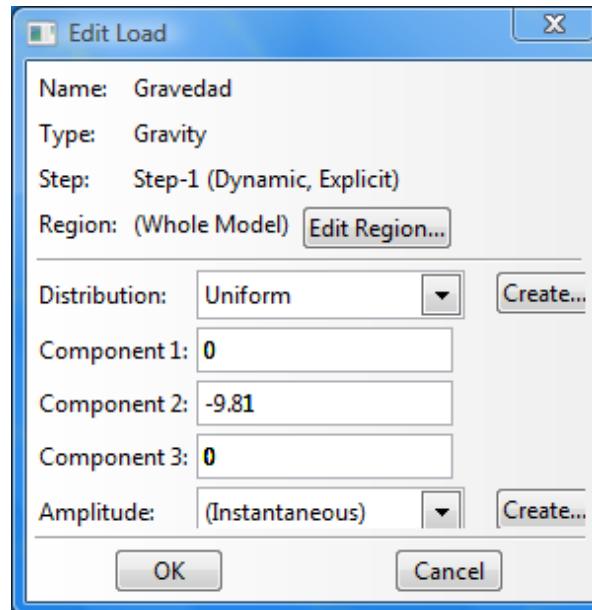


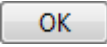
Repetimos la operación para crear a continuación la carga que nos defina la gravedad.

Volvemos a seleccionar , asignamos el nombre de **Gravedad**, en *Step-1*, de categoría *Mechanical* y elegimos que sea de tipo **Gravity**. 




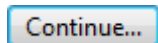
En la ventana *Edit Load*, introducimos para las casillas donde se definen *Component 1*, *2* y *3*, los valores de **0**, **-9.81** y **0** respectivamente. Dejando el resto de valores por defecto. Si no editamos la región se aplicará al modelo entero. El cuadro nos quedara:




Finalizamos la creación de cargas con .

Continuamos estableciendo los empotramientos para impedir el movimiento del suelo.

Seleccionamos el icono  “*Create Boundary Condition*”, estableciendo como nombre **BC-1** y dejando todos los valores por defecto. Comprobamos que sean *Step: Initial*, como categoría *Mechanical* de tipo *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*.



Marcamos con el ratón las 4 esquinas del suelo y .


En la ventana emergente marcamos *Encastre* y .



MESH

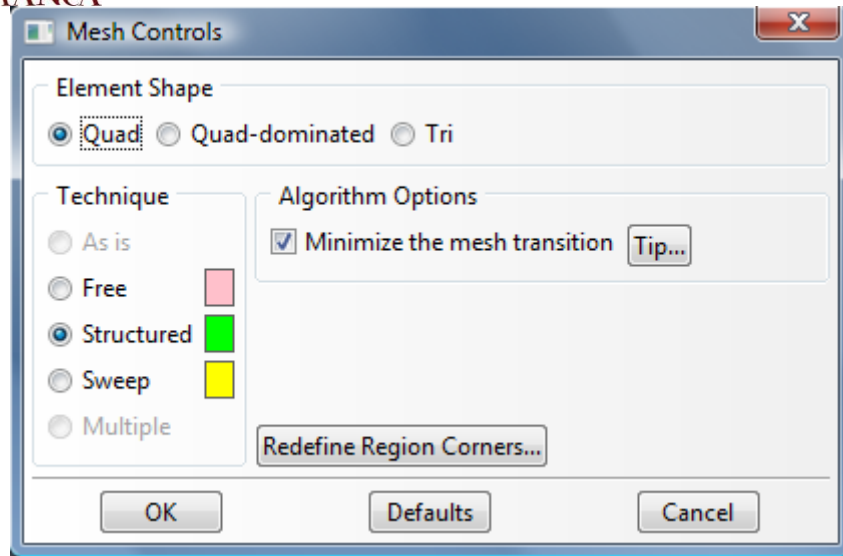
En este apartado realizaremos el mallado de nuestro sistema. Se hará de forma independiente. Por un lado, se mallará el suelo y por otro el balón, aunque podemos observar que ambos procedimientos son idénticos y se realizan de forma sencilla. Cambiamos el módulo a *Mesh*. Visualizaremos:



En primer lugar vamos a utilizar la herramienta  “Assign Mesh Controls” para poder establecer el tipo de mallado que queremos. En la pantalla comenzamos a seleccionar todas y cada una de las partes de las que consta el balón, con especial cuidado de no seleccionar el suelo.

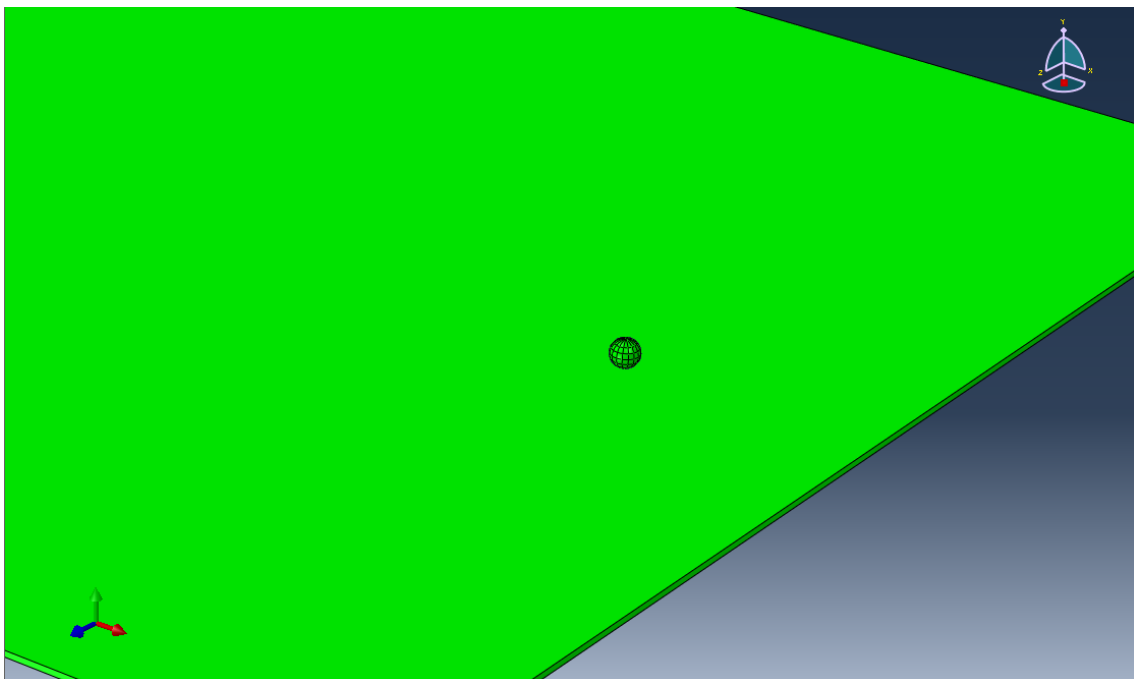
Advertencia: si se marca el suelo y el balón a la vez daría un error al ser de distinta dimensión. Es decir, uno se definirá con cuadrados (planos) y el otro mediante hexaedros tridimensional.

En la pestaña *Mesh Controls*, marcamos como *Element Shape Quad* y en *Technique Structured*. La pestaña nos quedará:



Aceptamos .

Observamos que el balón cambia de color y pasa del rosa inicial, que nos indica una técnica de mallado libre, al verde, estableciendo una mallado de tipo estructural. Además hemos establecido que la forma de los elementos de la malla sea cuadrada.



En el suelo no es necesario utilizar esta herramienta puesto que el tipo de mallado que le ha asignado Abaqus por defecto nos interesa. El color verde nos indica que la técnica de



mallado es estructural y que la forma de sus elementos son hexagonales. Lo podemos comprobar seleccionándolo con la misma herramienta descrita anteriormente.

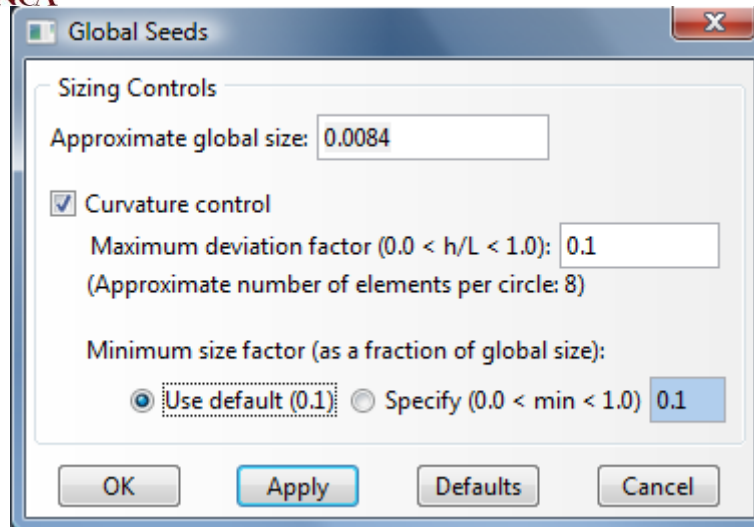
Si ampliamos tendremos la siguiente imagen:




En este punto pulsamos sobre el icono  “Seed Part Instance”, marcamos el suelo en la pantalla con el ratón.

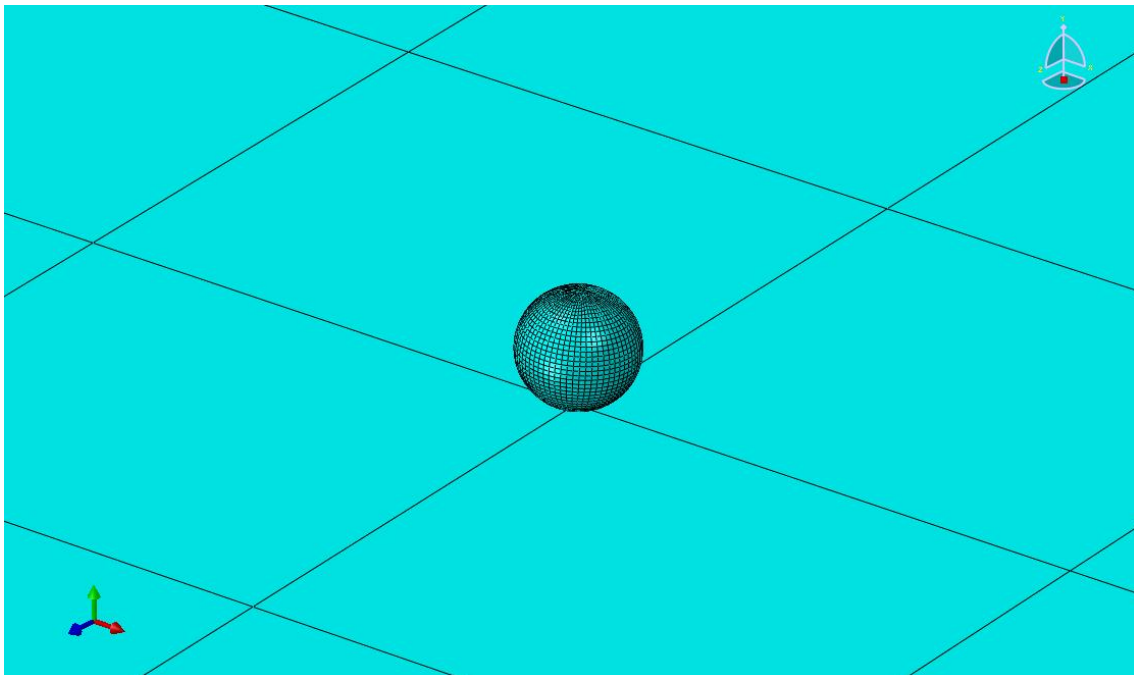
En la ventana *Global Seeds* vamos a aceptar los valores por defecto que nos da el programa. Podríamos modificar el tamaño de los elementos de la malla pero aceptamos el valor de **1** para el suelo. .

Sin salir del procedimiento, seleccionamos el balón y volvemos a aceptar los valores por defecto, que serán los que muestra la figura, aceptándolos con .



A continuación seleccionamos la herramienta  “*Mesh Part Instance*” y marcamos las partes que van a ser malladas. Es decir, click sobre el suelo, **Done**, y click sobre el balón, **Done**.

De esta forma tendremos nuestro sistema definido mediante elementos finitos. Podemos verlo en la siguiente imagen:





KEYWORDS

Antes de proceder a ejecutar el módulo Job, tenemos que implementar el aire dentro del balón. Este paso se deberá hacer manualmente modificando el Keywords de Abaqus.

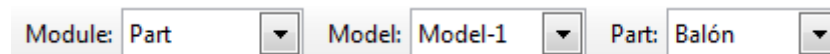
Se trata de un paso delicado puesto que tendremos que insertar una serie de comandos en el código que Abaqus interpretará cuando realiza el análisis del sistema y si no se realiza correctamente es fácil que se genere un error.

Pero antes de pasar a modificar el Keywords realizaremos unos pasos previos que nos serán de utilidad. Cambiamos el módulo a *Part*.


Elegimos que se visualice el balón. Lo podemos hacer de varias formas distintas. Eligiendo desde el “árbol” del modelo como se explicó en puntos anteriores, mediante




“*Part Manager*” o utilizando la siguiente barra y seleccionando en *Part* **Balón**:

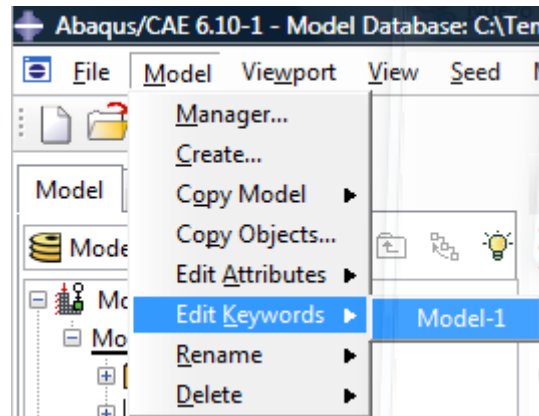


Necesitamos crear un punto que nos sirva de referencia para establecer una cavidad donde ubicar el aire. Buscamos en el menú superior y elegimos *Tools* → *Referent Point* e introducimos las coordenadas **(0, 0, 0)** y pulsamos intro. Nos aparecerá en pantalla el punto de referencia situado en el centro del eje de coordenadas y denotado con las letras RP.

A continuación nos vamos a *Tools* → *Set* → *Create...* En el cuadro de diálogo asignamos el nombre **Puntoref-cav** .

Marcamos sobre la pantalla el punto de referencia que acabamos de definir y .

Ahora definiremos el aire dentro del Keywords. Para poder acceder al Keywords buscamos en la parte superior izquierda de nuestra pantalla y desplegamos el siguiente menú: *Model* → *Edit Keywords* → *Model-1*, como indica la figura:



Observamos que en la ventana que acabamos de abrir se pueden distinguir en letra mayúscula los distintos módulos o partes del modelo. Pues bien, en el módulo *ASSEMBLY*, justo antes del primer **End Instance* que nos encontramos, hacemos click con el final de la última línea, pulsamos y escribimos el siguiente texto:

***FLUID BEHAVIOR, Name=aire**

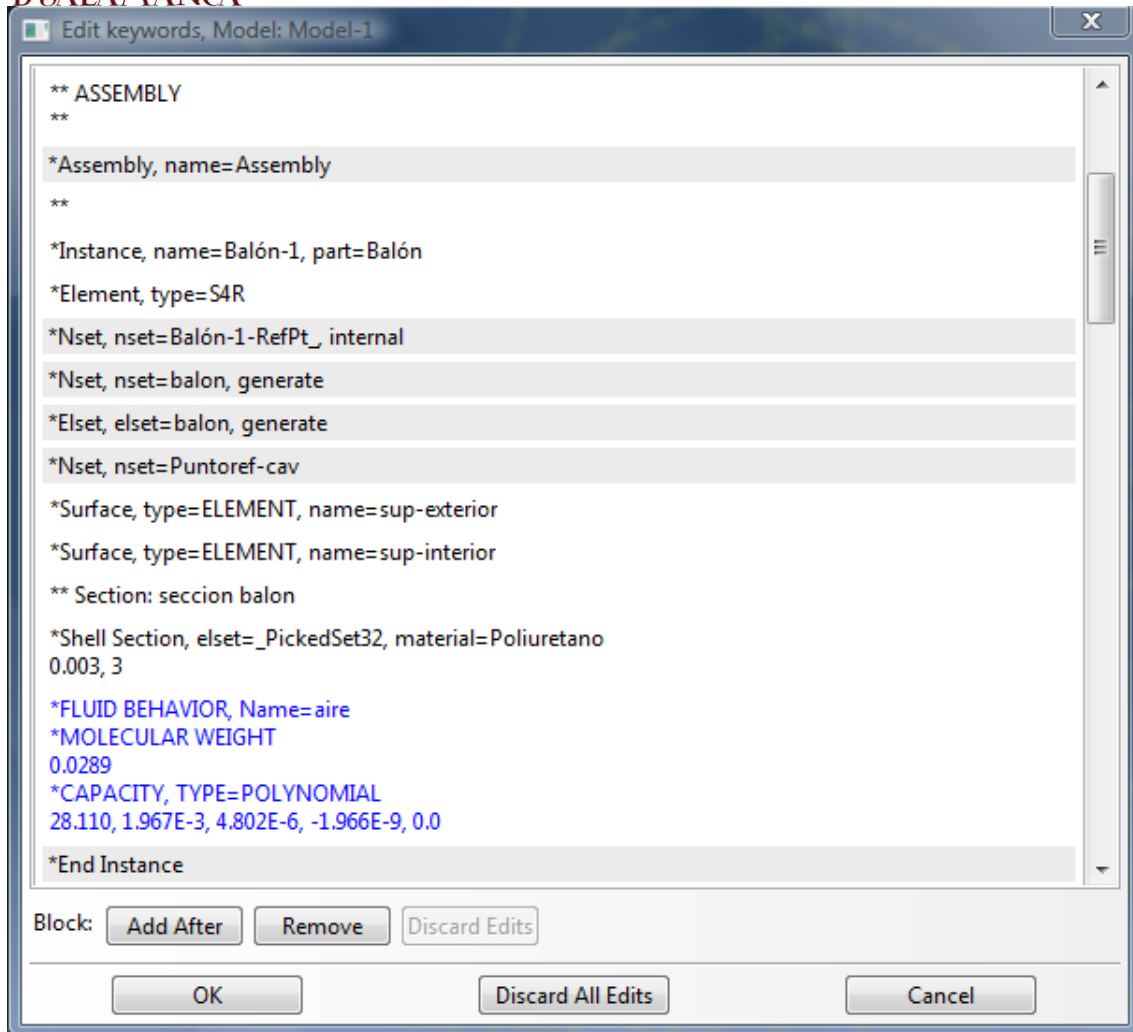
***MOLECULAR WEIGHT**

0.0289

***CAPACITY, TYPE=POLYNOMIAL**

28.110, 1.967E-3, 4.802E-6, -1.966E-9, 0.0

Como podemos ver en la siguiente imagen:



Con esto definimos el aire, ahora pasaremos a definir las condiciones de la cavidad donde está alojado.

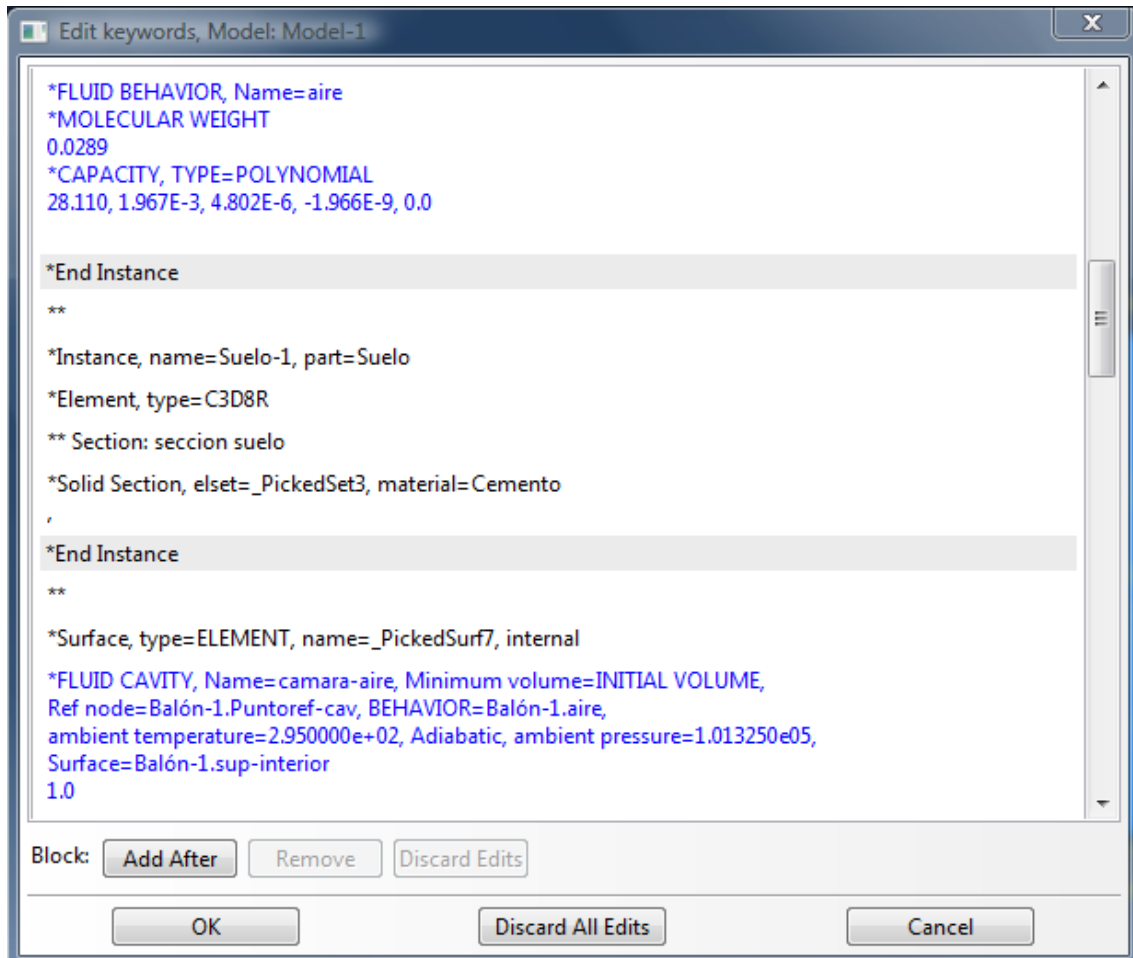
Bajando un poco más y buscamos la última línea antes de **End Assembly* y procedemos de la misma forma con y el texto:

***FLUID CAVITY, Name=camara-aire, Minimum volume=INITIAL VOLUME,
Ref node=Balon-1.Puntoref-cav, BEHAVIOR=Balon-1.aire,
ambient temperature=2.950000e+02, Adiabatic, ambient pressure=1.013250e05,
Surface=Balon-1.sup-interior**

1.0



De esta forma nos quedará algo similar a:



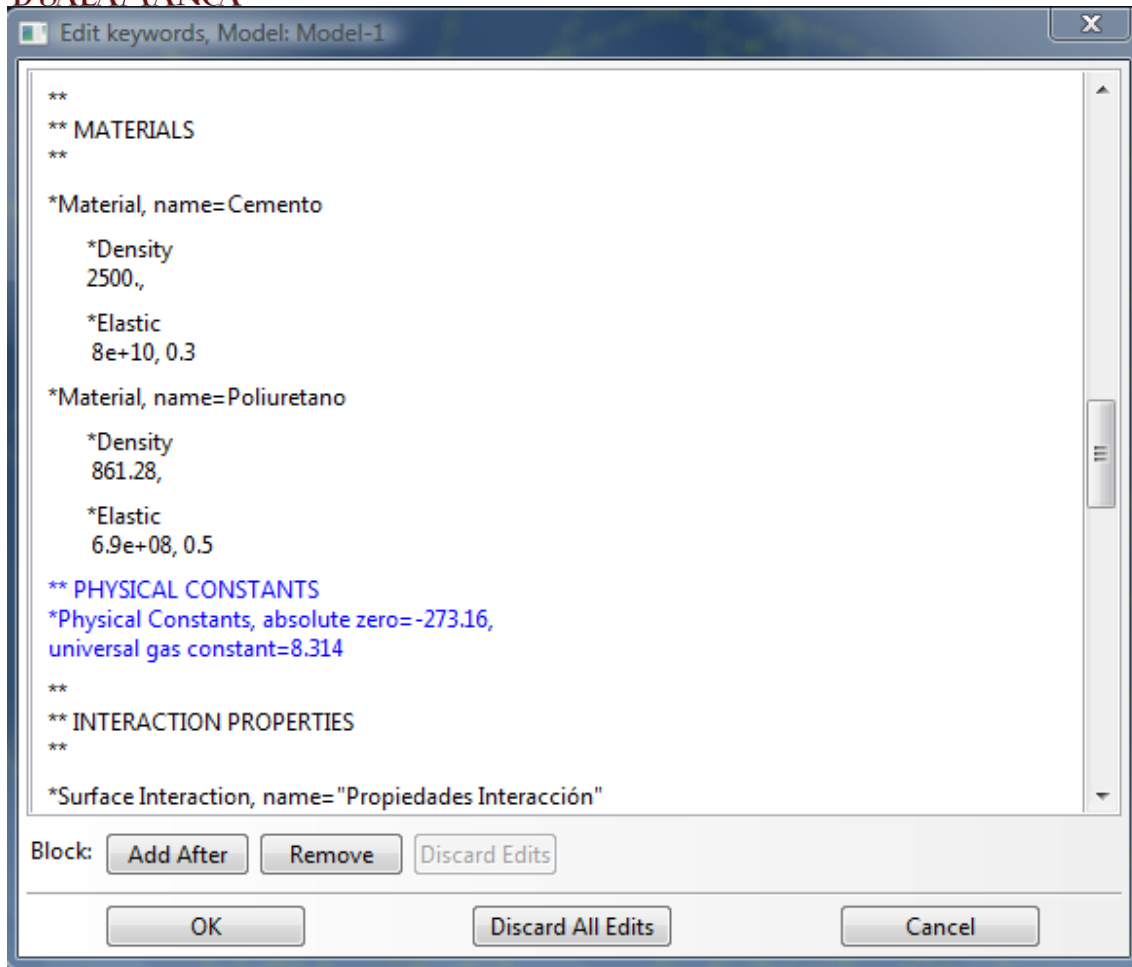
Para finalizar introduciremos el valor de dos constantes físicas.

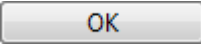
Para ello nos vamos al final del modulo MATERIALS y antes de INTERACTION PROPERTIES y de forma similar a lo descrito anteriormente introducimos:

**** PHYSICAL CONSTANTS**



***Physical Constants, absolute zero=-273.16,**

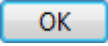
universal gas constant=8.314


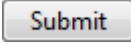


Pulsamos  y se guardarán los cambios que hemos realizado.

Ya podemos analizar nuestro modelo. Cambiamos el módulo a *Job*.

Seleccionamos la herramienta  “*Create Job*”, en la ventana emergente asignamos el nombre Golpeo-1 y .

En la ventana *Edit Job* aceptamos los valores que nos vienen impuestos por defecto asegurándonos que están marcados *Full analysis*, *Background* e *Immediately*. 

Pulsamos en el icono  “*Job Manager*” situado justo a la izquierda del anterior. Comprobamos que está marcado *Golpeo-1* y pulsamos  para comenzar el análisis.



PROBLEMA 2

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL CUADRO DE UNA BICICLETA DE MONTAÑA

El modelo completo del cuadro de la bicicleta está compuesto por distintas piezas que en este proyecto forman un único elemento. Si se hubieran creado por separado tendríamos el cuadro, la horquilla delantera, el manillar-potencia, la tija y las bielas. Dos de estos elementos, el cuadro y la horquilla delantera, contienen los elementos donde se sustentan los bujes y sobre ellos las ruedas. Estos puntos de apoyo son las llamadas patillas traseras y patillas delanteras.

En una bicicleta los puntos de apoyo sobre el suelo son los neumáticos en el eje vertical con el buje. A través de los radios, las cargas se transmiten a los bujes y de los bujes a las patillas, y por consiguiente al cuadro.

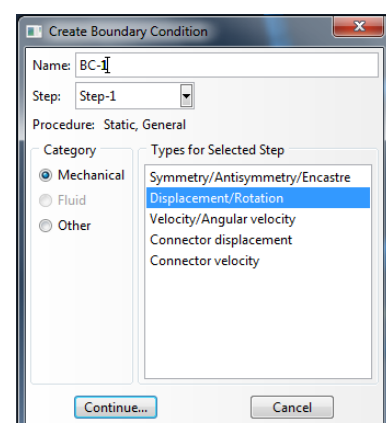
Se han establecido las condiciones de contorno que aparecen en la figura para poder realizar un cálculo estático. Por esta razón el desplazamiento en sentido negativo del eje X para las patillas delanteras, estará impedido. Además suponiendo unos neumáticos y radios indeformables, y que la bicicleta nunca se separará, en ninguna de las hipótesis, del suelo, los desplazamientos verticales (eje Y) también estarán impedidos. Por lo tanto, y con estas hipótesis, el cuadro quedará impedido, de momento, buje trasero con los desplazamientos X, Y bloqueados y buje delantero con Y bloqueado.



El buje que sustenta las ruedas y que va apoyado sobre las patillas se encargará de que el desplazamiento en el eje Z sea también nulo. Además se suponemos el buje indeformable y siempre en contacto con las patillas en la misma posición, debido a que está conectado las dos patillas de un mismo eje, los giros en X e Y también estarán impedidos, quedando las condiciones de contorno para la primera hipótesis.


Aplicación de las condiciones de contorno en Abaqus

Para introducir las condiciones de contorno en el modelo de Abaqus, se tendrá en cuenta los conjuntos o "Sets" creados anteriormente.



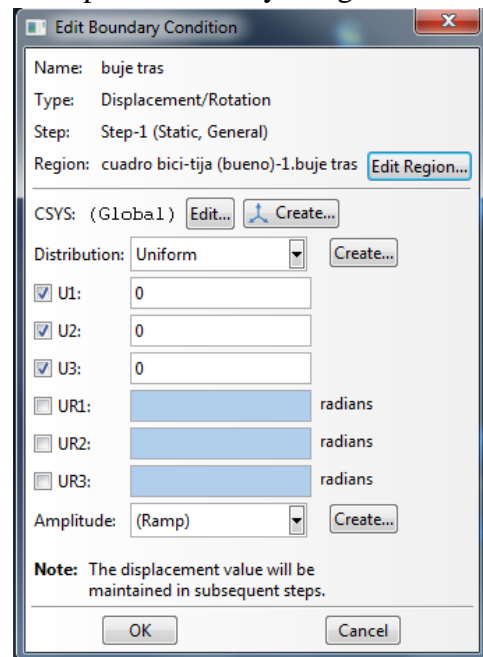


Teniendo los conjuntos completamente definidos, le asignamos a cada uno de ellos las restricciones de giro o movimiento explicadas en el apartado anterior.

Para ello pinchamos con el botón de “Create Boundary Conditions” . Entonces se abre una ventana en la que podemos dar el nombre que queramos a la condición de contorno, y elegir la categoría y el tipo. En nuestro caso para todas las condiciones, categoría “Mechanical” y tipo “Displacement/Rotation” (Desplazamiento/Rotación). Se presiona en “Continue”.

Una vez hecho esto, en la parte inferior derecha, en “Prompt area”, se pulsa en “Sets”, se abre una nueva ventana, y se elige uno de los conjuntos que habíamos creado antes. Se abre otra ventana en la que se puede definir los desplazamientos y los giros en ese conjunto.

- Para el conjunto de la imagen (A), el buje trasero, bloqueamos los desplazamientos en X, Y, Z.
- Para el conjunto de la imagen (B), el buje delantero, bloqueamos los desplazamientos en Y, Z.
- Para el conjunto de la imagen ©, los nodos superiores del buje trasero, bloqueamos los giros en X, Y.
- Para el conjunto de la imagen (D), los nodos superiores del buje delantero, bloqueamos los giros en X, Y.



Se pincha en OK, las condiciones de contorno quedan definidas en Abaqus.

2.1.- Cargas

Como se ha comentado al inicio, esta hipótesis de carga consiste en posicionar un individuo sentado sobre el asiento. Se supondrá que el individuo no apoya los pies en el suelo, ni las manos en los manillares, por lo que todo el peso del mismo recae sobre la tija, y este sobre el tubo vertical. Se considera que el cuadro ha sido diseñado para una persona de una altura aproximada de 1,85 metro, se tomará una masa corporal un poco mas alta de su peso para comprobar bien el esfuerzo, siendo de 100 kg.



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA



Esta hipótesis de carga estática, no se corresponde con la hipótesis de carga más desfavorable para el conjunto, pero aun con todo

se debe asegurar que cumplirá sobradamente los requerimientos, como puede darse el caso de un bache en el cual se incrementaría el esfuerzo sobre el tubo vertical. Para ello se añade un coeficiente de seguridad de 2 sobre la masa

($C_s=2$), con lo que finalmente esta será de:

$$M_{total\ individuo} = C_s * M = 2 * 100 = 200kg$$

La fuerza que actuará sobre la parte superior del tubo del sillín se pondrá en unidades del SI, y será:

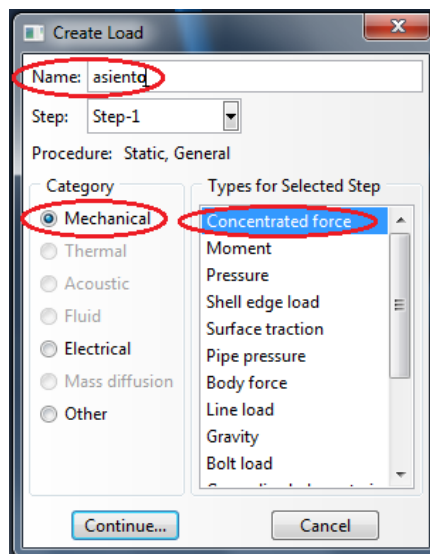
$$F_{sillín} = 200 * 9,81 = 1962 N$$

Aplicación de las cargas en Abaqus

Una vez ya se sabe que carga se debe aplicar, y teniendo creado el conjunto o “Sets” del asiento, se procede a crear la carga.

Antes de nada, se debe saber que con la creación del conjunto del asiento, se han seleccionado un total de 96 nodos entre los que se debe repartir la carga total. A cada nodo le va a corresponder una fuerza de

$$F_{nodo} = \frac{1962}{96} = 20,437 N$$

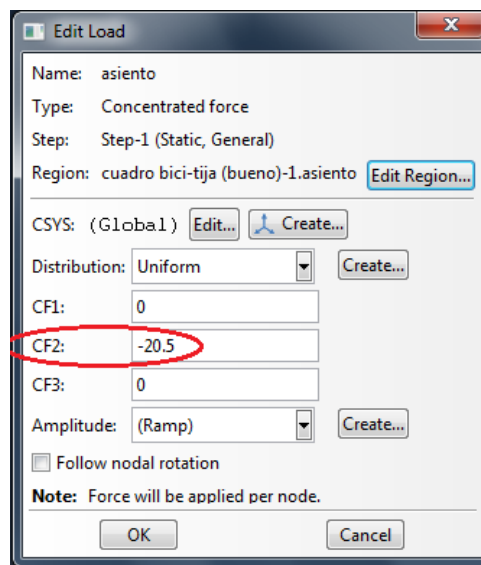




Ahora que ya se sabe cuánto le corresponde a cada nodo, se puede introducir la carga. Para introducirla, se va al módulo “Loads”, y se pulsa en el botón de “Create Load”

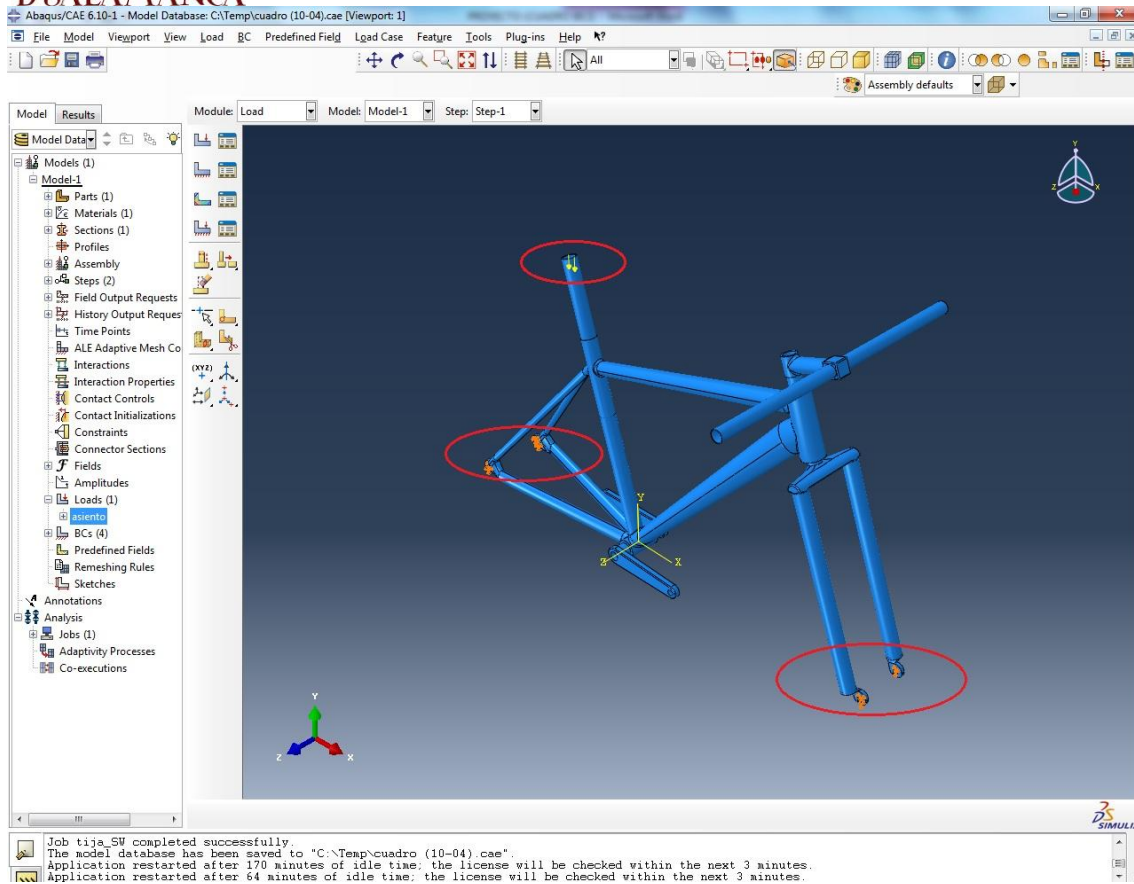


. Aparece la ventana con dicho nombre, donde se pondrá el nombre que se quiera a la carga, como por ejemplo asiento, y se elige la categoría y el tipo. Como categoría se elige “Mechanical” y como tipo “Concentrated force” y se pulsa en “Continue”. Aparecerá la ventada donde aparece todos los conjuntos, igual que cuando hemos creado una condición de contorno, y se elige el conjunto sobre la que aplicar la carga, en este caso la creada en la parte superior de la tija, y pulsamos en “Continue”.





Se abre de nuevo otra ventana, y en esta se debe introducir la carga por nodo calculada anteriormente, en sus componentes para los ejes cartesianos. Nuestra carga por nodo era de 20,5 N de peso sobre el borde de la tija. Está claro que solo tiene componente en el eje Y en sentido negativo, por lo tanto se introduce -20,5 N. Pulsamos OK y ya se tiene creado la carga de la primera hipótesis.

Al finalizar deberemos ver esto en la pantalla. Teniendo que estar marcados la carga y la condición de contorno.



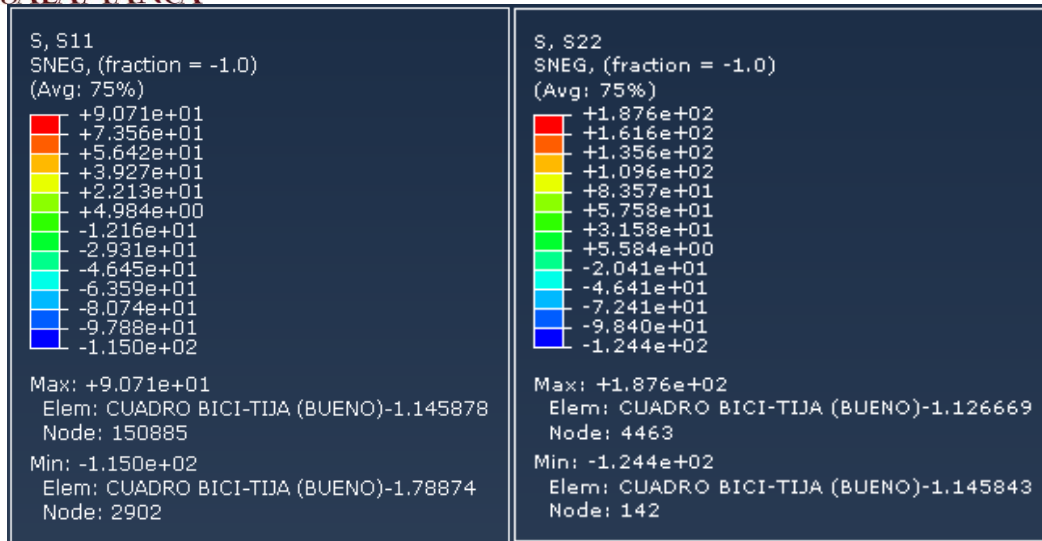
(Fig. 10-5 Visualización Abaqus-Load)

2.2.- Análisis

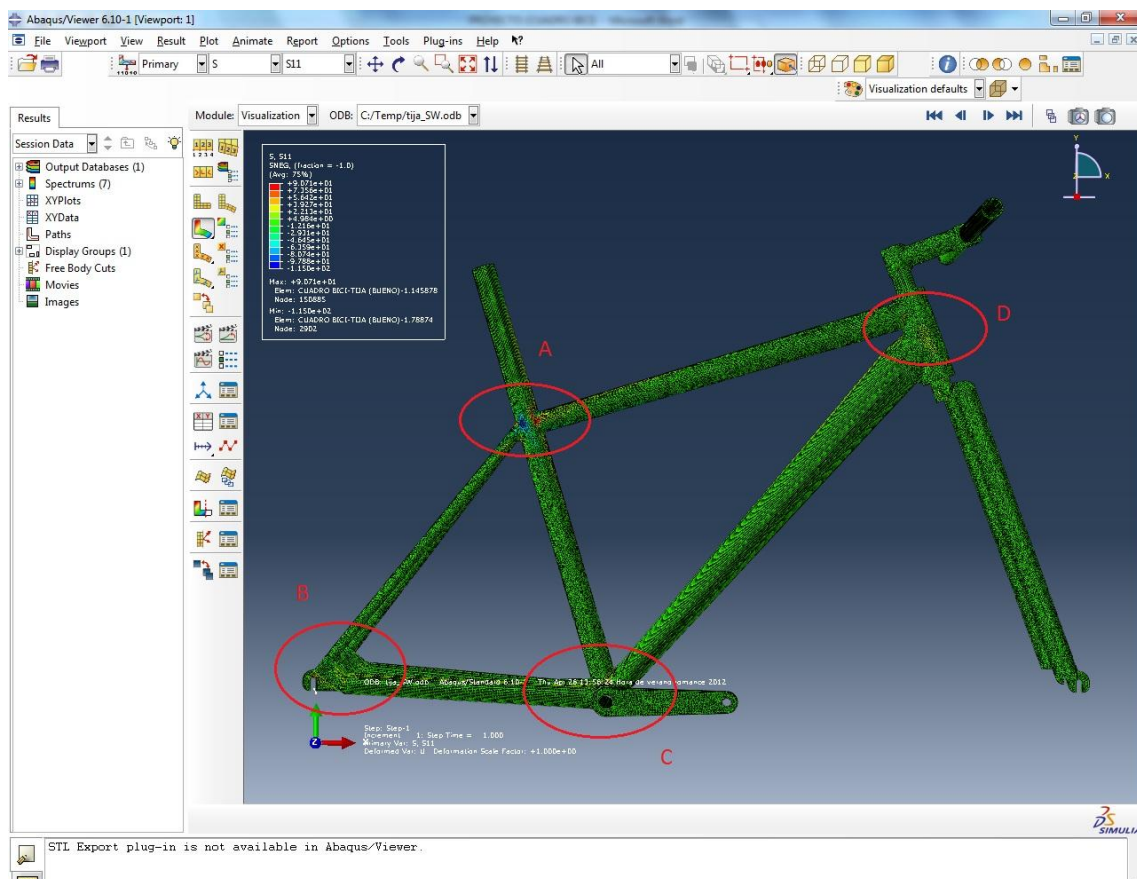
Una vez se tiene el modelo preparado, con las condiciones de contorno y sus cargas, solo falta realizar el análisis. Para poder hacerlo se debe pasar al módulo “Job”. Se crea un nuevo trabajo pulsando el botón “Create Job” , al que se podrá llamar “carga asiento”, se pulsa en “Continue” y aparecerá la ventana “Edit Job”, la cual se acepta por defecto pulsando OK. Ahora se pulsa el botón “Job Manager” , aparece la ventana con el mismo nombre y se pulsa el botón “Submit”. Una vez termina de analizar, se pulsa en el botón “Results”, automáticamente pasa a módulo “Visualization”, donde se podrán ver los resultados de las tensiones y deformaciones.

2.2.1.- Cálculos analíticos e interpretación de los resultados

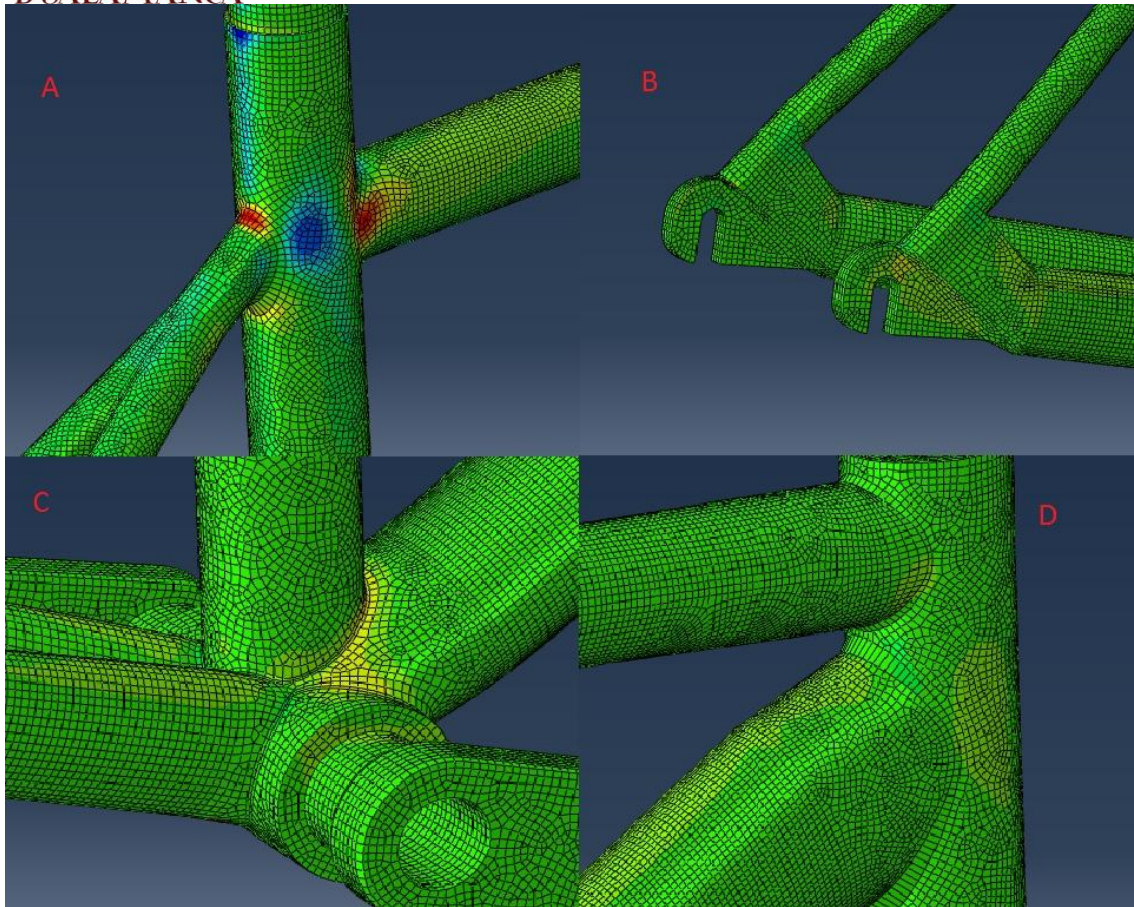
Nos fijamos en las tensiones máximas que se producen en nuestro objeto. Aparecerá en el cuadro a la izquierda de nuestra pantalla, en la cual aparece las tensiones para los diferentes tonos de color, y las tensiones máximas y mínimas y en que nudo se encuentra. Las tensiones las miraremos en el eje S, S11 y S, S22.



En la siguiente imagen se marcan las zonas donde las tensiones son más elevadas o donde se ve que trabaja el cuadro al esfuerzo expuesto.



Esta es la imagen aumentada de las 4 zonas señaladas.




La zona donde se produce la mayor concentración de tensiones es la que se ve en el dibujo “A”, que es la primera unión o el primer soporte donde recae el peso del ciclista. Las demás se producen a la hora de distribuir el peso para que lleguen a las cuatro patillas.

- La tensión máxima en el eje X (S, S11) es de 90'71 MPa.
- La tensión máxima en el eje Y (S, S22) es de 187'76 MPa.
- La tensión máxima en el eje Z (S, S33) es de 0 MPa.

Con los datos del material obtenidos se sabe que el límite elástico es de 275 MPa, frente a los 187 MPa de la tensión máxima, se puede afirmar que cumple perfectamente con el espesor de 2 mm que le dimos anteriormente.

En esta parte lo que se hará será calcular las tensiones analíticamente en determinados puntos de la pieza y comprobaremos que esta tensión coincide o la diferencia no es muy grande, por el orden del 10%.

Para saber las tensiones que tiene en cada parte pulsaremos el botón “Query information” . Nos aparecerá la ventana de “Query” y seleccionamos “Prove



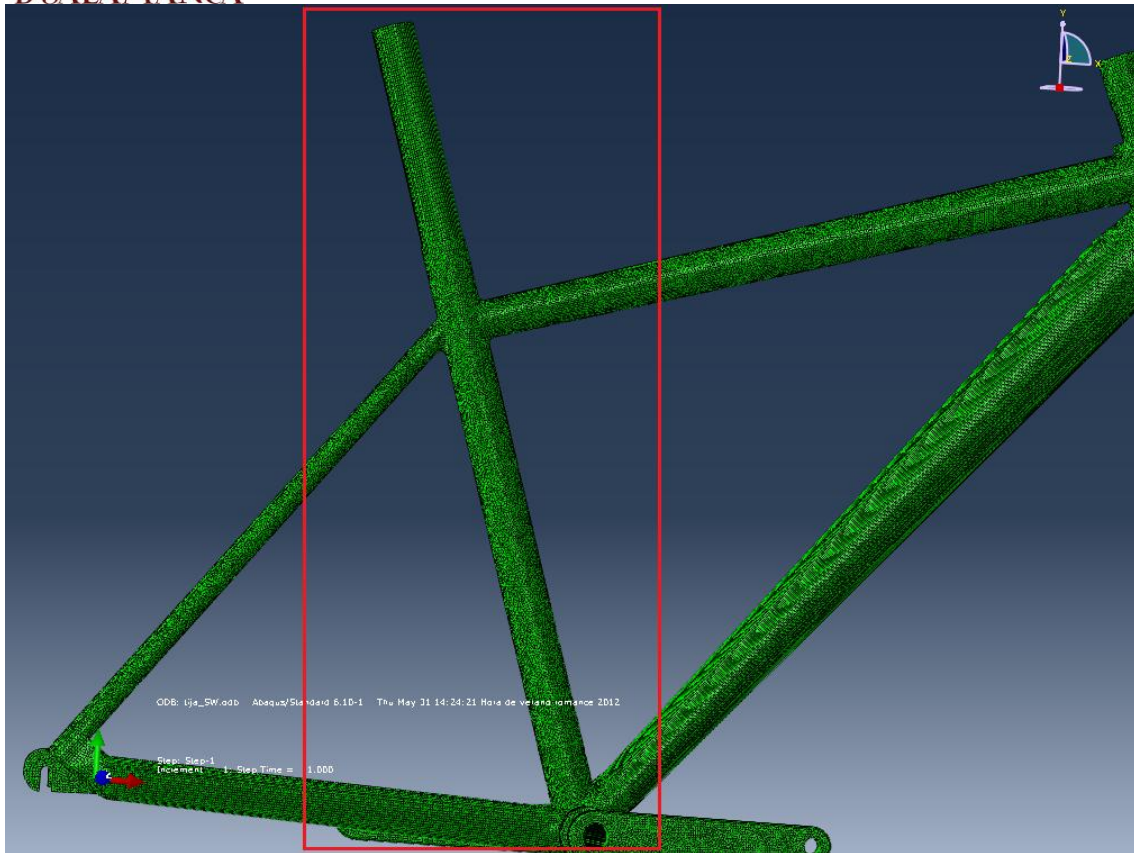
values” en “Visualización Module Queries”. Esto a su vez nos lleva a la ventana “Prove Values”. En esta ventana se debe de seleccionar en “Probe”, “Nodes”. Se selecciona las casillas de “Part instance” (no influye mucho esta), “Node ID”, “Orig. Coords” y “S,S11” (esta variará a “S,S22” dependiendo de sobre que eje se esté estudiando las tensiones). En el dibujo se irá seleccionando todos los nodos de la sección que vayamos a estudiar, en nuestro caso la A-A’ mostrado en el dibujo un poco mas adelante. Según se selecciona en la parte “Slected Probe Values” se irán guardando todos los nodos seleccionados en la pieza, se mostraran los valores que se activaron en las casillas un poco más arriba de la ventana.

2.3.- Cálculos teóricos y comparación con Abaqus

A continuación se va a realizar una serie de cálculos sobre determinadas partes de nuestro cuadro, las cuales se podían considerar partes principales del mismo.

Explicar primero, que debido a la complejidad del objeto, es muy complicado determinar las tensiones en puntos concretos del modelo, por lo que se hará serán valoraciones aproximadas, pero estado siempre dentro del rango de valores en los cuales se tiene que encontrar.

Los primeros cálculos se van a centrar en el tubo vertical del cuadro, donde está aplicada la siguiente fuerza correspondiente al peso del ciclista.



- $N = 1962 \text{ N}$.

En la parte inferior de los cálculos se va a suponer que estará empotrada y libre arriba.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(35^2 - 33^2) = 106'8 \text{ mm}^2$$

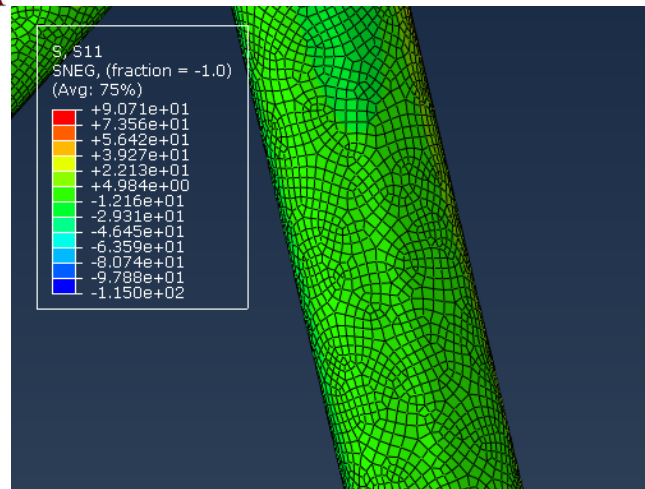
Calculo de las tensiones del eje X (S11).

Se sabe que hay una fuerza vertical del peso de 1962 N, y que el tubo tiene una inclinación de $73'5^\circ$. Por lo que:

$$\text{tg}73'5 = \frac{1962}{x}; x = \frac{1962}{\text{tg}73'5} = 581'171 \text{ N}$$

Esta sería la componente horizontal del peso. Por lo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{581'171}{106'8} = 5'442 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 5'442 \text{ MPa}$$

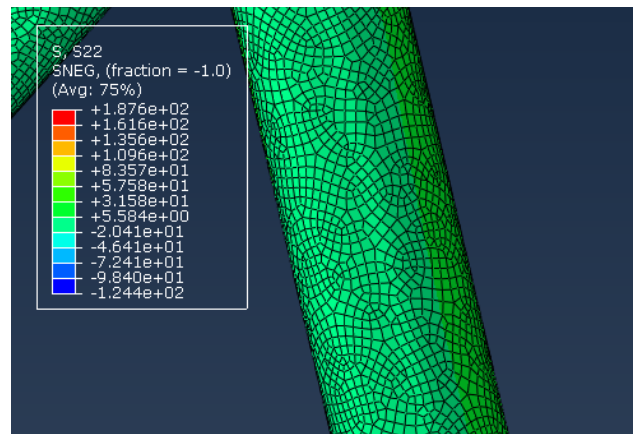


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

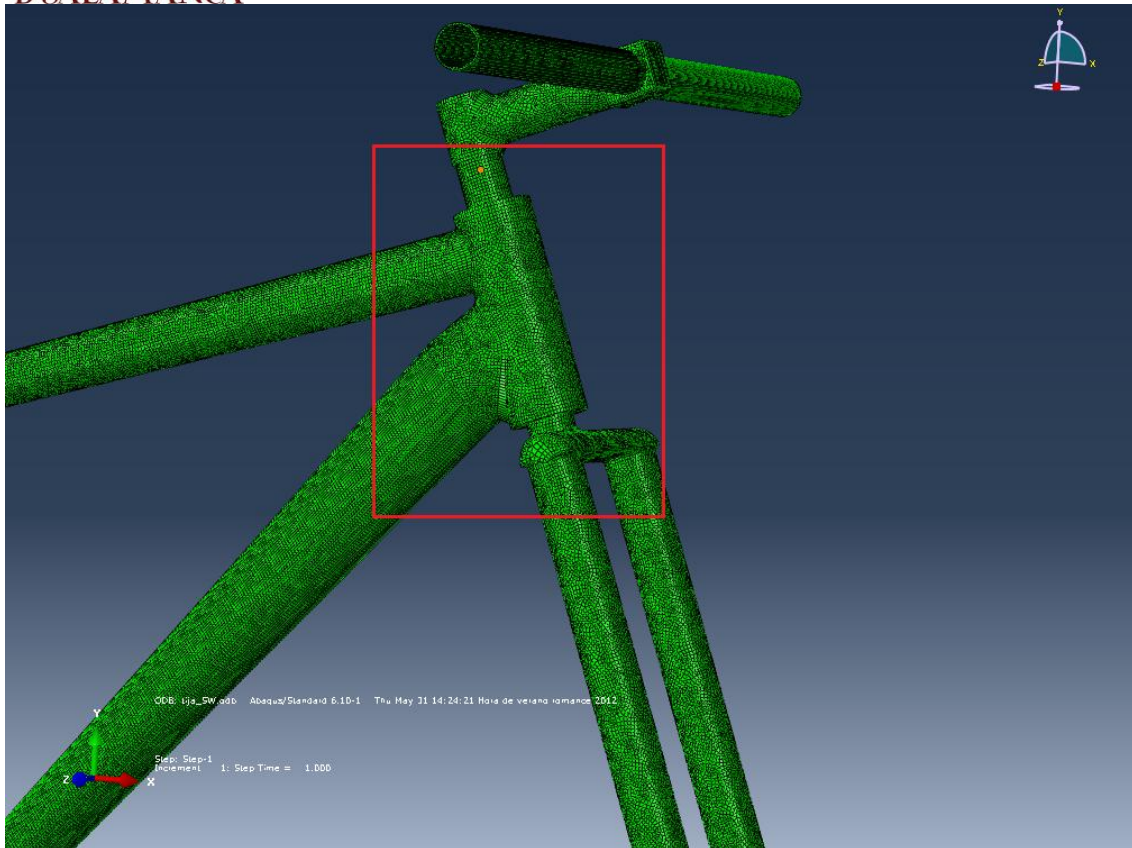
Se utiliza la fuerza de 1962 N por que es vertical. Por lo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1962}{106'8} = 18'371 \frac{N}{mm^2} = 18'371MPa$$



Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.

Como segunda parte a estudiar, se va a escoger el tubo de la dirección. Al igual que el tubo vertical se va a suponer que está empotrado en la parte inferior y libre en la superior.



Se hace traslado de fuerzas, por lo que se supone que la fuerza de 1962 N está aplicada sobre este tubo.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(48'2^2 - 28'6^2) = 1182'244 \text{ mm}^2$$

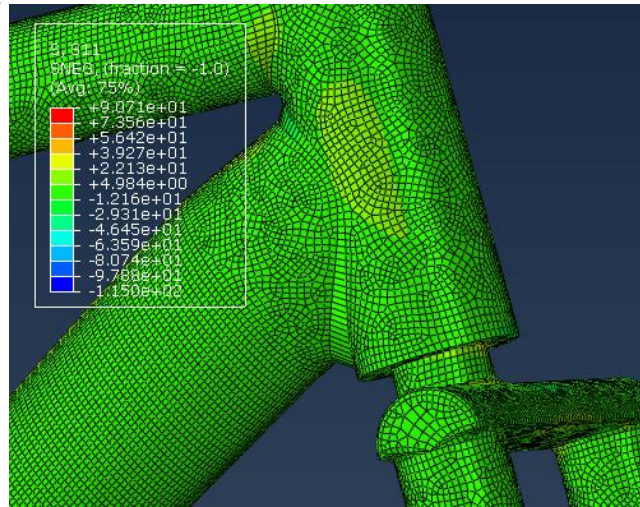
Calculo de las tensiones del eje X (S11).

Se sabe que hay una fuerza vertical es de 1962 N, y que el tubo tiene una inclinación de 70°. Por lo que:

$$\text{tg}70 = \frac{1962}{x}; x = \frac{1962}{\text{tg}70} = 714'109 \text{ N}$$

Esta sería la componente horizontal del peso. Por lo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{714'109}{1182'244} = 0'604 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0'604 \text{ MPa}$$

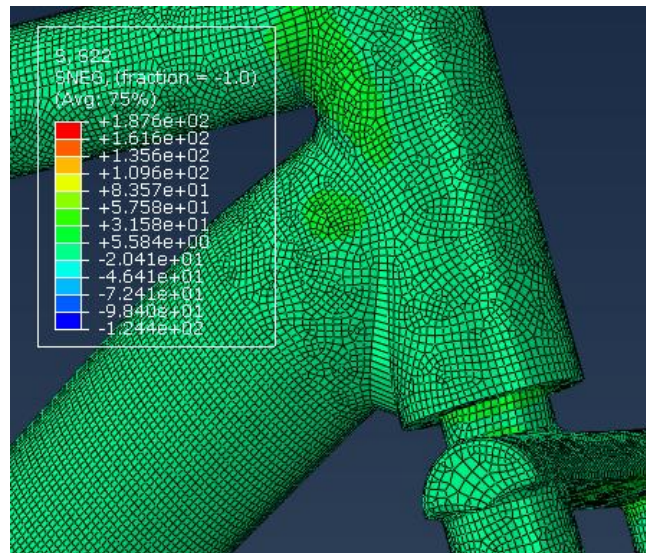


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

Se utiliza la fuerza vertical de 1962 N. Por lo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1962}{1182'244} = 1'659 \frac{N}{mm^2} = 1'659 MPa$$



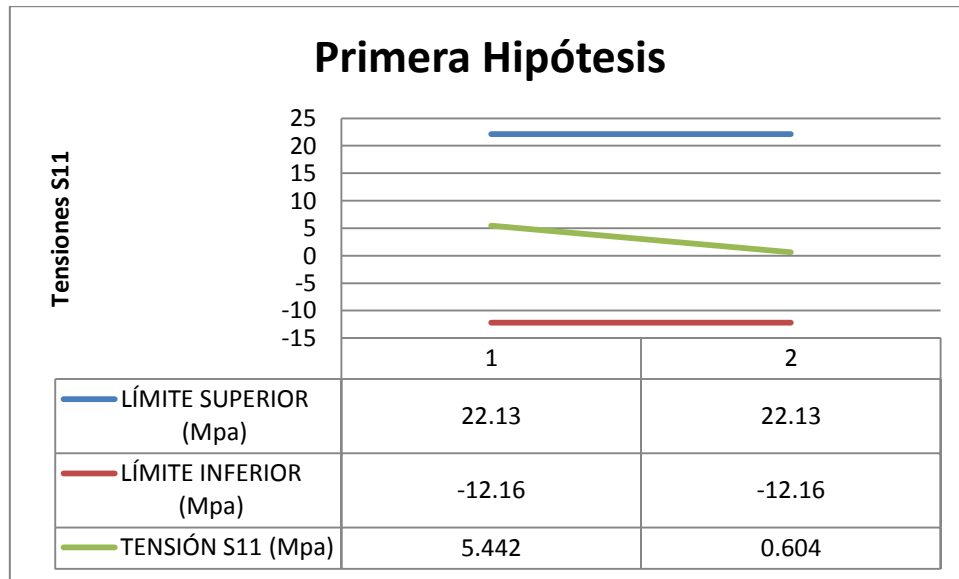
Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.



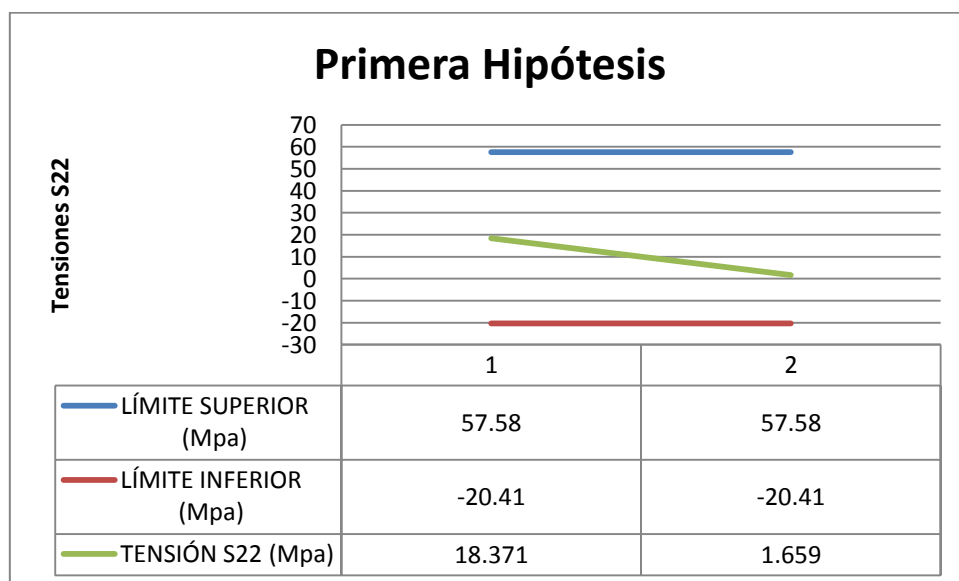
2.4.- Gráficas de tensiones

Se han escogido los puntos de referencia anteriores en los ejes X e Y, con los valores máximos y mínimos entre los que se comprenden y se han realizado una serie de gráficas.

Gráfica S11



Gráfica S22



)



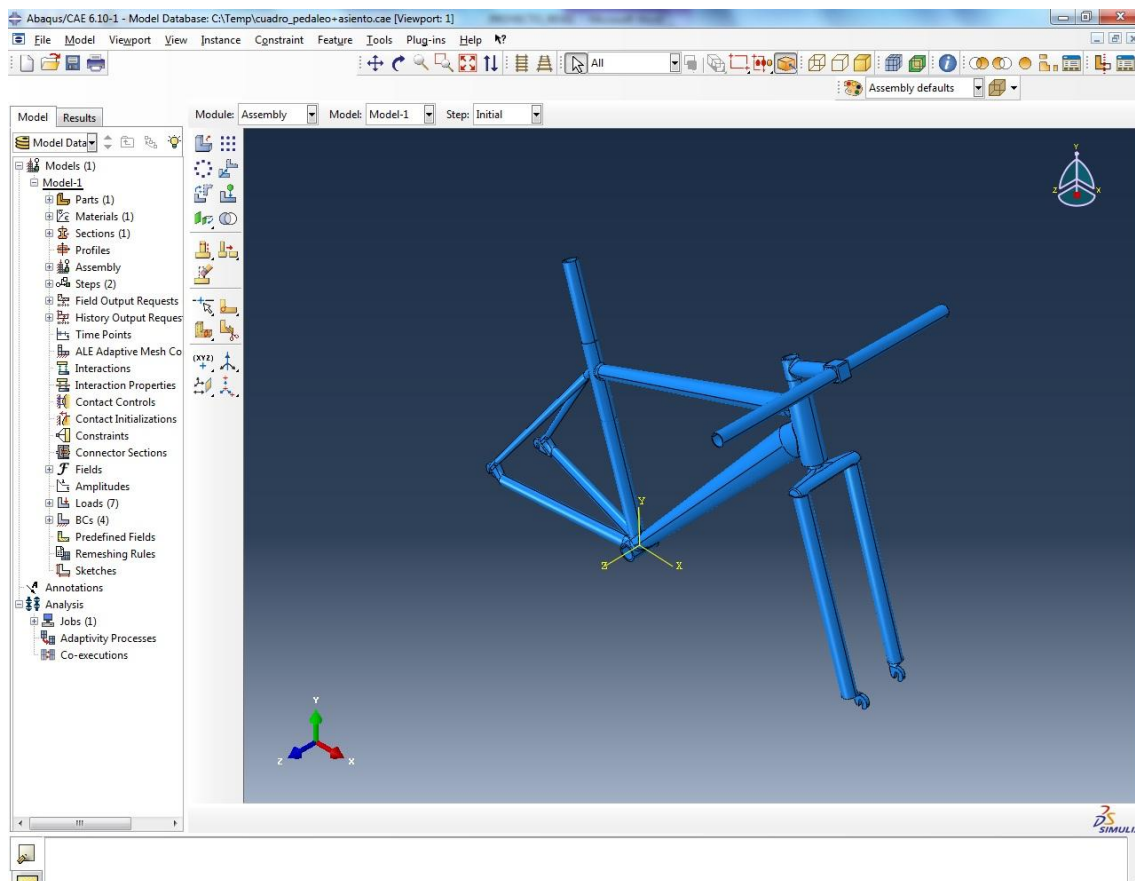
2.4.1.- Segunda hipótesis de carga: sentado y pedaleando.

Esta hipótesis de carga consiste en simular el pedaleo de una persona, sentada sobre el sillín, realizando el máximo esfuerzo posible.

Para esta hipótesis se importará el modelo creado sin bielas en el mismo formato que la anterior hipótesis (.IGS). Se utilizará este modelo porque en las parte del eje del pedalier serán colocadas las cargas a las que estará sometida nuestra hipótesis.

Una vez importado el archivo creado en Autodesk Inventor ® se seguirán los pasos exactamente igual que el apartado anterior:

- Se realizará el mallado del modelo, solventando los problemas de geometría imprecisa que puedan surgir. Se elegirá un modelo tipo Shell igual que en el anterior. El mallado será creado igualmente de 2mm.
- Se creará el ensamblado de este nuevo modelo.
- Se volverá a crear el material elegido, el aluminio T6, introduciendo los mismos datos.





2.4.2.- Condiciones de contorno

Para esta segunda hipótesis y para la siguiente, las condiciones de contorno varían respecto de la primera. Debido a que en estas se tiene una transmisión de esfuerzos entre la caja del pedalier y las patillas traseras producida por el conjunto biela-plato-cadena-piñón, se deberá liberar el desplazamiento en el eje X del buje trasero y colocar las cargas que correspondan para así simular mejor las hipótesis.

Con el desbloqueo del desplazamiento en el eje X del buje trasero, se tendrá que bloquear este mismo en el buje delantero para que el conjunto siga contando con un punto de apoyo totalmente inmóvil.

Resumiendo, las condiciones quedarán de la siguiente manera:

- Eje delantero: desplazamiento X, Y, Z y giros en X, Y impedidos.
- Eje trasero: desplazamientos Y, Z y giros en X, Y impedidos.



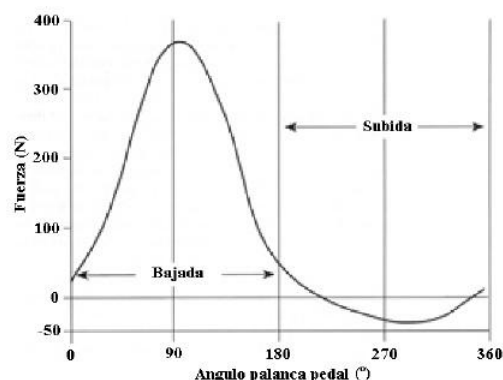
La introducción de las condiciones de contorno en Abaqus ya la pudimos ver en la hipótesis anterior, por lo que en esta hipótesis no se repetirá la explicación.

2.5.- Cargas 2ª HIPÓTESIS

Para averiguar las cargas que se deberán aplicar sobre el cuadro, se dispondrá que el peso de la persona es el mismo que el de la hipótesis anterior, 100 kg, y que la cadencia de pedaleo a máximo esfuerzo sentado, que aunque nos encontramos en una hipótesis estática para el cálculo de la fuerza aplicada sobre la biela es necesaria, es de 100 pedaladas por minuto.

Por otra parte se debe mencionar que la potencia media que genera una persona al pedalear es de 200 Watt, pero que los picos cuando está realiza el máximo esfuerzo pueden alcanzar el caballo de potencia (736 Watt).

También se debe saber que la fuerza que el ciclista realiza con el pie sobre el pedal durante una vuelta completa del mismo, varía en módulo y dirección tal como se aprecia en la figura inferior izquierda. La fuerza tiene una pequeña componente en el eje de la X que se desprecia. Como se ve en el diagrama de la derecha la fuerza



Fuerza efectiva sobre el pedal



máxima se desarrolla prácticamente cuando el pedal forma 90° con la vertical.

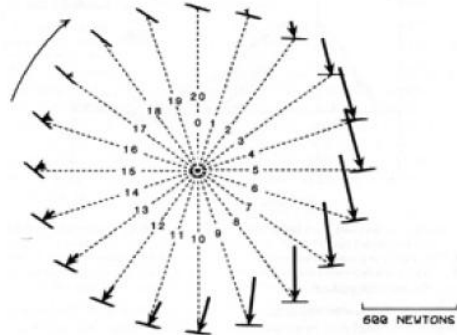


Diagrama típico de fuerzas durante una revolución del pedal

Con estos datos se realizan los cálculos:

- Potencia (P) = 736 W.
- Peso = $100 \cdot 9,81 \cdot 2 = 1962$ N (incluido en coeficiente de seguridad).
- Cadencia (w) = 100 rpm = $10,472$ rad/s.
- Longitud de biela (L) = 0.1725 m.

Para averiguar la fuerza que se ejerce sobre el pedal derecho debemos aplicar el concepto de que es la fuerza por distancia, y que la potencia es el par por las revoluciones. Operando en unidades del sistema internacional:

$$P = M * w; 736 = M * 10,472; M = 70,283$$

$$M = F_{pedal} * L; 70,283 = F_{pedal} * 0,1725; F_{pedal} = 407,435$$

Una vez hemos averiguado la fuerza sobre el pedal se debe estimar el peso que recaerá sobre el asiento. Sabiendo que las piernas, elementos del cuerpo que apoyarán su peso en los pedales, constituyen el 20% de la masa corporal (en nuestro caso el 20% de 100 kg, 20 kg) se puede decir que sobre el tubo vertical o del sillín (sin tener en cuenta los brazos, entre 2,5 y 4 kg por brazo, apoyan sobre el manillar) habrá una masa de 80 kg, multiplicado por el coeficiente de seguridad 2 que se puso anteriormente, por acciones que pudieran ocasionarse por la orografía del terreno, que será un esfuerzo total de 1569,6 N.



- $P_{sillin} = 1569,6$ N.

VNiVERSiDAD D SALAMANCA

Además de las cargas en el sillín y el pedal, se debe tener en cuenta el conjunto plato-cadena-piñones. Al generar un par de torsión M (producido por la fuerza sobre el pedal, y transmitido al plato a través de la biela) en el plato, este provocará una tensión en la cadena.

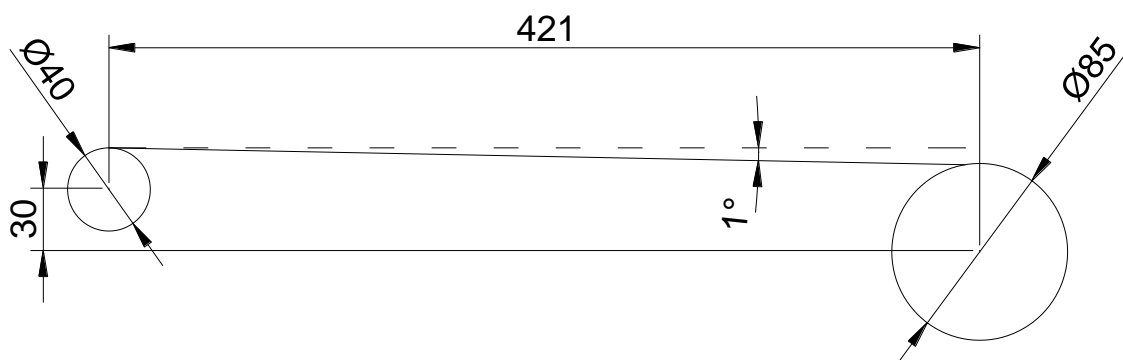
Para calcular esta tensión se debe conocer el tamaño del plato y el par ($M = 70'283 \text{ Nm}$). El diámetro del plato es de $0'085 \text{ m}$, corresponde a un plato de 22 dientes, eligiendo el plato pequeño para que la tensión sea elevada y así tener unas cargas más desfavorables, con lo que la tensión (T) de la cadena es:



$$T = \frac{M}{D/2} = \frac{70'283}{0'0425} = 1653'708N$$

Una vez se tiene la tensión de la cadena, debemos saber qué ángulo tiene esta respecto del eje horizontal.

Para ello se elige un diámetro de piñón, 40 mm (11 dientes), y contando con el diámetro del plato, 85 mm , y con las posiciones del centro de la caja del pedalier y el buje, se obtiene el ángulo que forma la cadena respecto de la horizontal.

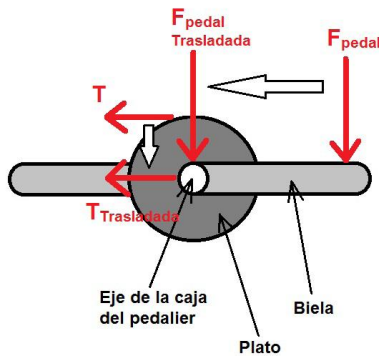


VNiVERSiDAD D SALAMANCA

Una vez ya se tiene el ángulo, 1° , y la tensión (T) de la cadena, se descompone esta en los ejes X e Y:

- $T_x = T * \cos 1^\circ = 1653'445N$
- $T_y = T * \sin 1^\circ = 29'438N$

Como se ve la componente en Y de la tensión es muy pequeña respecto de la componente en X. debido a esto y a que para las condiciones de carga es más desfavorable no contar con ella, ya que su sentido al transmitirse a la caja del pedalier es en Y positivo, restándose a la fuerza que se ejerce sobre el pedal (sentido en Y negativo), lo que se hará será trabajar con toda la tensión en el eje X, como si el ángulo con respecto a la horizontal fuese de 0° . Por lo tanto el valor de la tensión de trabajo será de $T= 1653'708 N$.



Con estos datos se pasa a ver como se transmiten estas cargas al cuadro.

La carga vertical sobre el pedal, se transmitirá directamente al eje de la caja del pedalier, ya que se supone que la biela es totalmente rígida e indeformable.

La tensión de la cadena provocará una fuerza en sentido del eje X negativo en la caja del pedalier, y una fuerza en sentido del eje X positivo en el buje trasero.

La carga del sillín se transmitirá, como en la hipótesis anterior, a la parte superior del tubo del sillín, con lo que finalmente el cuadro cargado quedará como en la imagen de la derecha.

Sabiendo que van aplicadas en cada uno de los ejes, ahora se deberá analizar cada uno de ellos por separado.

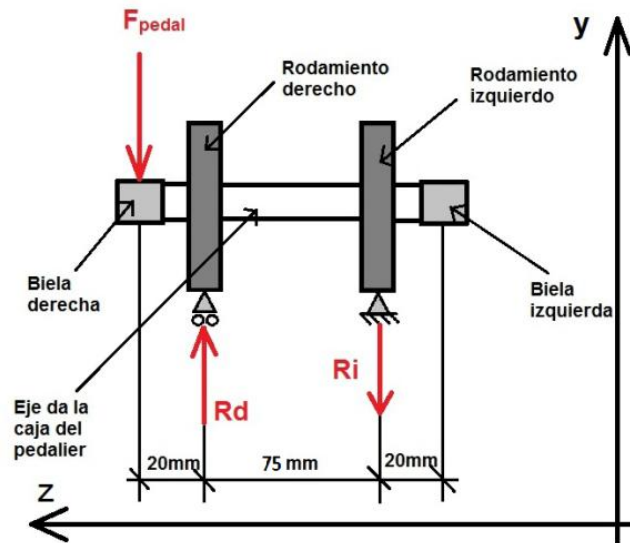


Fuerzas en la caja del pedalier

Se empieza trabajando con el eje de la caja del pedalier, donde se tiene aplicada en la parte derecha final del eje la fuerza F_{pedal} y la fuerza T. con estas fuerzas y las dimensiones de la caja del pedalier se hallan las reacciones que se producen en cada uno de los dos rodamientos. La anchura de la caja de pedalier es de 75 mm, y la distancia desde las bielas es de 20 mm.



Si nos posicionamos en una vista frontal de la caja del pedalier correspondiente con el plano formado por los ejes Y y Z, se resolverán las reacciones que produce la fuerza del pedal.



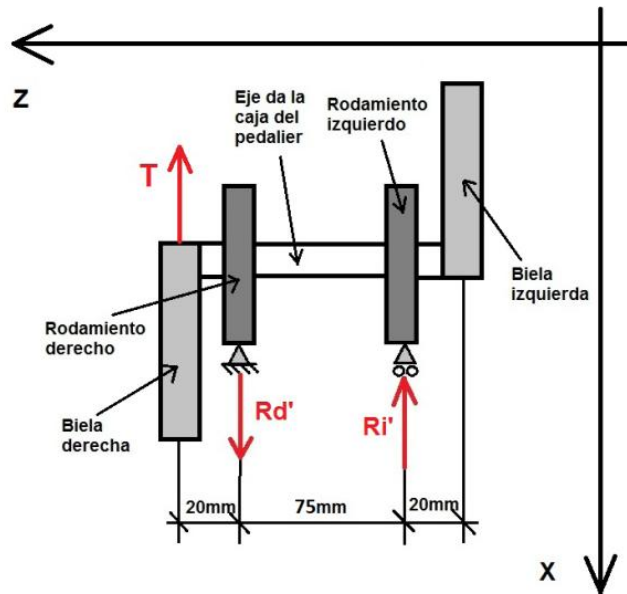
$$\sum F_y = 0; R_i + 407'42 = R_d; R_i = 108'64N$$

$$\sum M_x = 0; R_d \cdot 75 = 407'42 \cdot (20 + 75); R_d = 516'06N$$

Las fuerzas transmitidas por los rodamientos a la caja del pedalier del cuadro en las zonas donde apoyan estos, serán las reacciones resueltas pero con sentido contrario:

- $F_d = -516'06 \text{ N}$ (sentido negativo del eje Y)
- $F_i = 108'64 \text{ N}$ (sentido positivo del eje Y)

Ahora nos posicionamos desde la vista superior, plano de los ejes X y Z, para resolver las reacciones que provocará la fuerza T en los rodamientos. Como se puede observar el plato no está incluido ya que lo se la considera una misma pieza de la biela, ocupando la misma posición.



$$\sum F_y = 0; Ri' + 1653'708 = Rd; Ri' = 441'08N$$

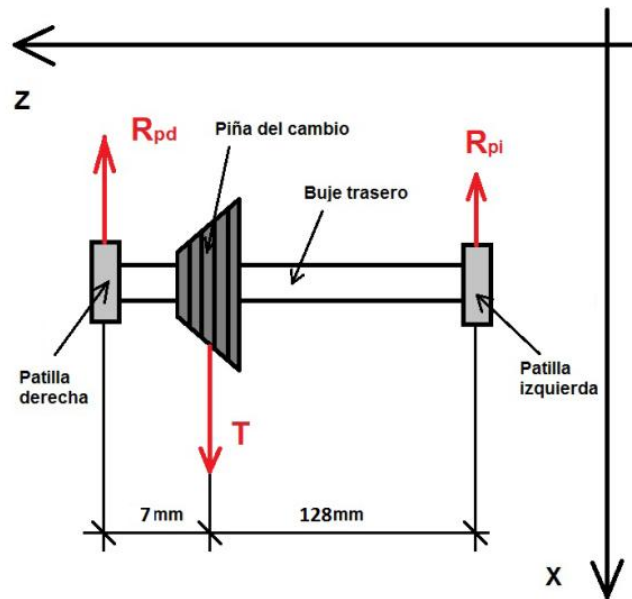
$$\sum M_x = 0; Rd' \cdot 75 = 1653'708 \cdot (20 + 75); Rd' = 2094'788N$$

Las fuerzas transmitidas por los rodamientos a la caja del pedalier del cuadro en las zonas donde apoyan estos, serán las reacciones pero con sentido contrario.

- $Fd' = -2094'788 \text{ N}$ (sentido negativo del eje X).
- $Fi' = 441'08 \text{ N}$ (sentido positivo del eje X).

Fuerzas en el eje trasero

La fuerza que se transmite a través de la cadena es la tensión T, así que se debe posicionar en el plano formado por los ejes X y Z. La distancia entre las patillas es de 135 mm, y la distancia de la piña del cambio a la patilla derecha es de 7 mm.



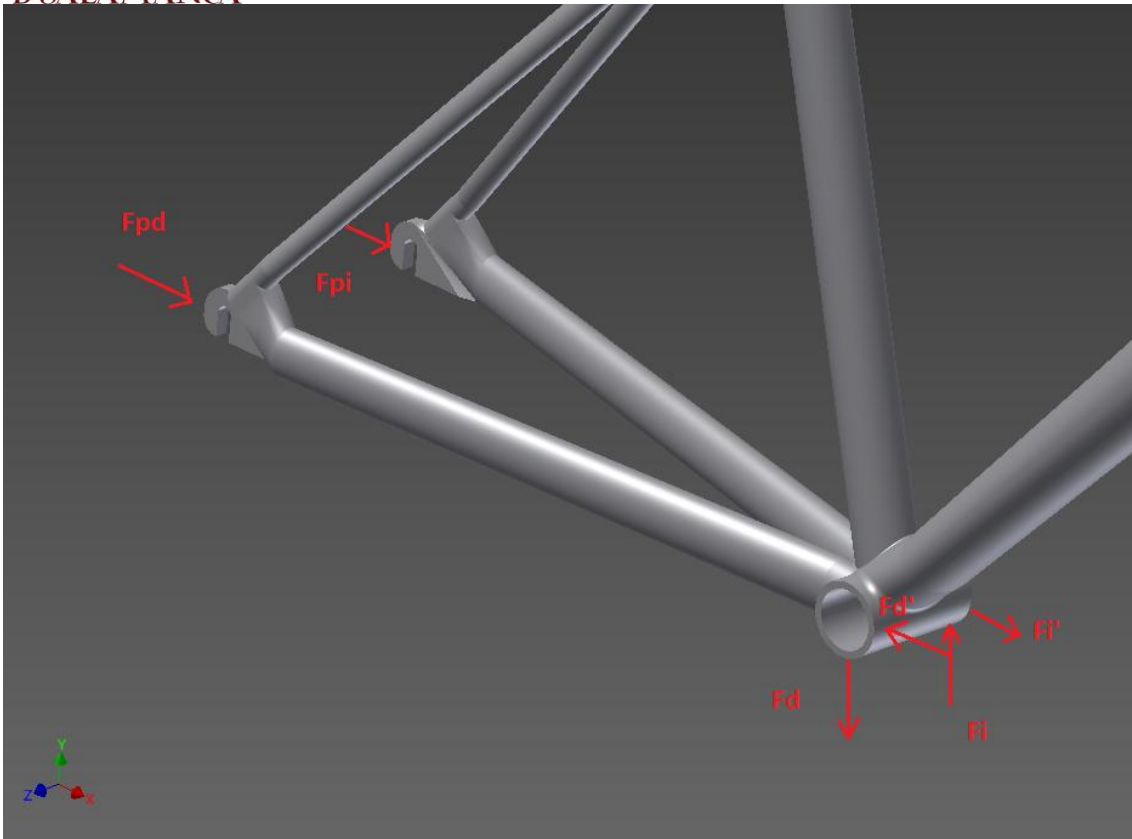
$$\sum F_y = 0; R_{pd} + R_{pi} = 1653'708; R_{pi} = 85'74N$$

$$\sum M_x = 0; R_{pd} \cdot 135 = 1653'708 \cdot 128; R_{pd} = 1567'96N$$

Las fuerzas que se transmiten a la patilla derecha e izquierda serán del mismo valor que las reacciones pero de sentido contrario.

- $F_{pi} = -85'74 \text{ N}$ (sentido negativo del eje X).
- $F_{pd} = 1567'96 \text{ N}$ (sentido positivo del eje X).

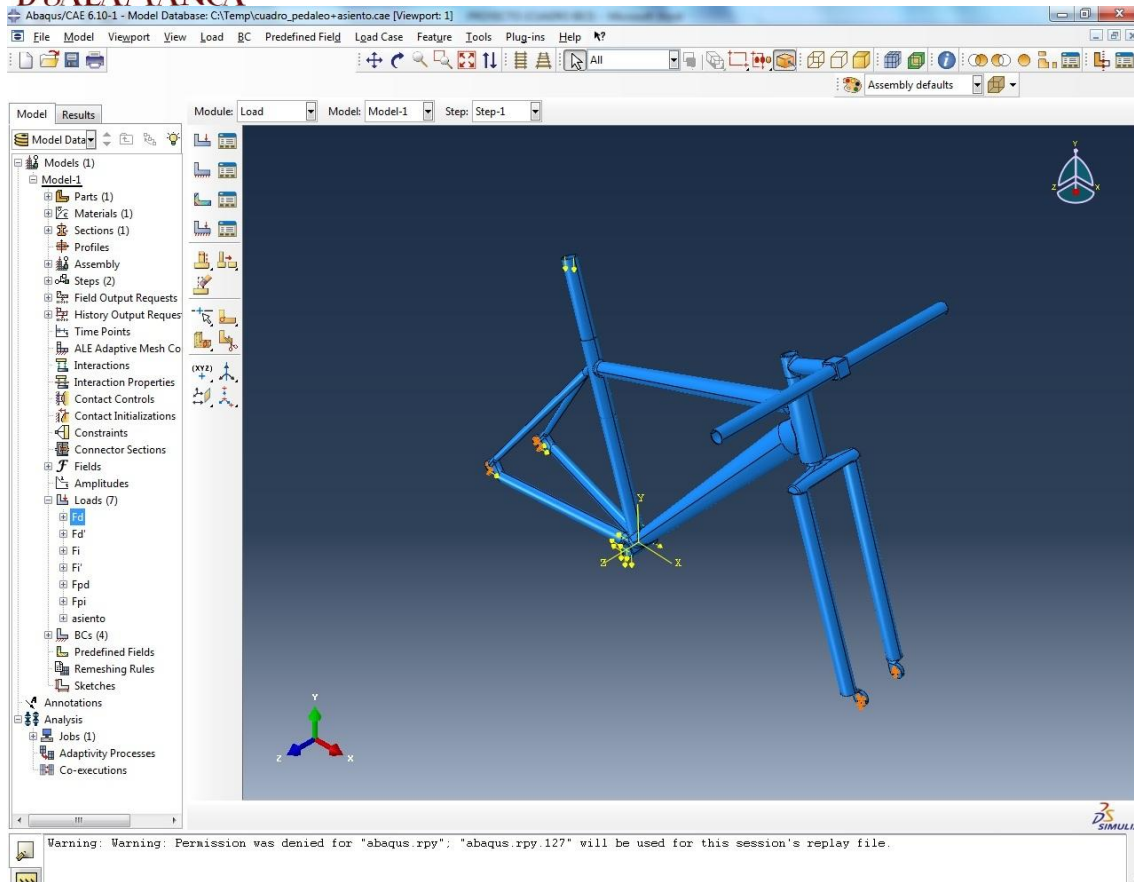
En definitiva, las fuerzas a aplicar en la caja del pedalier y el eje trasero son las siguientes:



- $F_d = 516'06 \text{ N}$.
- $F_i = 108'64 \text{ N}$.
- $F_{d'} = 2094'788 \text{ N}$.
- $F_{i'} = 441'08 \text{ N}$.
- $F_{p_i} = 85'74 \text{ N}$.
- $F_{p_d} = 1567'96 \text{ N}$.
- $P_{sillin} = 1569'6 \text{ N}$.



Una vez ya se tienen todas las cargas solo falta introducirlas en el modelo de Abaqus. Como se vio en la hipótesis anterior las cargas están condicionadas por el número de nodos creados en el “set” donde inciden. Por lo que:

- $F_d = 516'06 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 2'687 \text{ N por nodo}$.
- $F_i = 108'64 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 0'566 \text{ N por nodo}$.
- $F_{d'} = 2094'788 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 10'91 \text{ N por nodo}$.
- $F_{i'} = 441'08 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 2'297 \text{ N por nodo}$.
- $F_{p_i} = 85'74 \text{ N} \rightarrow 110 \text{ nodos} \rightarrow 0'779 \text{ N por nodo}$.
- $F_{p_d} = 1567'96 \text{ N} \rightarrow 110 \text{ nodos} \rightarrow 14'254 \text{ N por nodo}$.
- $P_{sillin} = 1569'6 \text{ N} \rightarrow 96 \text{ nodos} \rightarrow 16'35 \text{ N por nodo}$.



Con las cargas introducidas se ejecuta el análisis de la misma forma que en la primera hipótesis, y se examinan los resultados.

2.6.- Análisis

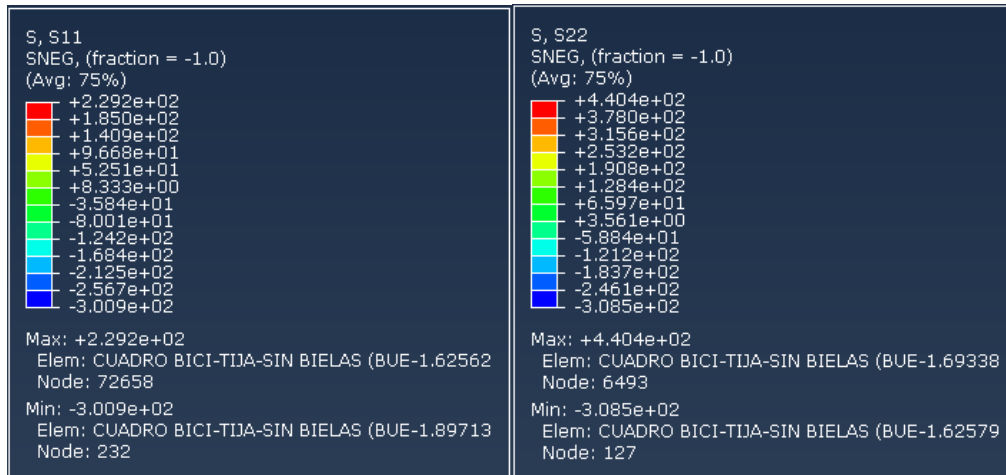
Una vez se tiene el modelo preparado, con las condiciones de contorno y sus cargas, solo falta realizar el análisis. Para poder hacerlo se debe pasar al módulo “Job”. Se crea un nuevo trabajo pulsando el botón “Create Job” , al que se podrá llamar “carga asiento”, se pulsa en “Continue” y aparecerá la ventana “Edit Job”, la cual se acepta por defecto pulsando OK. Ahora se pulsa el botón “Job Manager” , nos aparece la ventana con el mismo nombre y se pulsa el botón “Submit”. Una vez termina de analizar, se pulsa en el botón “Results”, automáticamente pasa a módulo “Visualization”, donde se podrá ver los resultados de las tensiones y deformaciones.

2.6.1.- Cálculos analíticos e interpretación de los resultados

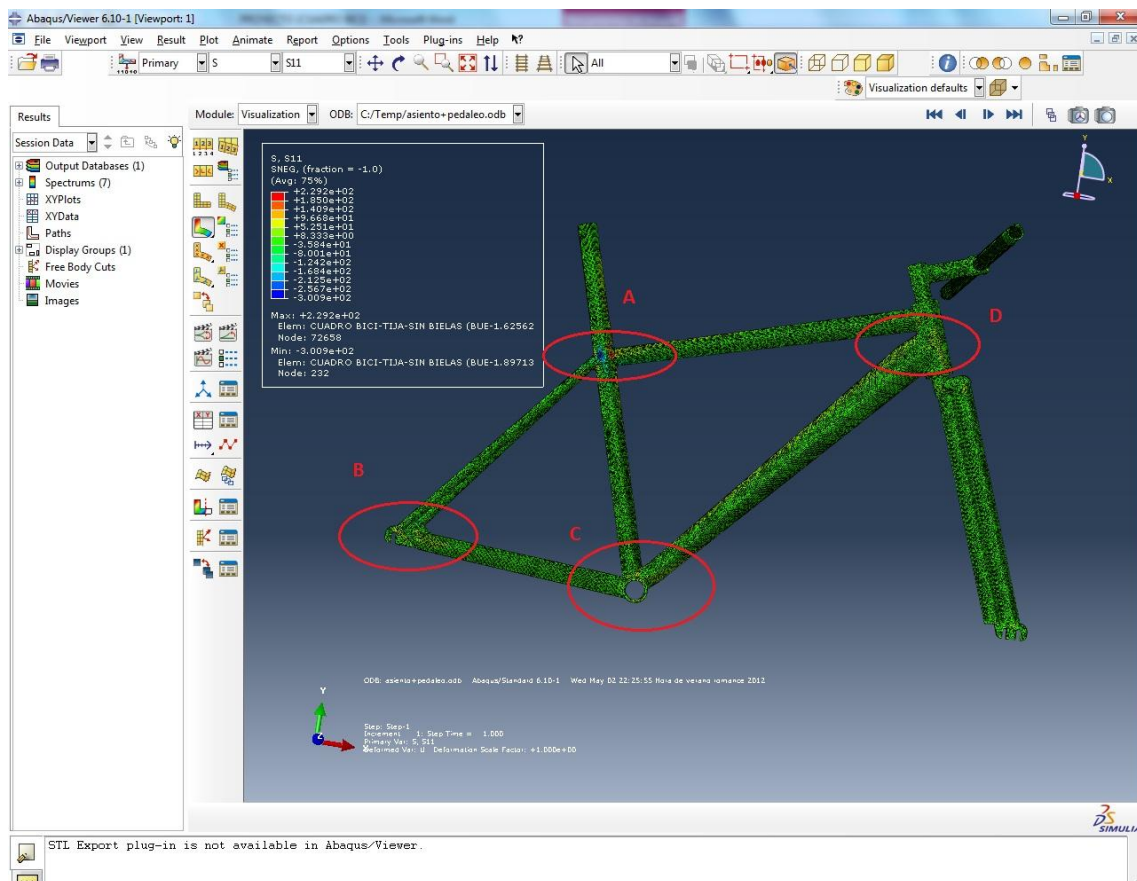
Hay que fijarse en las tensiones máximas que se producen en nuestro objeto. Aparecerá en el cuadro a la izquierda de nuestra pantalla, en la cual aparece las tensiones para los



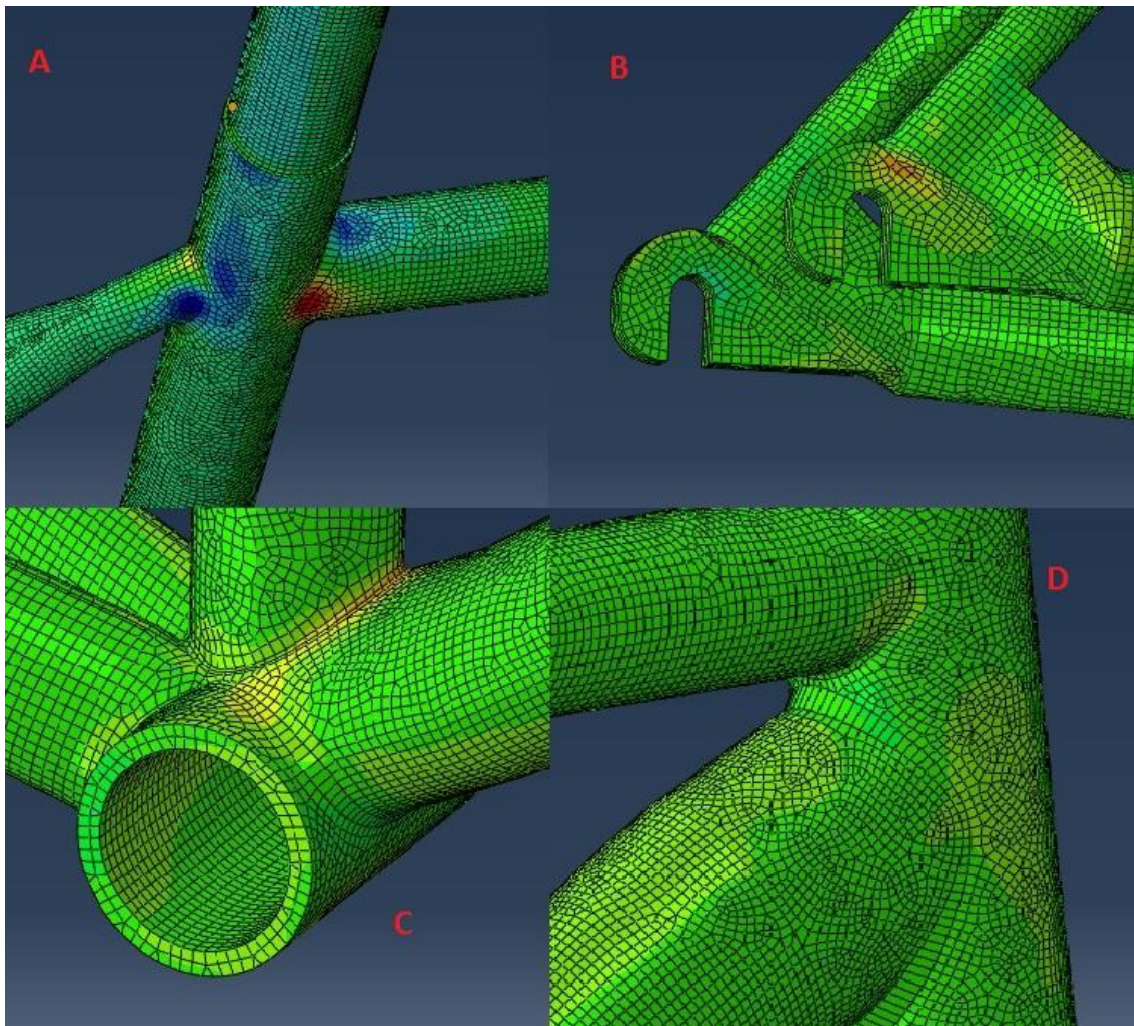
diferentes tonos de color, y las tensiones máximas y mínimas y en que nudo se encuentra. Las tensiones las miraremos en el eje S, S11 y S, S22.



En la siguiente imagen se marcan las zonas donde las tensiones son más elevadas o donde se ve que trabaja cuadro al esfuerzo expuesto.



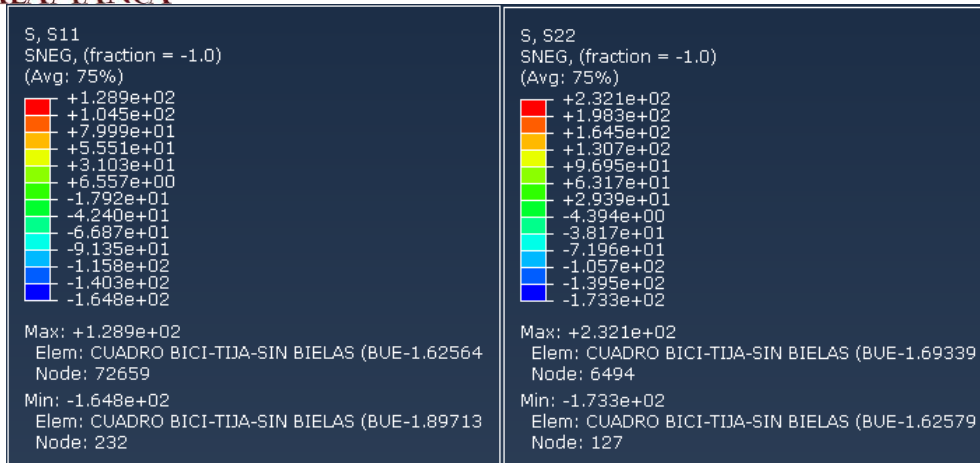
Esta es la imagen aumentada de las 4 zonas señaladas.



La zona donde se produce la mayor concentración de tensiones es la que vemos en el dibujo “A”, que es la primera unión o el primer soporte donde recae el peso del ciclista. Las demás se podría decir que se producen a la hora de distribuir el peso para que lleguen a las cuatro patillas.

- La tensión máxima en el eje X (S, S11) es de 229’2 MPa.
- La tensión máxima en el eje Y (S, S22) es de 440’4 MPa.
- La tensión máxima en el eje Z (S, S33) es de 0 MPa.

Con los datos del material obtenidos se sabe que el limite elástico es de 275 MPa, frente a los 440 MPa de la tensión máxima, así que la estructura rompería, para ello se ha aumentado la sección en 3 mm, dando el siguiente resultado.



(Fig. 22-5 Visualización de tensiones máx-min)

- La tensión máxima en el eje X (S, S11) es de 128'9 MPa.
- La tensión máxima en el eje Y (S, S22) es de 232'1MPa.
- La tensión máxima en el eje Z (S, S33) es de 0 MPa.

En esta parte lo que se hará será calcular las tensiones analíticamente en determinados puntos de la pieza y se comprobará que esta tensión coincide o la diferencia no es muy grande, por el orden del 10%.

Para saber las tensiones que tiene en cada parte se pulsa el botón “Query information”



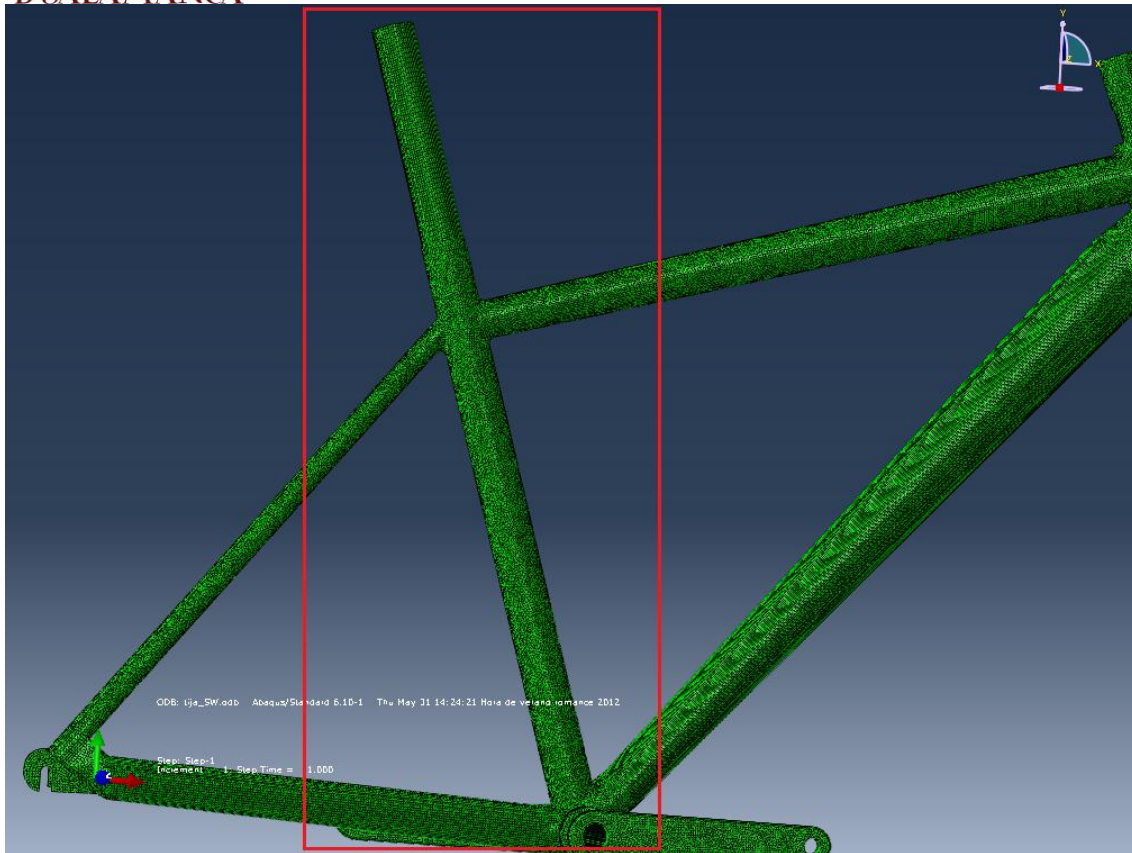
Aparecerá la ventana de “Query” y se selecciona “Prove values” en “Visualización Module Queries”. Esto a su vez lleva a la ventana “Prove Values”. En esta ventana se debe de seleccionar en “Probe”, “Nodes”. Se seleccionan las casillas de “Part instance” (no influye mucho esta), “Node ID”, “Orig. Coords” y “S,S11” (esta variará a “S,S22” dependiendo de sobre que eje estemos estudiando las tensiones).

2.6.2.- Cálculos teóricos y comparación con Abaqus

A continuación se realizara una serie de cálculos sobre determinadas partes de nuestro cuadro, referentes a la segunda hipótesis de nuestro modelo.

Explicar de nuevo, que debido a la complejidad del objeto, es muy complicado determinar las tensiones en puntos concretos del modelo, por lo que se hará serán valoraciones aproximadas, pero estado siempre dentro del rango de valores en los cuales se tiene que encontrar.

Los primeros cálculos se van a centrar en el tubo vertical del cuadro, donde está aplicada la siguiente fuerza correspondiente al peso del ciclista junto con pedaleo.



- $F_d = 516'06 \text{ N.}$
- $F_i = 108'64 \text{ N.}$
- $F_d' = 2094'788 \text{ N.}$
- $F_i' = 441'08 \text{ N.}$
- $F_{pi} = 85'74 \text{ N.}$
- $F_{pd} = 1567'96 \text{ N.}$
- $P_{sillin} = 1569'6 \text{ N.}$

En la parte inferior de los cálculos se va a suponer que estará empotrada y libre arriba, por lo que las fuerzas que tenemos, como son las de las fuerzas que ejerce el pedaleo, las consideraremos nulas, debido a que están ejercidas justo en el empotramiento. Debido a esto solo tendremos en cuenta la fuerza ejercida por el peso del ciclista.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(35^2 - 33^2) = 106'8 \text{ mm}^2$$

Calculo de las tensiones del eje X (S11).

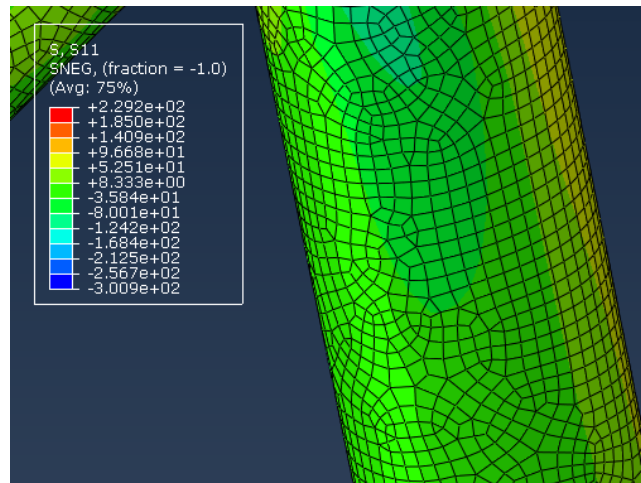


VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

Se sabe que hay una fuerza vertical del peso de 1569'6 N, y que el tubo tiene una inclinación de 73'5°. Por lo que:

$$tg73'5 = \frac{1569'6}{x}; x = \frac{1569'6}{tg73'5} = 464'937N$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{464'937}{106'8} = 4'353 \frac{N}{mm^2} = 4'353MPa$$

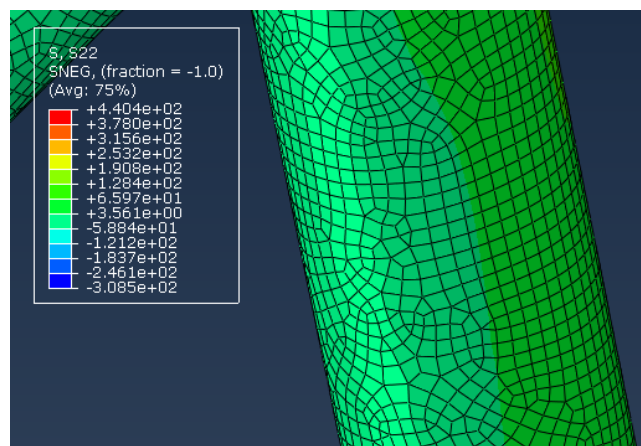


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

Se utiliza la fuerza de 1569'6 N vertical. Por lo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1569'6}{106'8} = 14'697 \frac{N}{mm^2} = 14'697MPa$$

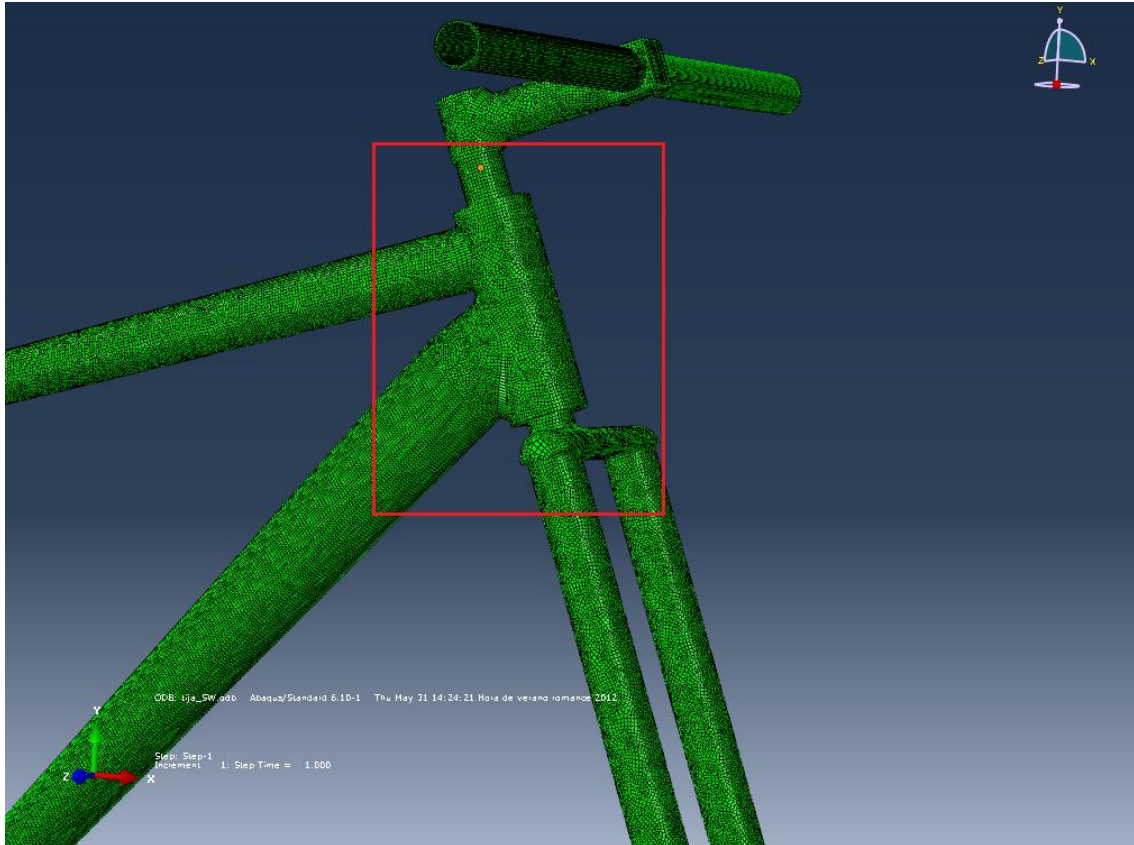




Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.



Como segunda parte a estudiar, se escoge el tubo de la dirección. Al igual que el tubo vertical se va a suponer que está empotrado en la parte inferior y libre en la superior.



Se hace traslado de fuerzas, por lo que se supone que la fuerza de 1569'6 N está aplicada sobre este tubo.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(48'2^2 - 28'6^2) = 1182'244 \text{ mm}^2$$

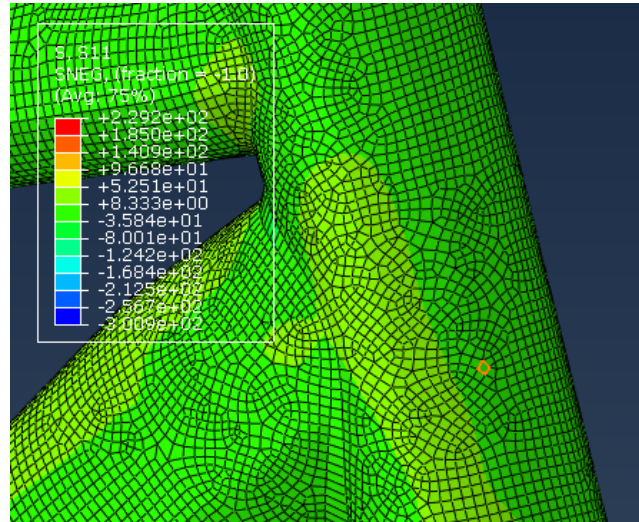
Calculo de las tensiones del eje X (S11).

Se sabe que hay una fuerza vertical es de 1569'6 N, y que el tubo tiene una inclinación de 70°. Por lo que:

$$\text{tg}70 = \frac{1569'6}{x}; x = \frac{1569'6}{\text{tg}70} = 571'288N$$



$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{571'288}{1182'244} = 0'483 \frac{N}{mm^2} = 0'483MPa$$

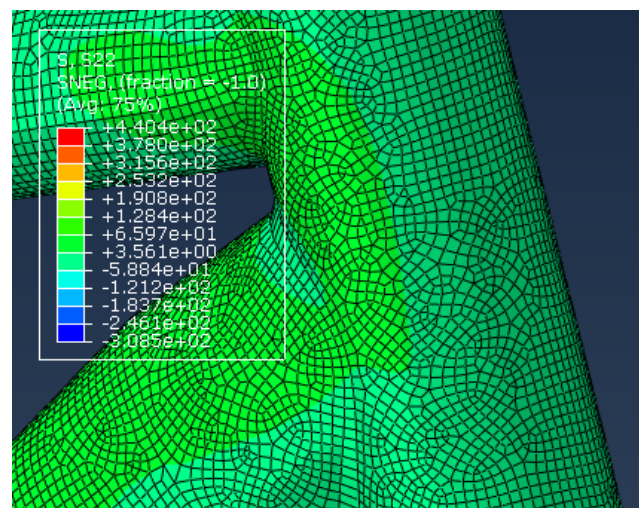


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

Se utiliza la fuerza vertical de 1569'6 N.

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1569'6}{1182'244} = 1'328 \frac{N}{mm^2} = 1'328MPa$$



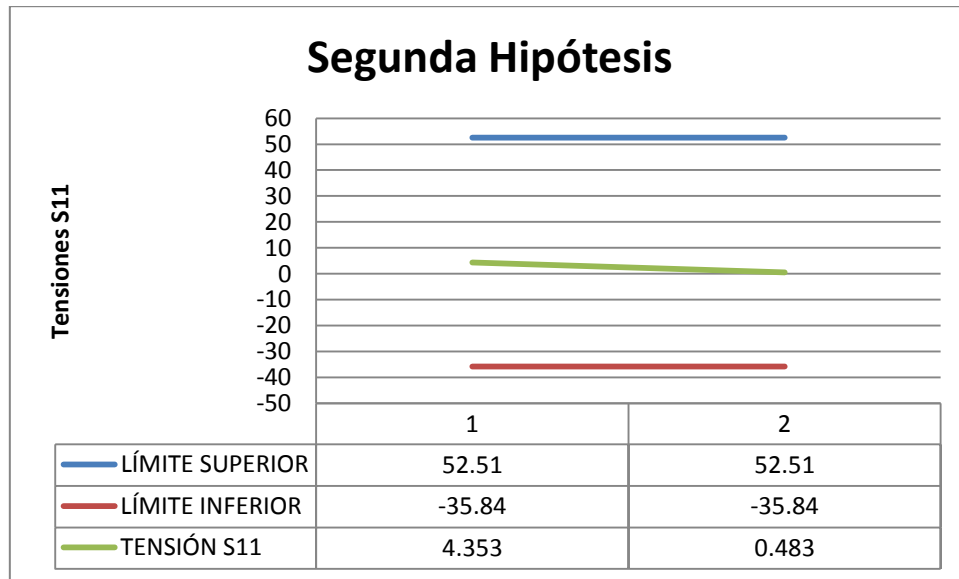
Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.



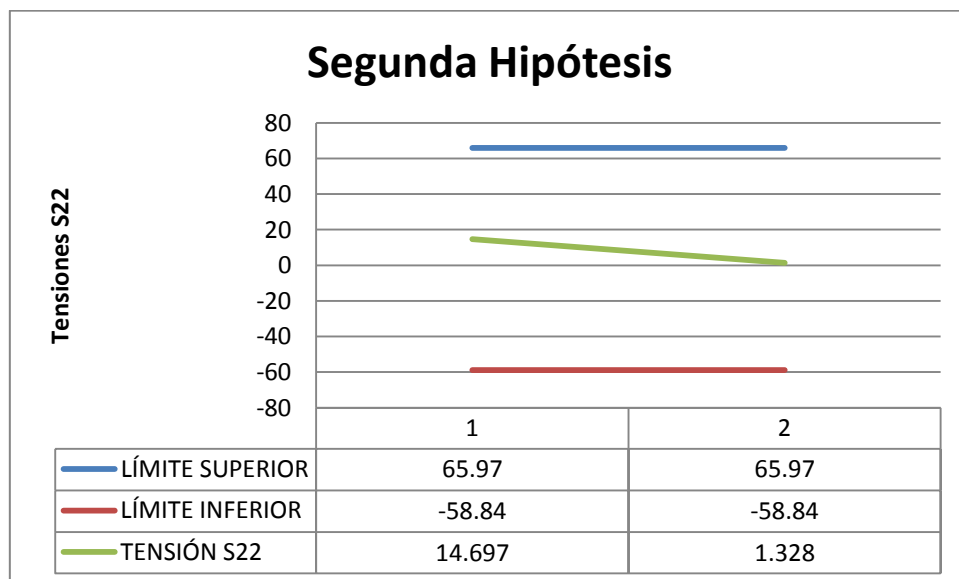
2.6.3.- Gráficas de tensiones

Se han escogido los puntos de referencia anteriores en los ejes X e Y, con los valores máximos y mínimos entre los que se comprenden y se han realizado una serie de gráficas.

Gráfica S11



Gráfica S22





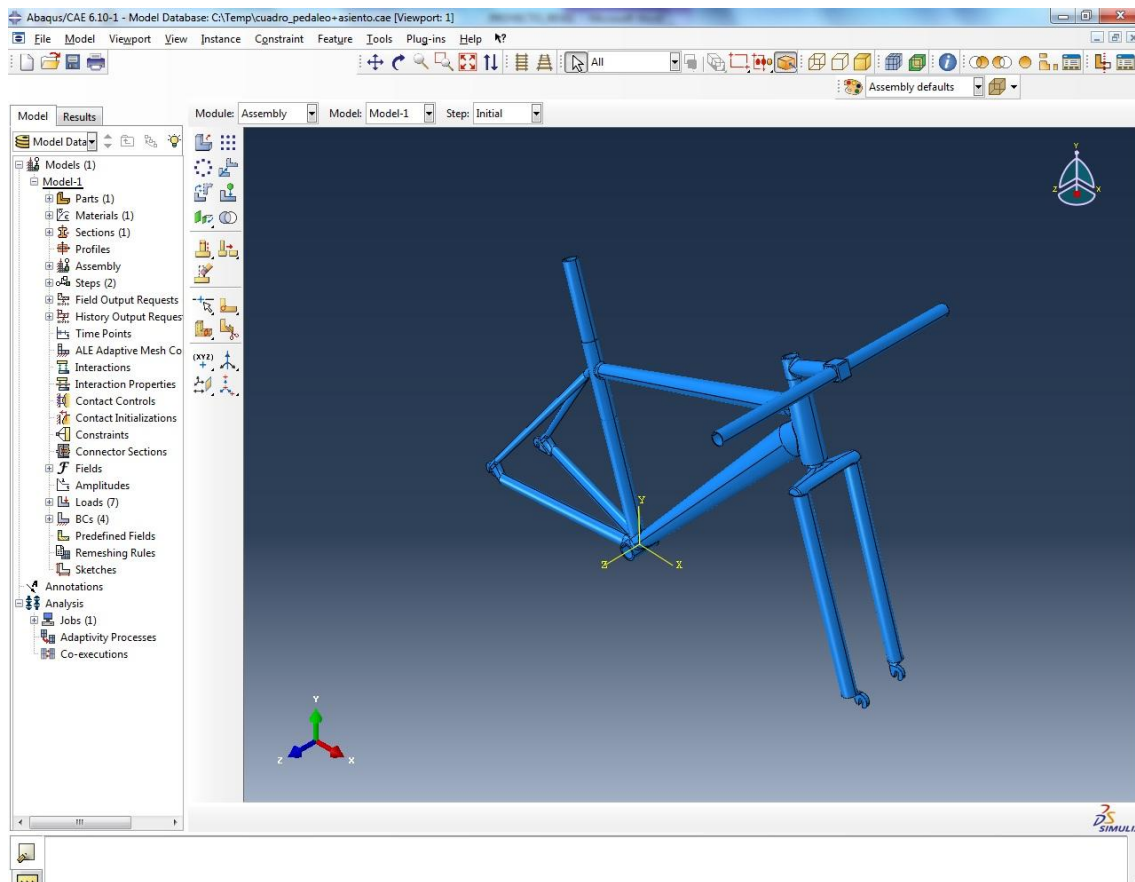
2.7.- Tercera hipótesis de carga: de pie y pedaleando

La tercera hipótesis consiste en simular que una persona pedalea de pie sobre la bicicleta del manillar para realizar el máximo esfuerzo.

Para esta hipótesis se importará el modelo creado sin bielas en el mismo formato que la anterior hipótesis (.IGS). Se utilizará este modelo porque en las parte del eje del pedalier serán colocadas las cargas a las que estará sometida nuestra hipótesis.

Una vez importado el archivo creado en Autodesk Inventor ® se seguirán los pasos exactamente igual que el apartado anterior:

- Se realizará el mallado del modelo, solventando los problemas de geometría imprecisa que puedan surgir. Se elegirá un modelo tipo Shell igual que en el anterior. El mallado será creado igualmente de 2mm.
- Se creará el ensamblado de este nuevo modelo.
- Se volverá a crear el material elegido, el aluminio T6, introduciendo los mismos datos.



2.7.1.- Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno para esta hipótesis son exactamente las mismas que la hipótesis anterior. Resumiendo:

- Eje delantero: desplazamientos X, Y, Z y giros en X, Y impedidos.
- Eje trasero: desplazamientos Y, Z y giros en X, Y impedidos.



Tampoco se explicará como se introducen en Abaqus ya que esto está explicado en la primera hipótesis.

2.7.2.-Cargas

Para calcular la fuerza que ejerce el individuo sobre el manillar y el pedal (biela) hay que fijarse en el siguiente diagrama de sólido libre en el que actúa el peso del individuo, y las reacciones en el pedal y manillar. Si se supone como antes que la persona pesa 100 kg, junto con el coeficiente de seguridad ($C_s=2$), tendremos un peso de 1962 N, y para poder resolver el diagrama se necesita conocer la ayuda que le proporciona al ciclista el hecho de agarrarse del manillar.



Pongamos que una persona de ese peso, puede realizar una fuerza con cada uno de los brazos de 15 kg, es decir de 294'3 N, teniendo en cuenta todo lo anterior. Se toma la fuerza en dirección del eje Y por estar el peso y la reacción del pedal en ese eje, aunque realmente constaría de dos componentes, eje X e Y. la hipótesis aplicada se dice que la fuerza a aplicar se ayuda por igual con los dos brazos al mismo tiempo, la suma de ambas nos daría una fuerza de 588'6 N, que sería el valor de la reacción del manillar. Con esta y el peso, se realiza el equilibrio de fuerzas y se obtiene:

- Peso del individuo (P_{ind}) = 1962 N.
- Reacción del manillar = Fuerza sobre el manillar ($F_{manillar}$) = 588'6 N.
- Reacción del pedal = Fuerza sobre el pedal (F_{pedal}) = $P_{ind} + F_{manillar} = 2550'6$ N.

Con la fuerza sobre el pedal se calcula el par torsos aplicado en el plato (longitud de la biela = 0'1725 m por la fuerza):



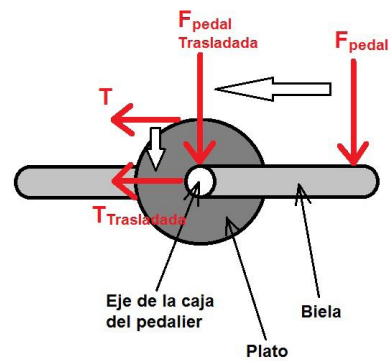
$$\text{Par torsor } (M_{\text{torsor}}) = 2550'6 \cdot 0'1725 = 439'978 \text{Nm}$$

También se calcula la tensión de la cadena (Par torsor partido por el radio del plato, que es el mismo que para la hipótesis anterior, 0'085 m:

$$\text{Tensión } (T) = \frac{439'978}{0'0425} = 10352'423 \text{N}$$

En la hipótesis anterior hemos visto que el ángulo formado por la cadena era muy pequeño, 1°, y como consecuencia de esto y de que se buscan las condiciones más desfavorables para analizar nuestro cuadro, no se descompondrá la tensión de la cadena T, y directamente se situará toda en la dirección del eje X.

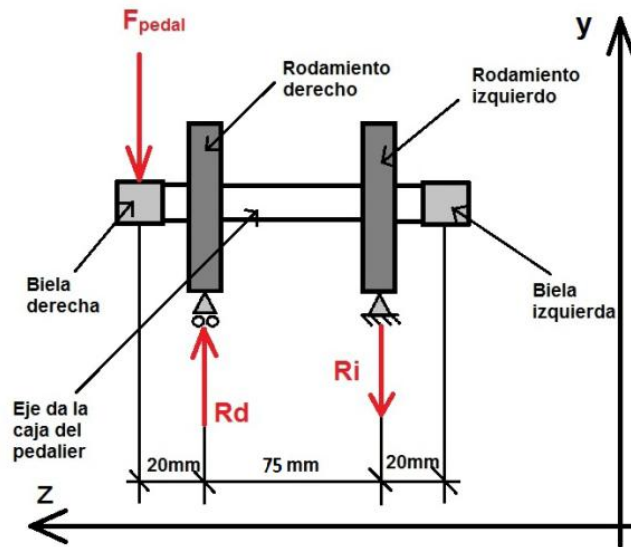
Una vez ya se tiene la fuerza del pedal y la tensión T, el proceso es exactamente el mismo que se ha realizado para la segunda hipótesis, pero sustituyendo los datos por los que se han obtenido ahora. Así que como en el caso anterior, la carga vertical sobre el pedal, se transmitirá directamente al eje de la caja del pedalier, y la tensión de la cadena provocará una fuerza en sentido del eje X negativo en la caja del pedalier, y una fuerza en sentido del eje X positivo en el buje trasero.



En este caso, no se tiene un peso sobre el sillín, pero ahora actúa sobre el manillar una fuerza en sentido negativo del eje Y con el valor que antes hemos supuesto: $F_{\text{manillar}} = -588'6 \text{ N}$.

Fuerzas en la caja del pedalier

Se empezará por el eje de la caja del pedalier, donde se tiene aplicada en la parte derecha final del eje la fuerza F_{pedal} y la fuerza T, siendo la anchura de la caja de pedalier de 75 mm, y la distancia desde los rodamientos a las bielas es de 20 mm. Posicionados en el plano formado por los ejes Y y Z, resolveremos las reacciones que produce la fuerza del pedal.



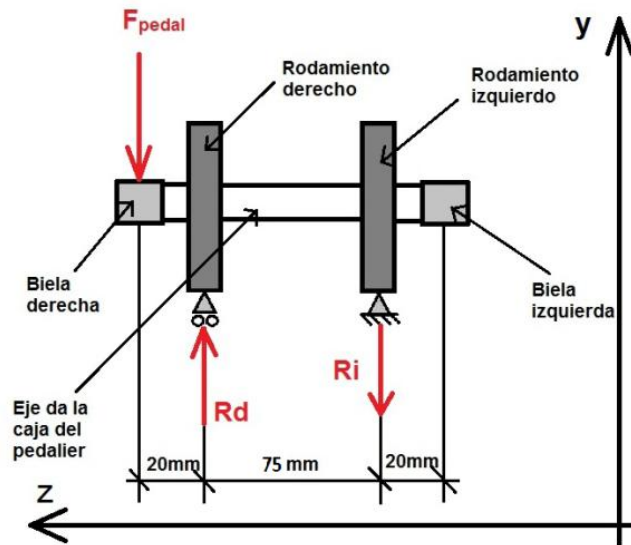
$$\sum F_y = 0; R_i + 2550'6 = R_d; R_i = 680'16N$$

$$\sum M_x = 0; R_d \cdot 75 = 2550'6 \cdot (20 + 75); R_d = 3230'76N$$

Las fuerzas transmitidas por los rodamientos a la caja del pedalier del cuadro en las zonas donde apoyan estos, serán las reacciones resueltas pero con sentido contrario:

- $F_d = -3230'76 \text{ N}$ (sentido negativo del eje Y)
- $F_i = 680'16 \text{ N}$ (sentido positivo del eje Y)

Posicionándonos en el plano de los ejes X y Z, resolveremos las reacciones que provoca la fuerza T en los rodamientos. Como comentamos anteriormente, podemos observar que el plato no está incluido ya que lo consideramos una misma pieza de la biela, ocupando la misma posición.



$$\sum F_y = 0; R_i' + 10352'423 = R_d; R_i' = 2760'646N$$

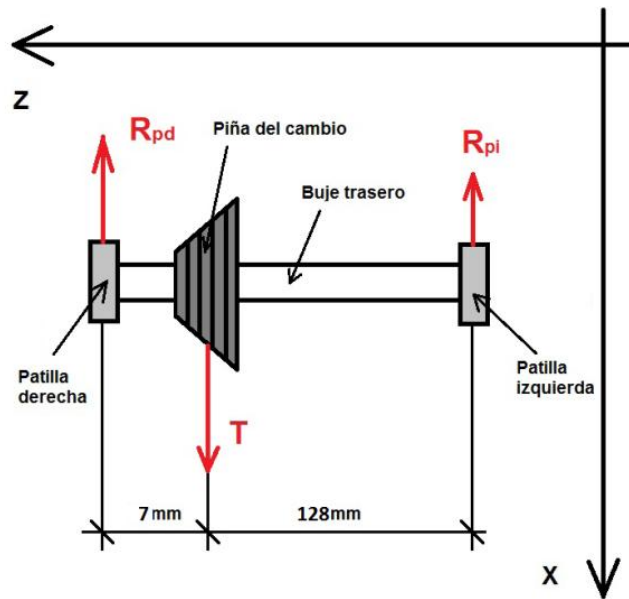
$$\sum M_x = 0; R_d' \cdot 75 = 10352'423 \cdot (20 + 75); R_d' = 13113'069N$$

Las fuerzas transmitidas por los rodamientos a la caja del pedalier del cuadro en las zonas donde apoyan estos, serán las reacciones pero con sentido contrario.

- $F_d' = -13113'069 \text{ N}$ (sentido negativo del eje X)
- $F_i' = 987'13 \text{ N}$ (sentido positivo del eje X)

Fuerzas en el eje trasero

Como se comenta en la hipótesis anterior, para averiguar las reacciones que se producen las patillas traseras hay que posicionarse en el plano formado por los ejes X y Z. Conocida la distancia entre las patillas, 135 mm, y la distancia de la piña del cambio a la patilla derecha, 7 mm, realizaremos el cálculo de las reacciones.



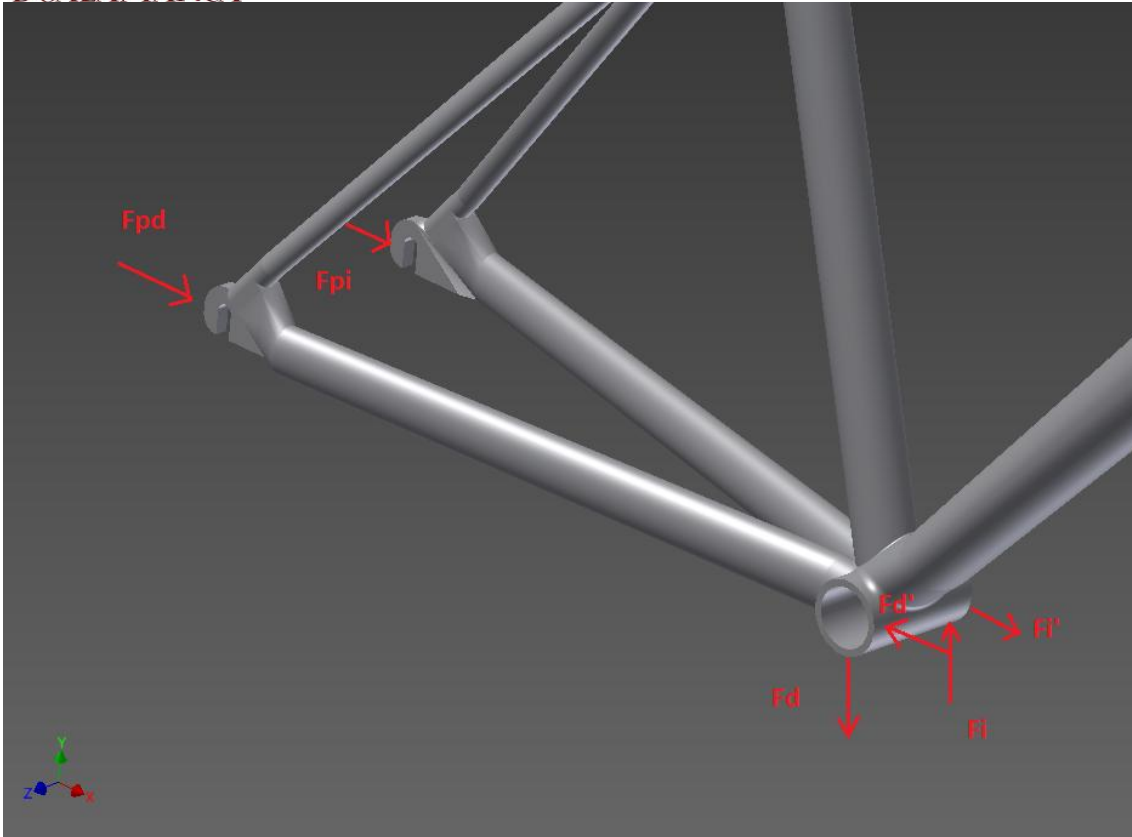
$$\sum F_y = 0; R_{pd} + R_{pi} = 10352'423; R_{pi} = 536'792N$$

$$\sum M_x = 0; R_{pd} \cdot 135 = 10352'423 \cdot 128; R_{pd} = 9815'63N$$

Las fuerzas que se transmiten a la patilla derecha e izquierda serán del mismo valor que las reacciones pero de sentido contrario.

- $F_{pi} = -536'792 \text{ N}$ (sentido negativo del eje X)
- $F_{pd} = 9815'63 \text{ N}$ (sentido positivo del eje X)

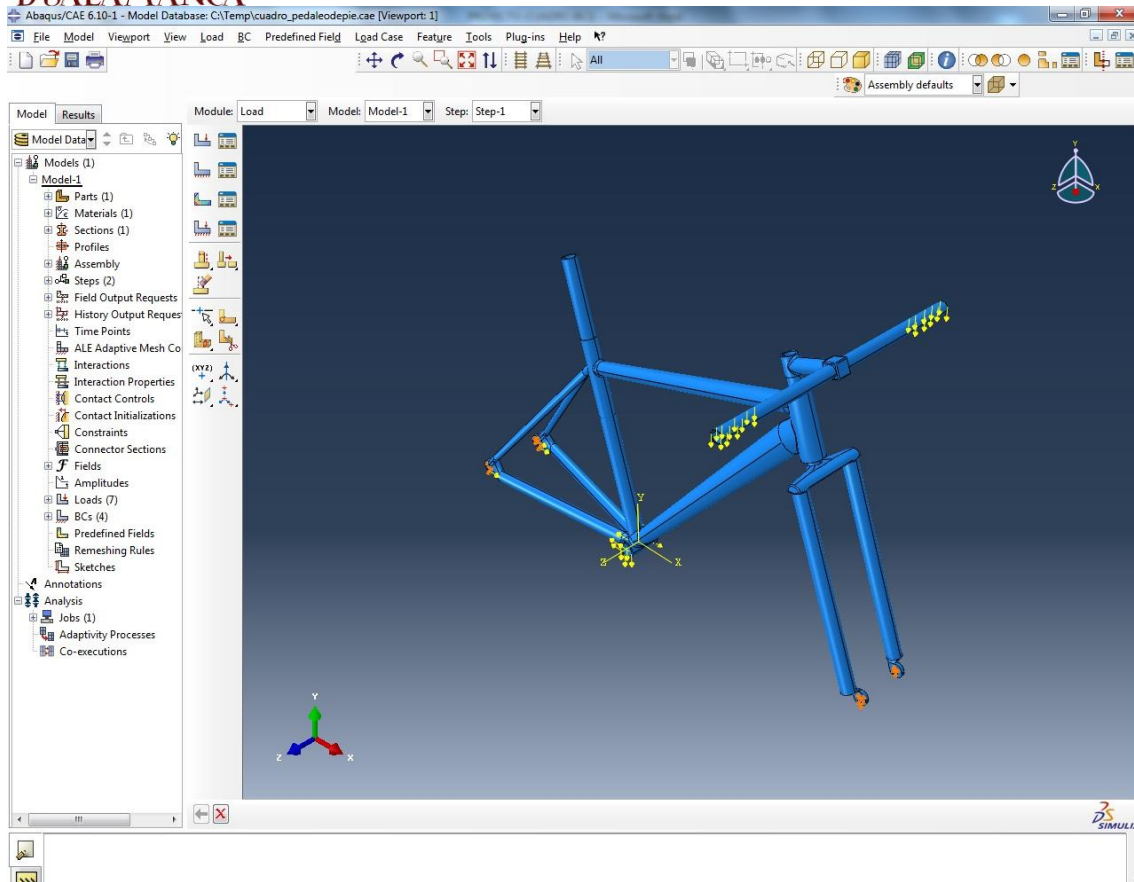
En definitiva, las fuerzas a aplicar en la caja del pedalier y el eje trasero son las siguientes:



- $F_d = 3230'76 \text{ N}$
- $F_i = 680'16 \text{ N}$
- $F_{d'} = 13113'069 \text{ N}$
- $F_{i'} = 2760'646 \text{ N}$
- $F_{p_i} = 536'792 \text{ N}$
- $F_{p_d} = 9815'63 \text{ N}$
- $F_{\text{manillar}} = 588'6 \text{ N}$



Ahora aplicamos las cargas en el modelo de Abaqus creando un nuevo set en el manillar y aplicando la carga de 588'6 N Como se vio en la hipótesis anterior las cargas están condicionadas por el número de nodos creados en el "set" donde inciden. Por lo que:

- $F_d = 3230'76 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 16'827 \text{ N por nodo.}$
- $F_i = 680'16 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 3'543 \text{ N por nodo.}$
- $F_{d'} = 13113'069 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 68'297 \text{ N por nodo.}$
- $F_{i'} = 2760'646 \text{ N} \rightarrow 192 \text{ nodos} \rightarrow 14'378 \text{ N por nodo.}$
- $F_{p_i} = 536'792 \text{ N} \rightarrow 110 \text{ nodos} \rightarrow 4'879 \text{ N por nodo.}$
- $F_{p_d} = 9815'63 \text{ N} \rightarrow 110 \text{ nodos} \rightarrow 89'233 \text{ N por nodo.}$
- $P_{\text{manillar}} = 588'6 \text{ N} \rightarrow 3626 \text{ nodos} \rightarrow 0'162 \text{ N por nodo.}$



Con las cargas introducidas se ejecuta el análisis de la misma forma que en las primeras hipótesis, y se examinan los resultados.

2.8.- Análisis

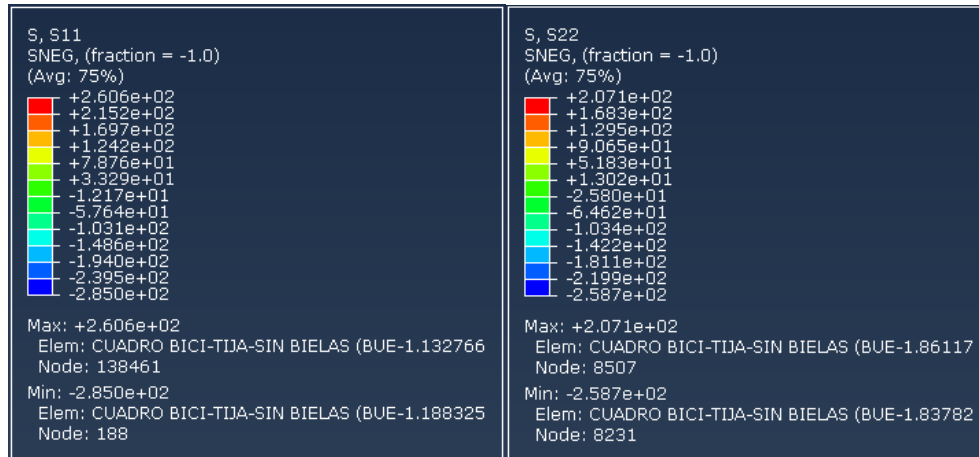
Una vez se tiene el modelo preparado, con las condiciones de contorno y sus cargas, solo falta realizar el análisis. Para poder hacerlo se debe pasar al módulo “Job”. Se crea un nuevo trabajo pulsando el botón “Create Job” , al que se podrá llamar “carga asiento”, se pulsa en “Continue” y aparecerá la ventana “Edit Job”, la cual se acepta por defecto pulsando OK. Ahora se pulsa el botón “Job Manager” , nos aparece la ventana con el mismo nombre y se pulsa el botón “Submit”. Una vez termina de analizar, se pulsa en el botón “Results”, automáticamente pasa a módulo “Visualization”, donde se podrá ver los resultados de las tensiones y deformaciones.

2.8.1.- Cálculos analíticos e interpretación de los resultados

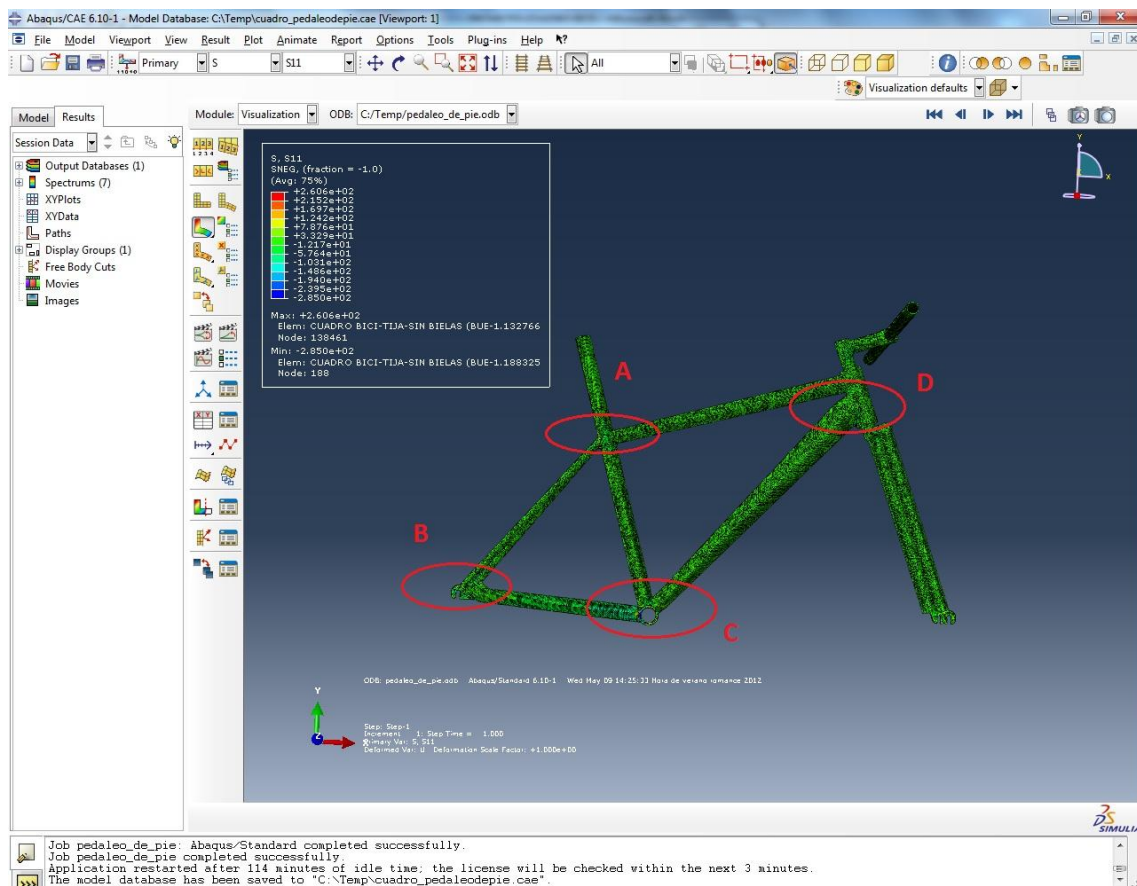
Hay que fijarse en las tensiones máximas que se producen en nuestro objeto. Aparecerá en el cuadro a la izquierda de nuestra pantalla, en la cual aparece las tensiones para los



diferentes tonos de color, y las tensiones máximas y mínimas y en que nudo se encuentra. Las tensiones se miraran en el eje S, S11 y S, S22.

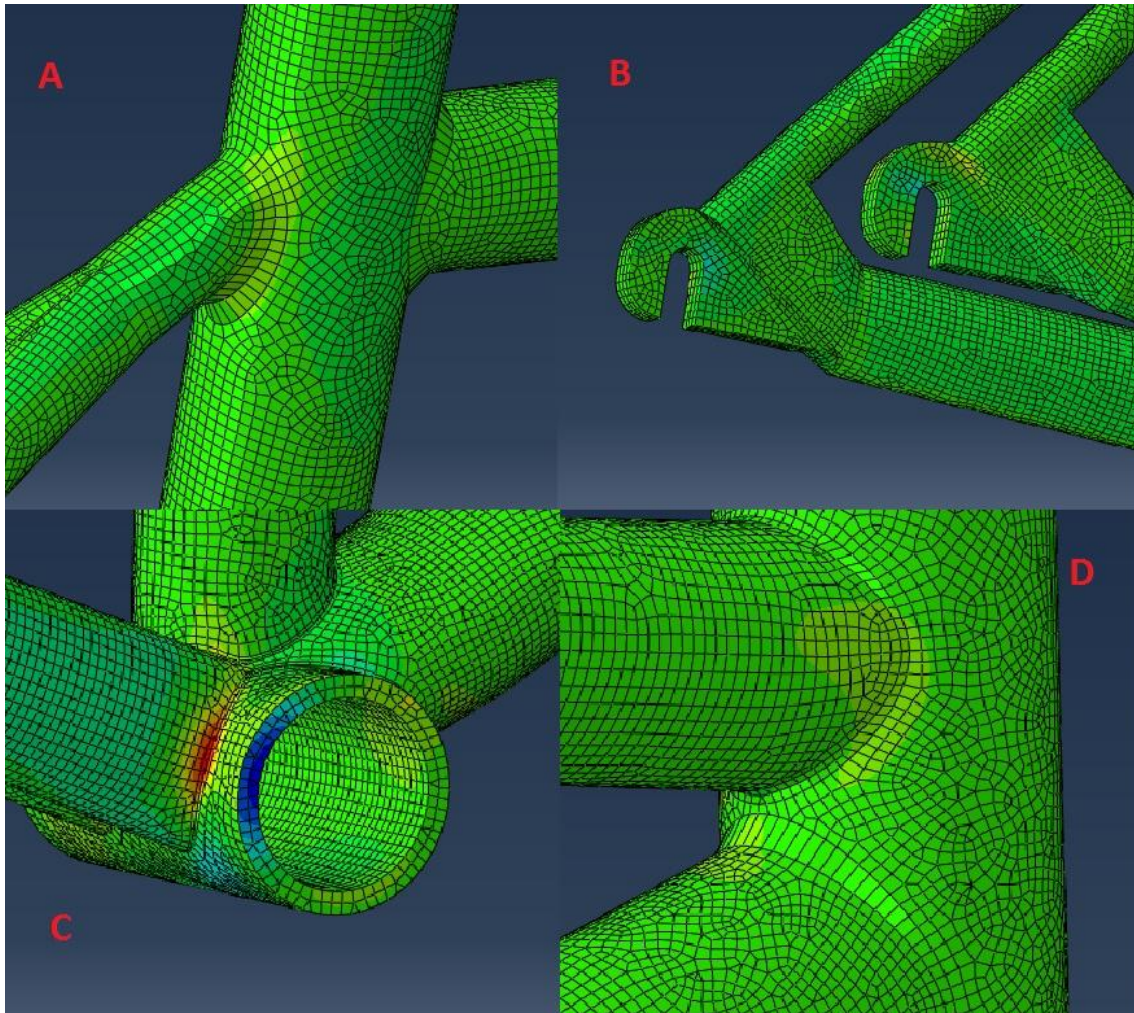


En la siguiente imagen se marcan las zonas donde las tensiones son más elevadas donde se ve que trabaja cuadro al esfuerzo expuesto.





Esta es la imagen aumentada de las 4 zonas señaladas.



La zona donde se produce la mayor concentración de tensiones es la que vemos en el dibujo “A”, que es la primera unión o el primer soporte donde recae el peso del ciclista. Las demás se podría decir que se producen a la hora de distribuir el peso para que lleguen a las cuatro patillas.

- La tensión máxima en el eje X (S, S11) es de 260'6 MPa.
- La tensión máxima en el eje Y (S, S22) es de 207'1 MPa.
- La tensión máxima en el eje Z (S, S33) es de 0 MPa.

Con los datos del material obtenidos se sabe que el límite elástico es de 275 MPa, frente a los 260'6 MPa de la tensión máxima, hay que tener en cuenta que se ha aumentado la sección en 3 mm, por lo que la estructura del cuadro soporta el esfuerzo al que está sometido.



En esta parte lo que se hará será calcular las tensiones analíticamente en determinados puntos de la pieza y se comprobará que esta tensión coincide o la diferencia no es muy grande, por el orden del 10%.

Para saber las tensiones que tiene en cada parte se pulsará el botón “Query information”



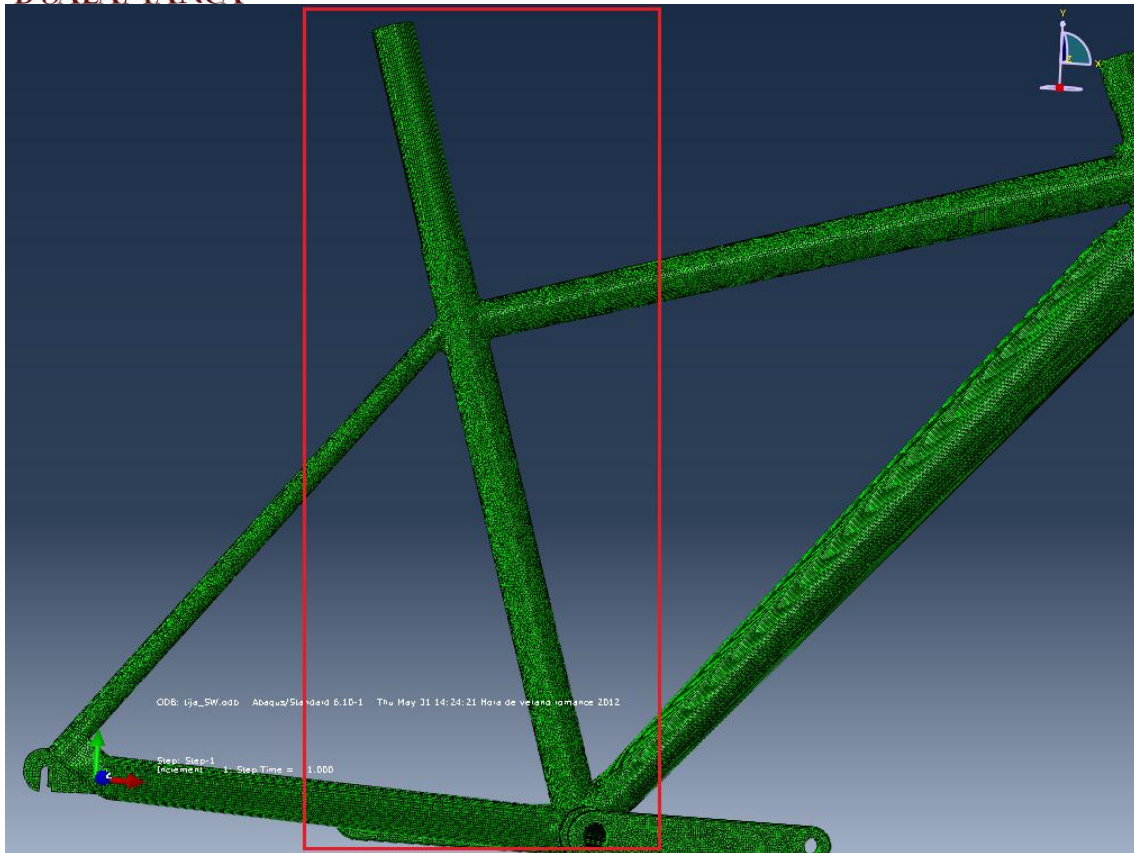
. Nos aparecerá la ventana de “Query” y se selecciona “Prove values” en “Visualización Module Queries”. Esto a su vez lleva a la ventana “Prove Values”. En esta ventana se debe de seleccionar en “Probe”, “Nodes”. Se seleccionan las casillas de “Part instance” (no influye mucho esta), “Node ID”, “Orig. Coords” y “S,S11” (esta variará a “S,S22” dependiendo de sobre que eje se esté estudiando las tensiones.

2.8.2.- Cálculos teóricos y comparación con Abaqus

A continuación se realizara una serie de cálculos sobre determinadas partes de nuestro cuadro, referentes a la tercera y última de nuestras hipótesis de nuestro modelo.

Explicar una vez más, que debido a la complejidad del objeto, es muy complicado determinar las tensiones en puntos concretos del modelo, por lo que se hará serán valoraciones aproximadas, pero estado siempre dentro del rango de valores en los cuales se tiene que encontrar.

Los primeros cálculos se van a centrar en el tubo vertical del cuadro, donde está aplicada la siguiente fuerza correspondiente al peso del ciclista junto con pedaleo.



- $F_d = 3230'76 \text{ N}$
- $F_i = 680'16 \text{ N}$
- $F_d' = 13113'069 \text{ N}$
- $F_i' = 2760'646 \text{ N}$
- $F_{pi} = 536'792 \text{ N}$
- $F_{pd} = 9815'63 \text{ N}$
- $F_{manillar} = 588'6 \text{ N}$

En la parte inferior de los cálculos se va a suponer que estará empotrada y libre arriba, por lo que las fuerzas que tenemos, como son las de las fuerzas que ejerce el pedaleo, las consideraremos nulas, debido a que están ejercidas justo en el empotramiento. Debido a esto solo tendremos en cuenta la fuerza ejercida en el manillar por el ciclista.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(35^2 - 33^2) = 106'8 \text{ mm}^2$$

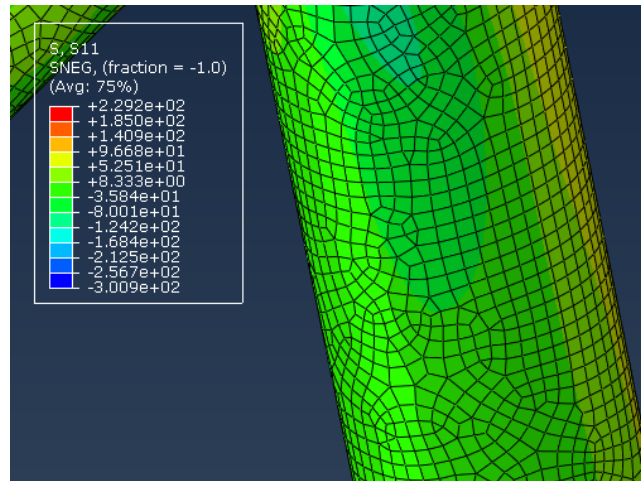
Calculo de las tensiones del eje X (S11).

Se sabe que hay una fuerza vertical en el manillar de $588'6 \text{ N}$ y que por traslado de fuerzas se tendrá en el tubo vertical, y que el tubo tiene una inclinación de $73'5^\circ$. Por lo que:



$$tg73'5 = \frac{588'6}{x}; x = \frac{588'6}{tg73'5} = 174'351N$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{174'351}{106'8} = 1'632 \frac{N}{mm^2} = 1'632MPa$$

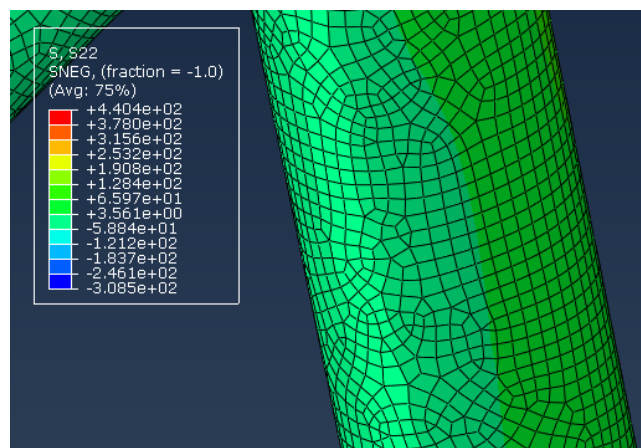


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

Se utiliza la fuerza de 588'6 N vertical. Por lo que:

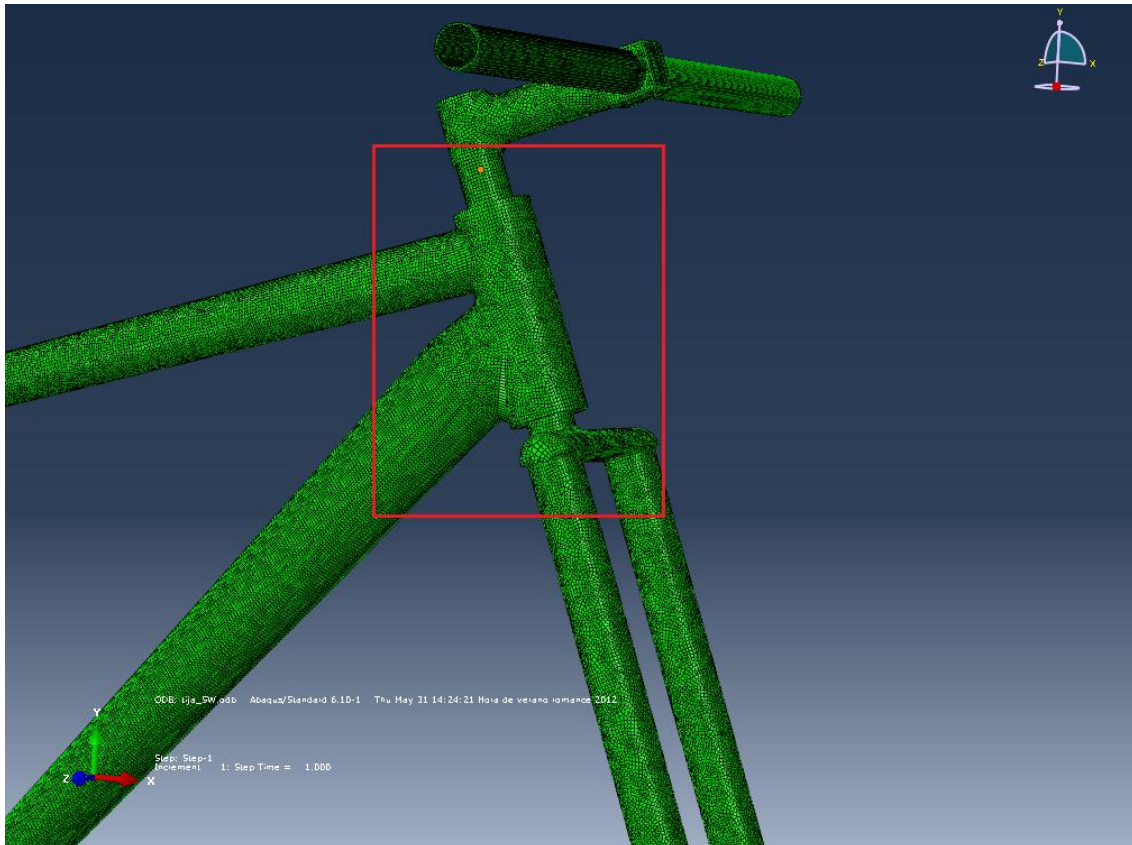
$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{588'6}{106'8} = 5'511 \frac{N}{mm^2} = 5'511MPa$$





Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.

Como segunda parte a estudiar, se escoge el tubo de la dirección. Al igual que el tubo vertical se va a suponer que está empotrado en la parte inferior y libre en la superior.



Se hace traslado de fuerzas, por lo que se supone que la fuerza de 588'6 N está aplicada sobre este tubo.

Se calcula el área de la sección del tubo.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(48'2^2 - 28'6^2) = 1182'244 \text{ mm}^2$$

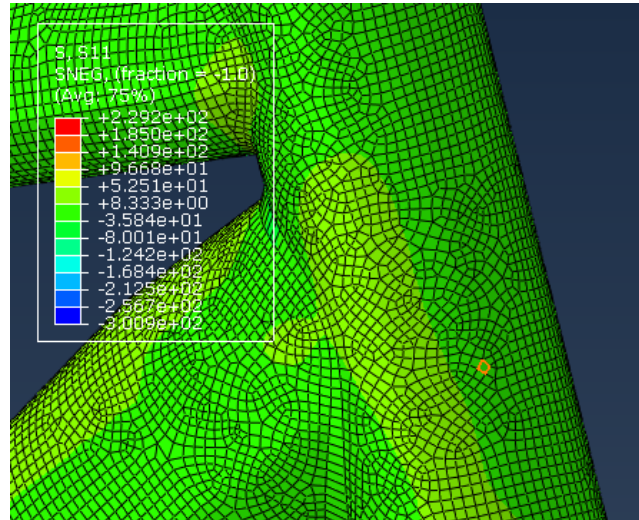
Calculo de las tensiones del eje X (S11).

Se sabe que hay una fuerza vertical es de 588'6 N, y que el tubo tiene una inclinación de 70°. Por lo que:

$$\text{tg}70 = \frac{588'6}{x}; x = \frac{588'6}{\text{tg}70} = 214'233N$$



$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{214'233}{1182'244} = 0'181 \frac{N}{mm^2} = 0'181MPa$$

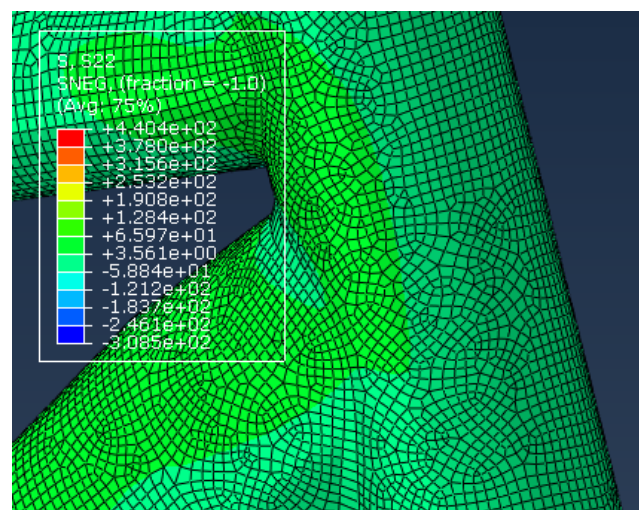


Se observa que la tensión teórica que da está dentro de los márgenes que nos da el software Abaqus.

Calculo de las tensiones del eje Y (S22).

Se utiliza la fuerza vertical de 588'6 N.

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{588'6}{1182'244} = 0'498 \frac{N}{mm^2} = 0'498MPa$$



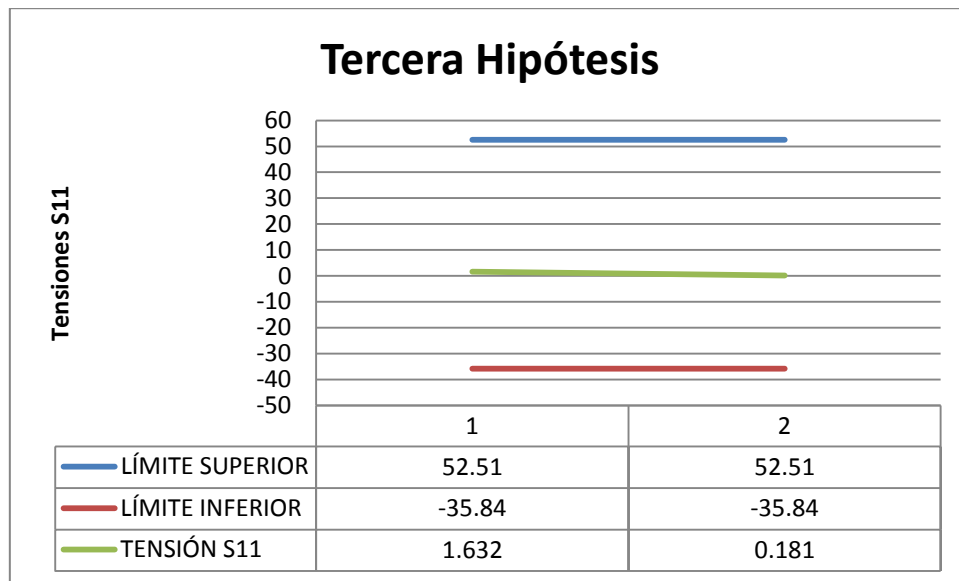
Se observa que el valor que nos da está dentro de los valores que nos da el software Abaqus.



2.9.-Gráficas de tensiones

Se han escogido los puntos de referencia anteriores en los ejes X e Y, con los valores máximos y mínimos entre los que se comprenden y se han realizado una serie de gráficas.

Gráfica S11



Gráfica S22

